



DEVELOPMENT OF A SINGLE-COIL EDDY CURRENT SYSTEM FOR SURFACE CRACK DETECTION IN METAL

Nguyen Duc Khuong*, Tran Van Khoi

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 30/05/2025

Revised: 31/07/2025

Accepted: 10/08/2025

Published online: 15/08/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.6.5>

* *Corresponding author*

Email: khuong.ktd@utc.edu.vn

Abstract. Metal fatigue or failure often initiates at the external surface of metallic structures. Therefore, early detection of surface cracks is crucial for evaluating the durability and reliability of metal components in fields such as aerospace, transportation, and manufacturing. Among various nondestructive testing (NDT) methods, eddy current testing (ECT) has been widely applied due to its rapid and accurate detection of surface and near-surface defects in conductive materials. This study proposes a surface crack detection system for aluminium materials using a single-coil eddy current sensor. The system operates by measuring the variation in output voltage amplitude as the sensor scans regions with and without surface cracks. The signal amplitude changes due to the disturbance in the eddy current distribution caused by surface defects. The system is evaluated under different excitation voltages, frequencies, and crack sizes. Experimental results demonstrate that the system can effectively detect surface cracks as small as 3.0 mm in length, 1.0 mm in width, and 0.6 mm in depth, confirming its feasibility for surface inspection of lightweight metal components.

Keywords: crack detection sensor, eddy current method, defect detection, non-contact measurement, non-destructive testing.

@ 2025 University of Transport and Communications



PHÁT TRIỂN THỬ NGHIỆM HỆ THỐNG PHÁT HIỆN VẾT NỨT TRÊN BỀ MẶT KIM LOẠI DỰA TRÊN PHƯƠNG PHÁP DÒNG ĐIỆN XOÁY SỬ DỤNG MỘT CUỘN DÂY

Nguyễn Đức Khương*, Trần Văn Khôi

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 30/05/2025

Ngày nhận bài sửa: 31/07/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/08/2025

Ngày xuất bản Online: 15/08/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.6.5>

* Tác giả liên hệ

Email: khuong.ktd@utc.edu.vn

Tóm tắt. Sự hỏng hóc hoặc mỏi kim loại thường bắt đầu từ bề mặt bên ngoài của vật thể kim loại. Vì vậy, phát hiện sớm các vết nứt bề mặt là yếu tố then chốt trong việc đánh giá độ bền và độ tin cậy của các kết cấu kim loại trong các ngành như hàng không, giao thông vận tải và sản xuất. Trong số các phương pháp kiểm tra không phá hủy, kỹ thuật dòng điện xoáy được ứng dụng rộng rãi nhờ khả năng phát hiện nhanh và chính xác các khuyết tật bề mặt và gần bề mặt trên vật liệu dẫn điện. Nghiên cứu này giới thiệu một hệ thống phát hiện vết nứt bề mặt trên vật liệu nhôm sử dụng cảm biến dòng điện xoáy một cuộn dây. Hệ thống hoạt động dựa trên việc đo sự thay đổi biên độ điện áp đầu ra khi cảm biến quét qua vùng có và không có vết nứt. Biên độ tín hiệu thay đổi do sự gián đoạn của dòng điện xoáy gây ra bởi khuyết tật bề mặt. Hệ thống được khảo sát với các mức điện áp, tần số kích thích và kích thước vết nứt khác nhau. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống có thể phát hiện hiệu quả các vết nứt có kích thước từ Dài $3,0 \times$ Rộng $1,0 \times$ Sâu $0,6$ mm, chứng minh tính khả thi trong ứng dụng kiểm tra bề mặt kim loại nhẹ.

Từ khóa: cảm biến phát hiện vết nứt, phương pháp dòng điện xoáy, phát hiện khuyết tật, đo không tiếp xúc, kiểm tra không phá hủy.

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các khuyết tật lớn thường được tạo ra bởi các vết nứt nhỏ, dẫn đến tổn thương bên trong và cuối cùng là gãy, đặc biệt là ở các bộ phận hàn [1]. Do đó, việc phát hiện sớm các khuyết tật có

ý nghĩa rất quan trọng trong đánh giá không phá hủy. Một số phương pháp đánh giá không phá hủy nổi bật để xác định các vết nứt bề mặt kim loại là: Phương pháp kiểm tra thông qua hình ảnh, phương pháp siêu âm, phương pháp rò rỉ từ thông và phương pháp dòng điện xoáy.

Phương pháp kiểm tra thông qua hình ảnh: Đây là một phương pháp kiểm tra không tiếp xúc được sử dụng rộng rãi trong thử nghiệm không phá hủy vì tốc độ và độ chính xác của nó [2]. Phương pháp này phù hợp để phát hiện các khuyết tật như vết nứt, biến dạng và ăn mòn trên bề mặt vật liệu. Tuy nhiên phương pháp này không cung cấp bất kỳ thông tin nào liên quan đến sự hiện diện của các khuyết tật bên trong.

Phương pháp siêu âm: Sử dụng các đặc tính phản xạ, nhiễu xạ và truyền sóng siêu âm để xác định xem có khuyết tật bên trong kim loại hay không [3, 4]. Tuy nhiên, siêu âm thông thường có một số hạn chế như tốc độ thấp, không thể sử dụng để phát hiện từ xa (đầu dò siêu âm cần đặt sát đối tượng cần kiểm tra), rất khó để phát hiện các khuyết tật có hình dạng phức tạp hoặc hình dạng bất thường do giới hạn của các hệ thống kiểm tra siêu âm thông thường, các khuyết tật trên bề mặt trên cùng và hư hỏng mối hàn bề mặt cũng không thể phát hiện được.

Phương pháp rò rỉ từ thông: Phương pháp kiểm tra rò rỉ từ thông đã được sử dụng khá rộng rãi để đánh giá vật liệu sắt từ. Một nam châm vĩnh cửu hoặc nam châm điện thường được sử dụng để tạo ra từ trường mạnh để từ hóa vật liệu từ đến trạng thái bão hòa [5, 6]. Khi vật liệu được từ hóa, các khuyết tật trên hoặc gần bề mặt gây ra sự thay đổi về độ từ thẩm. Điều này dẫn đến hướng của các đường sức cảm ứng từ sẽ thay đổi, với một lượng từ thông rò rỉ lên bề mặt. Một cảm biến Hall được sử dụng để phát hiện sự thay đổi này của từ trường, từ đó phân tích các khuyết tật trên bề mặt vật liệu. Tuy nhiên, phương pháp này có tốc độ kiểm tra chậm và độ sâu của khuyết tật rất khó xác định chính xác.

Phương pháp dòng điện xoáy: Đây là phương pháp thường được sử dụng khi kiểm tra vật liệu dẫn điện để phát hiện các khuyết tật bề mặt và gần bề mặt. Thông thường, các cảm biến hoạt động theo phương pháp dòng điện xoáy bao gồm một cuộn dây kích thích và một cuộn dây cảm biến. Cuộn cảm biến phát hiện những thay đổi trong từ trường thứ cấp do dòng điện xoáy tạo ra dưới dạng điện áp cảm ứng. Khi có khuyết tật gần bề mặt hoặc trên bề mặt, dòng điện xoáy giảm đi, gây ra sự thay đổi điện áp trên cuộn dây cảm biến [7, 8]. Phương pháp này có thể phát hiện hư hỏng gần bề mặt hoặc trên bề mặt đối tượng. Tuy nhiên, khoảng cách giữa cảm biến và bề mặt đối tượng phải được giữ cố định [9]. Cơ sở lý thuyết cho việc tính toán sự thay đổi trở kháng cuộn dây ở khu vực vết nứt đã được đề xuất [10]. Sau đó, hệ thống phát hiện vết nứt dựa trên 3 cuộn dây cũng đã được phát triển [11]. Bên cạnh cảm biến cuộn dây tròn, các cảm biến có dạng hình vuông cũng được phát triển [12, 13].

Gần đây, cảm biến dòng điện xoáy sử dụng một cuộn dây (single-coil eddy current sensors) đã trở thành một hướng nghiên cứu được quan tâm, đặc biệt trong các ứng dụng có không gian lắp đặt hạn chế hoặc môi trường làm việc khắc nghiệt. Borovik và Sekisov đã tổng hợp các ứng dụng của cảm biến một cuộn trong việc giám sát khe hở cánh tuabin, phát hiện mòn bề mặt và nhận biết hạt kim loại trong hệ thống bôi trơn của động cơ tuabin khí [14]. Nghiên cứu này cho thấy loại cảm biến này có khả năng hoạt động ổn định ở nhiệt độ lên tới 1200 °C và cho tín hiệu phản hồi rõ ràng trong điều kiện rung động mạnh. Ngoài ra, Borovik và cộng sự cũng đã phân tích ảnh hưởng của các yếu tố môi trường như dao động nhiệt độ, nhiễu điện từ và sự thay đổi khoảng cách cảm biến đến kết quả đo, từ đó đề xuất phương pháp hiệu chỉnh nhằm nâng cao độ chính xác và ổn định của hệ thống đo [15]. Trong một hướng nghiên cứu khác, Xu và cộng sự đã phát triển cảm biến dịch chuyển dạng single-ended kết hợp kỹ thuật bù nhiệt độ, cho phép đo sai lệch nhỏ với độ chính xác cao nhờ khả năng điều khiển biên độ tín hiệu theo dao động

pha [16]. Những kết quả trên cho thấy cảm biến một cuộn dây không chỉ phù hợp cho việc phát hiện khuyết tật bề mặt mà còn có tiềm năng phát triển thành các hệ thống đo không phá hủy có kích thước nhỏ gọn, tiêu thụ năng lượng thấp và dễ dàng tích hợp.

Tại Việt Nam, Lê Minh Huy và cộng sự gần đây đã mở rộng các ứng dụng phương pháp dòng điện xoáy trong lĩnh vực kiểm tra không phá hủy. Trong nghiên cứu [17], nhóm tác giả đề xuất một hệ thống kiểm tra dòng điện xoáy xung (Pulsed Eddy Current Testing – PECT) kết hợp với mô hình học máy để tăng cường khả năng phát hiện ăn mòn trong điều kiện môi trường có sự biến thiên nhiệt độ. Nghiên cứu [18] tiếp tục phát triển hệ thống cảm biến Hall vi sai (differential Hall sensors) cho PECT, giúp nâng cao độ nhạy trong việc phát hiện khuyết tật và hạn chế ảnh hưởng của dịch chuyển cảm biến. Các công trình này thể hiện xu hướng tích hợp trí tuệ nhân tạo và cảm biến đa điểm vào hệ thống kiểm tra không phá hủy.

So sánh với các nghiên cứu sử dụng cấu trúc đa cảm biến và phức tạp, nghiên cứu này trình bày một hệ thống sử dụng duy nhất một cuộn dây hình trụ, hướng tới thiết kế nhỏ gọn, đơn giản và dễ tích hợp, đồng thời vẫn đảm bảo khả năng phát hiện vết nứt trên bề mặt và gần bề mặt kim loại dẫn điện.

So với các nghiên cứu quốc tế về cảm biến một cuộn dây, hệ thống trong bài báo này có một số điểm khác biệt. Cụ thể, các nghiên cứu của Borovik và cộng sự [14, 15], chủ yếu ứng dụng cảm biến một cuộn dây trong giám sát khe hở tuabin, dịch chuyển cơ học, với môi trường hoạt động khắc nghiệt, nhưng không đi sâu vào khả năng phát hiện các vết nứt bề mặt kim loại. Nghiên cứu của Xu và các cộng sự [16] tập trung vào cảm biến dịch chuyển vi sai (single-ended displacement sensor) có độ chính xác cao, nhưng lại không khảo sát khả năng phát hiện khuyết tật. Trong khi đó, hệ thống trong nghiên cứu này tập trung phát hiện khuyết tật trên bề mặt kim loại dẫn điện kết hợp xử lý tín hiệu số qua bộ khuếch đại khóa pha (Lock-in Amplifier).

Đổi với các nghiên cứu trong nước, Lê Minh Huy và các cộng sự [17, 18] đã tiên phong trong việc tích hợp trí tuệ nhân tạo và cảm biến vi sai vào hệ thống PECT nhằm tăng cường phát hiện ăn mòn hoặc khuyết tật sâu trong vật liệu. Tuy nhiên, các hệ thống đó sử dụng cấu trúc đa cảm biến và cần yêu cầu hiệu chuẩn. Trong khi đó, nghiên cứu này trình bày một cấu trúc cảm biến đơn giản hơn, dễ tích hợp vào hệ thống đo cầm tay hoặc tự động, nhưng vẫn đảm bảo được khả năng phát hiện vết nứt trên bề mặt kim loại dẫn điện.

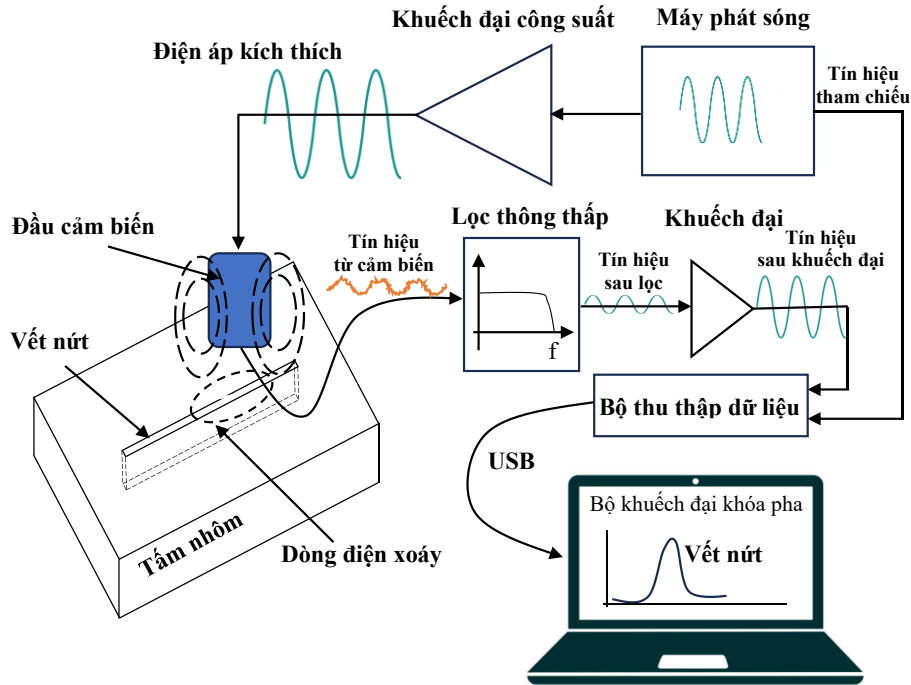
Phần còn lại của bài báo được trình bày như sau: Phần 2 miêu tả cấu trúc và nguyên lý của hệ thống phát hiện vết nứt. Phần 3 trình bày kết quả nghiên cứu và thảo luận. Kết luận và phương hướng phát triển được thể hiện trong Phần 4.

2. CẤU TRÚC VÀ NGUYÊN LÝ HỆ THỐNG PHÁT HIỆN VẾT NÚT DỰA TRÊN PHƯƠNG PHÁP DÒNG ĐIỆN XOÁY

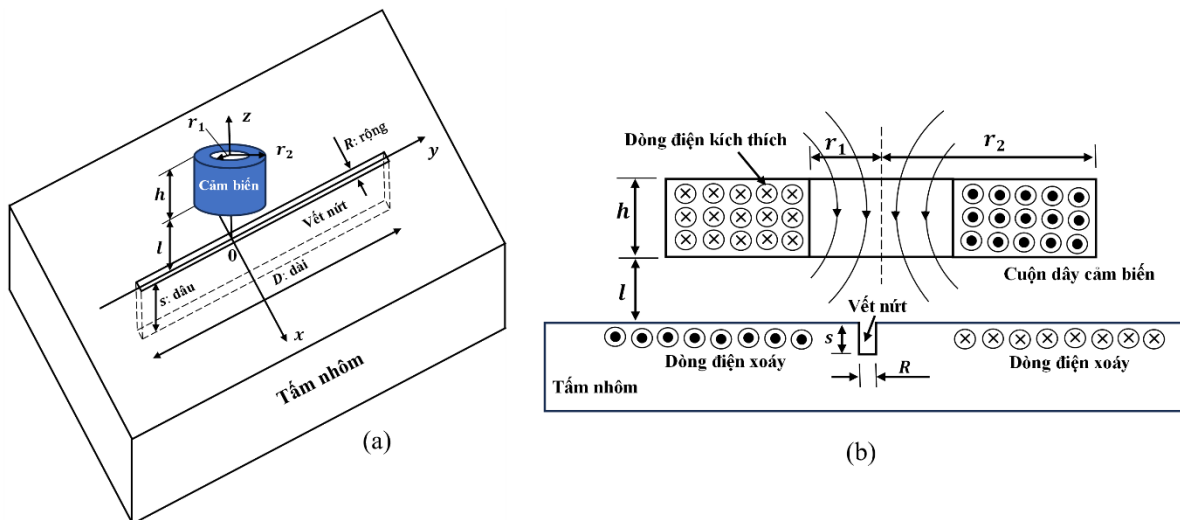
2.1. Cấu trúc

Hình 1 trình bày cấu trúc của hệ thống phát hiện vết nứt trên bề mặt và gần bề mặt tấm nhôm dựa trên phương pháp dòng điện xoáy. Hệ thống gồm các thành phần: Máy phát sóng hình Sin; mạch khuếch đại công suất; cảm biến; tấm nhôm có vết nứt; mạch lọc thông thấp; mạch khuếch đại tín hiệu; bộ thu thập dữ liệu và máy tính hiển thị. Máy phát sóng hình Sin đóng vai trò cung cấp nguồn điện kích thích cho cảm biến. Tuy nhiên do giới hạn về dòng điện đầu ra của máy phát sóng, vì vậy tín hiệu kích thích cần được khuếch đại công suất trước khi đưa vào cuộn dây cảm biến. Tín hiệu ra từ cảm biến thường thay đổi rất nhỏ khi cảm biến ở vùng có hoặc không có vết nứt và bao gồm cả nhiễu, do đó một mạch lọc thông thấp và mạch khuếch đại được sử

dụng. Sau đó, tín hiệu này được đưa tới bộ thu thập dữ liệu và truyền lên máy tính để xử lý. Tín hiệu ra từ cảm biến cũng là tín hiệu hình Sin như điện áp kích thích. Biên độ của tín hiệu này sẽ thay đổi khi cảm biến ở khu vực có hoặc không có vết nứt. Việc quan sát sự thay đổi biên độ của tín hiệu từ cảm biến được thực hiện thông qua bộ khuếch đại khóa pha sẽ được trình bày chi tiết ở Mục 2.2. Để thực thi việc quan sát biên độ tín hiệu này, điện áp kích thích từ máy phát sóng hình Sin cũng được thu thập làm tín hiệu tham chiếu.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ thống phát hiện vết nứt dựa trên phương pháp dòng điện xoáy.



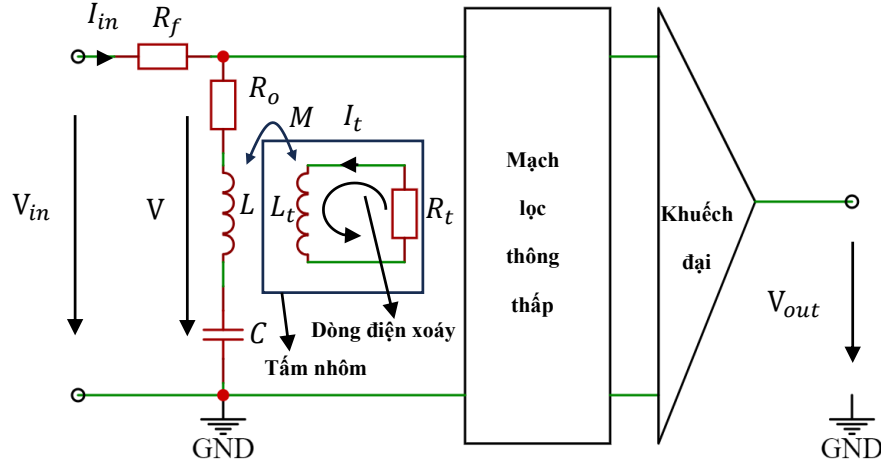
Hình 2. Cảm biến cùng vết nứt trên bề mặt tấm nhôm (a) và mặt cắt dọc cảm biến cùng tấm nhôm (b).

2.2. Nguyên lý hoạt động của cảm biến

Hình 2a trình bày cảm biến và vết nứt trên bề mặt tấm nhôm. Cảm biến là một cuộn dây hình trụ có mặt cắt dọc được thể hiện ở Hình 2b. Khi một dòng điện xoay chiều hình Sin được đưa vào cuộn dây cảm biến, dòng điện này sẽ sinh ra một từ trường biến thiên theo thời gian. Nếu

cảm biến đặt gần với một vật dẫn khác (tấm nhôm), dòng điện xoáy sẽ được sinh ra ở khu vực bề mặt vật dẫn đó như thể hiện trong Hình 2b. Dòng điện xoáy này lại tác động tương hỗ lên cuộn dây cảm biến. Khi cảm biến đặt trên khu vực có vết nứt, dòng điện xoáy sẽ giảm đi. Ngoài ra, hệ số điện cảm L của cuộn dây cũng thay đổi khi cảm biến ở khu vực có hoặc không có vết nứt. Điều này dẫn đến điện áp trên đầu cuộn dây cũng thay đổi theo. Vì vậy, vết nứt có thể được phát hiện bằng việc đo điện áp trên đầu cuộn dây.

Sơ đồ mạch điện tương đương được thể hiện trên Hình 3. Cuộn dây cảm biến được thay thế bằng một điện trở R_o và điện cảm L . Tấm nhôm có dòng điện xoáy chạy trên bề mặt được thay thế bằng một điện trở R_t và điện cảm L_t . Điện trở R_f được mắc nối tiếp trước cuộn dây cảm biến đóng vai trò phân áp cho mạch điện. Ngoài ra, một tụ điện C cũng được mắc nối tiếp sau cảm biến để tăng biên độ dòng điện I_{in} chạy qua cuộn dây với cùng một điện áp kích thích V_{in} . Sự tương tác giữa cuộn dây cảm biến và dòng điện xoáy trên tấm nhôm được thể hiện thông qua hệ số hỗ cảm M .



Hình 3. Mạch điện tương đương.

Xét mạch điện tương đương ở Hình 3, với giả sử mạch lọc thông thấp là lý tưởng và trở kháng đầu vào của bộ khuếch đại là vô cùng lớn. Theo định luật Kirchhoff, giá trị điện áp V rơi trên cuộn dây cảm biến và tụ điện được tính toán như sau:

$$\dot{V} = \frac{\dot{V}_{in}}{R_f + R_o + Z_L + Z_C} (R_o + Z_L + Z_C) - \dot{I}_t Z_M \quad (1)$$

trong đó Z_L , Z_C , và Z_M tương ứng là trở kháng phức của cuộn dây cảm biến, tụ điện và hỗ cảm. Các giá trị này được tính toán như sau:

$$Z_L = j\omega L \quad (2)$$

$$Z_C = -\frac{j}{\omega C} \quad (3)$$

$$Z_M = j\omega M \quad (4)$$

trong đó j là đơn vị ảo và ω là tần số góc của nguồn điện kích thích.

Dòng điện xoáy $\dot{I}_t$ là một đại lượng phức tạp. Giá trị này phụ thuộc vào rất nhiều thông số như cường độ dòng điện kích thích $\dot{I}_{in}$; kích thước cuộn dây cảm biến; độ từ thẩm, kích thước

của vật dẫn (tấm nhôm); kích thước vết nứt; khoảng cách giữa cảm biến và vật dẫn,... Tuy nhiên, dòng điện xoáy sẽ giảm nếu trên tấm nhôm có vết nứt.

Khi mạch lọc thông thấp được giả sử là lý tưởng, biên độ tín hiệu không bị suy giảm khi đi qua mạch lọc. Do đó, giá trị điện áp đầu ra được tính toán như sau:

$$\dot{V}_{out} = g\dot{V} \quad (5)$$

trong đó g là độ lợi của mạch khuếch đại tín hiệu.

Thay thế (1) vào (5) đạt được:

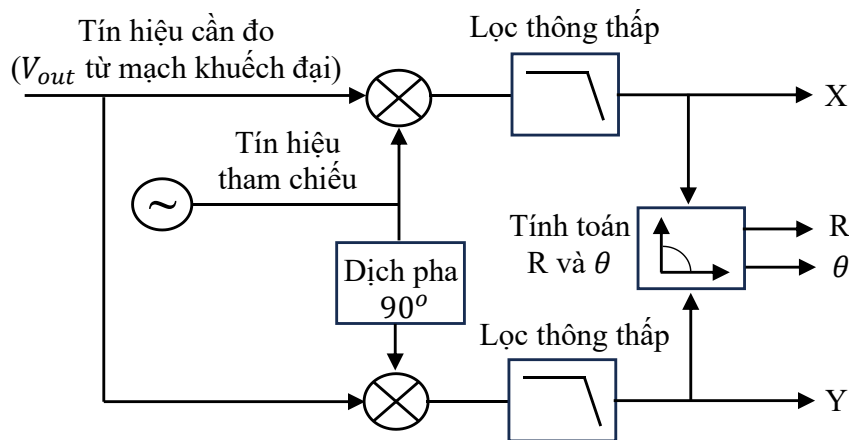
$$\dot{V}_{out} = \frac{g\dot{V}_{in}}{R_f + R_o + Z_L + Z_c} (R_o + Z_L + Z_c) - g\dot{I}_t Z_M \quad (6)$$

Khi cảm biến ở khu vực có vết nứt, giá trị điện cảm L (hay Z_L), giá trị hồ cảm M (hay Z_M), và dòng điện xoáy $\dot{I}_t$ sẽ thay đổi. Điều này dẫn đến sự thay đổi điện áp $\dot{V}_{out}$. Điện áp này tăng lên hay giảm xuống tùy thuộc vào độ từ thẩm của vật dẫn và không gian lấp đầy trong vết nứt. Khi không gian lấp đầy trong vết nứt là không khí, do độ từ thẩm của nhôm nhỏ hơn không khí và dòng điện xoáy I_t giảm đi nên điện áp $\dot{V}_{out}$ sẽ tăng lên.

Việc đo giá trị điện áp $\dot{V}_{out}$ hoàn toàn có thể xác định được cảm biến có hay không đi vào khu vực có vết nứt. Tuy nhiên, việc quan sát trực tiếp điện áp hình Sin này là không trực quan. Vì vậy bộ khuếch đại khóa pha được sử dụng để chuyển từ sóng Sin sang biên độ của dao động đầy. Sơ đồ khối của bộ khuếch đại khóa pha được thể hiện ở Hình 4. Tín hiệu cần đo biên độ $\dot{V}_{out}$ từ mạch khuếch đại được nhân với tín hiệu tham chiếu và tín hiệu tham chiếu sau khi dịch pha một góc 90° , từ đó đạt được hai giá trị đầu ra gọi là X và Y :

$$\begin{cases} X = V_{out} \cos(\theta) \\ Y = V_{out} \sin(\theta) \end{cases} \quad (7)$$

trong đó θ thể hiện sự khác biệt về góc pha giữa tín hiệu cần đo biên độ V_{out} và tín hiệu tham chiếu từ máy phát sóng Sin.



Hình 4. Sơ đồ khối bộ khuếch đại khóa pha.

Giá trị biên độ R được tính toán từ X và Y như sau:

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (8)$$

Bằng cách đo giá trị R vết nứt có thể được phát hiện.

Bảng 1. Kích thước vết nứt trên mẫu thử nghiệm.

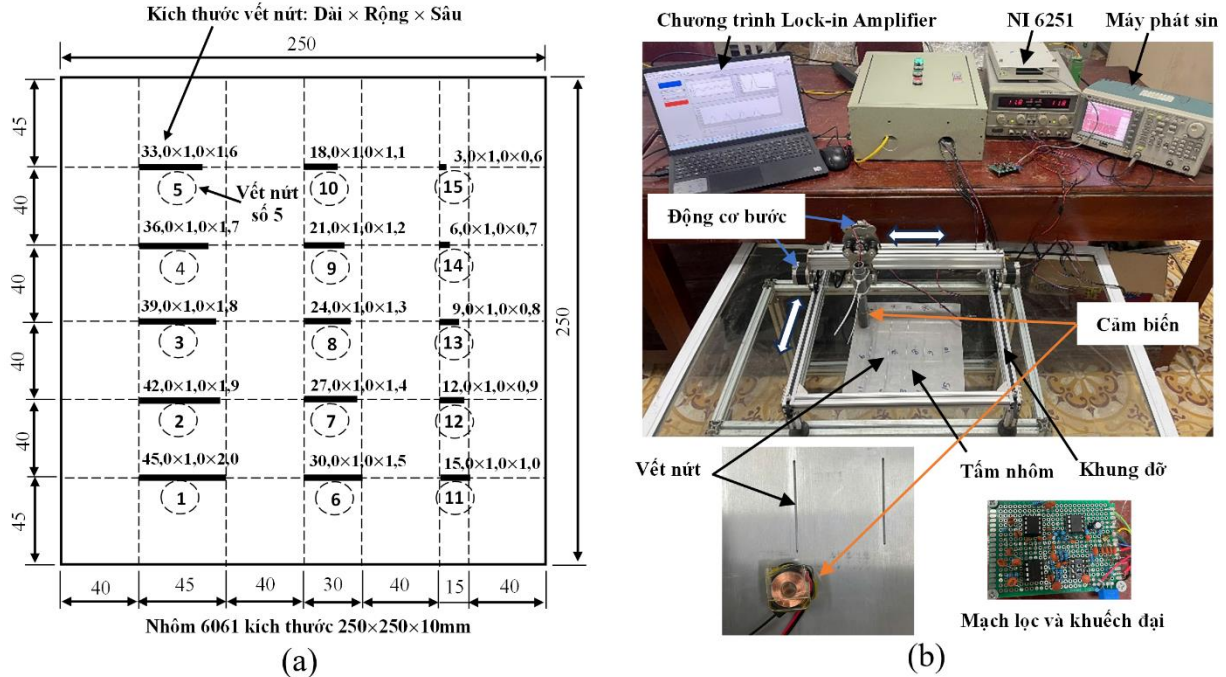
Vết nứt số	Kích thước Dài × Rộng × Sâu (mm)	Vết nứt số	Kích thước Dài × Rộng × Sâu (mm)	Vết nứt số	Kích thước Dài × Rộng × Sâu (mm)
1	45,0×1,0×2,0	6	30,0×1,0×1,5	11	15,0×1,0×1,0
2	42,0×1,0×1,9	7	27,0×1,0×1,4	12	12,0×1,0×0,9
3	39,0×1,0×1,8	8	24,0×1,0×1,3	13	9,0×1,0×0,8
4	36,0×1,0×1,7	9	21,0×1,0×1,2	14	6,0×1,0×0,7
5	33,0×1,0×1,6	10	18,0×1,0×1,1	15	3,0×1,0×0,6

Bảng 2. Thông số thực nghiệm.

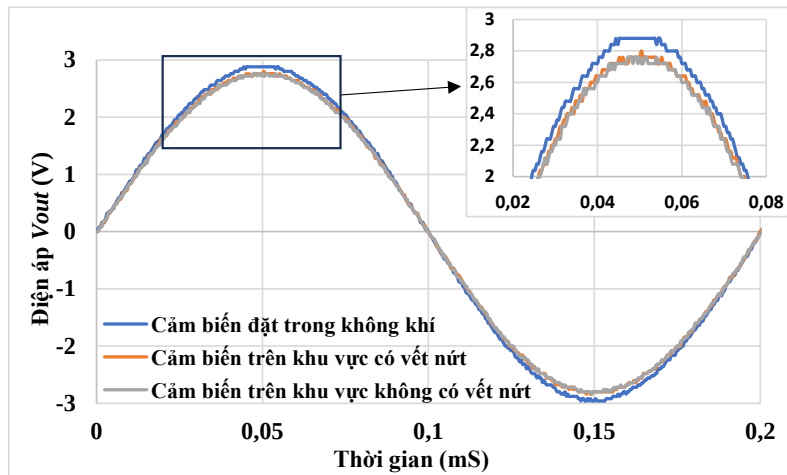
TT	Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị	Đơn vị
1	r_1	Bán kính trong của cuộn dây cảm biến	2,5	mm
2	r_2	Bán kính ngoài của cuộn dây cảm biến	6,0	mm
3	h	Chiều dày của cuộn dây cảm biến	12,0	mm
4	l	Khoảng cách giữa cảm biến và tấm nhôm	1,0	mm
5	R_o	Điện trở của cuộn dây cảm biến	670	Ω
6	L_o	Hệ số tự cảm của cuộn dây cảm biến đặt trong không khí	9,5	mH
7	R_f	Điện trở phân áp cho cuộn dây cảm biến	1500	Ω
8	C	Điện dung của tụ điện mắc nối tiếp với cuộn dây cảm biến	400	nF
9	g	Độ lợi của mạch khuếch đại tín hiệu	2	-
10	f_c	Tần số cắt của mạch lọc thông thấp	7	kHz

3. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

Quá trình thử nghiệm, đánh giá khả năng phát hiện vết nứt của hệ thống được thực hiện trên tấm nhôm có các vết nứt trên bề mặt như thể hiện ở Hình 5a. Tấm nhôm bao gồm 15 vết nứt hình hộp chữ nhật có bề rộng 1 mm, chiều dài và chiều sâu giảm dần như thể hiện ở Bảng 1. Hình 5b trình bày hệ thống thực nghiệm gồm: Cuộn dây cảm biến; khung máy CNC; máy phát sóng kích thích hình Sin; bộ thu thập dữ liệu và kết nối với máy tính NI6251; mạch lọc và khuếch đại; máy tính; và nguồn nuôi. Cảm biến được gắn trên một khung máy CNC, cho phép di chuyển dọc hoặc cắt ngang vết nứt thông qua các động cơ bước. Trên máy tính sử dụng phần mềm Labview để lập trình bộ khuếch đại khóa pha và hiển thị dữ liệu. Khả năng phát hiện của hệ thống được thử nghiệm trong 4 trường hợp: Điện áp đầu ra khi cảm biến đặt ở các khu vực khác nhau; các vết nứt có kích thước khác nhau; các điện áp kích thích khác nhau; và các tần số kích thích khác nhau. Thông số cho quá trình thực nghiệm được thể hiện trong Bảng 2.



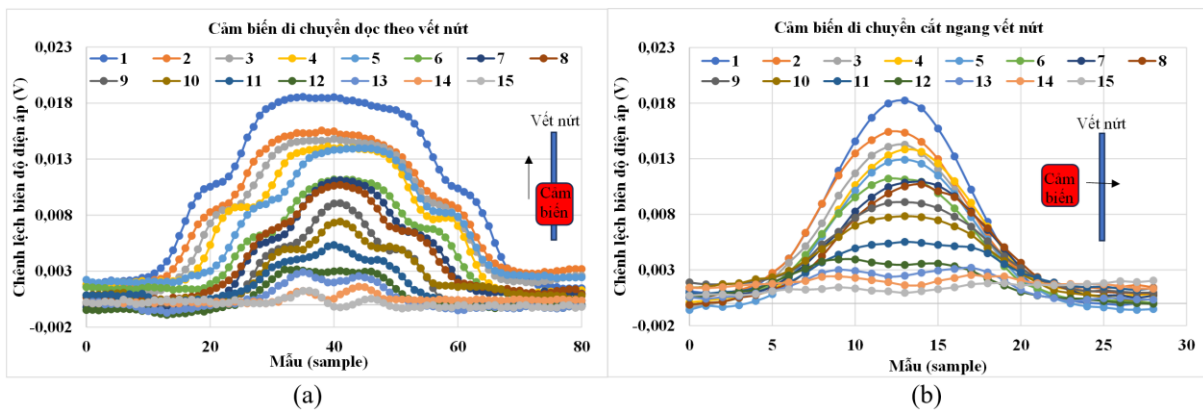
Hình 5. Thông số tấm nhôm với vết nứt (a) và hệ thống thực nghiệm (b).



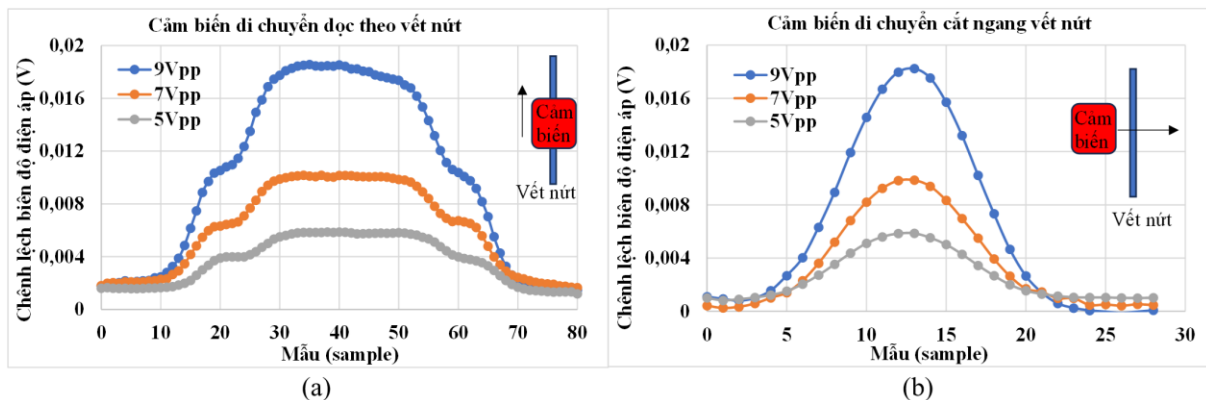
Hình 6. So sánh điện áp V_{out} khi đầu cảm biến đặt ở các khu vực khác nhau.

Khảo sát điện áp đầu ra khi cảm biến được đặt ở các khu vực khác nhau: Với mục tiêu đánh giá khả năng hoạt động, quá trình thực nghiệm được triển khai để khảo sát điện áp đầu ra khi cảm biến đặt ở các khu vực khác nhau. Điện áp đầu ra từ cảm biến được thu thập thông qua một máy hiện sóng khi hệ thống được kích thích với điện áp 9 Vpp (9 V đỉnh - đỉnh) và 5 kHz. Hình 6 trình bày dạng sóng điện áp đầu ra V_{out} khi cảm biến được đặt ở trong không khí, ở khu vực tấm nhôm không có vết nứt và ở khu vực tấm nhôm có vết nứt. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng, điện áp ra của cảm biến có giá trị lớn nhất khi được đặt trong không khí. Giá trị này giảm khi cảm biến trên khu vực có vết nứt và đạt giá trị nhỏ nhất ở khu vực không có vết nứt. Hiện tượng này là do độ từ thẩm của tấm nhôm nhỏ hơn so với không khí và dòng điện xoáy giảm nếu tấm nhôm có vết nứt. Từ kết quả thực nghiệm có thể kết luận rằng hệ thống có khả năng phát hiện vết nứt thông qua đo giá trị điện áp trên cuộn dây.

Khảo sát khả năng phát hiện với các vết nứt có kích thước khác nhau: Quá trình thực nghiệm được thực hiện với các điều kiện như sau: Điện áp kích thích 9 Vpp, tần số 5 kHz, các vết nứt có kích thước khác nhau (từ vết nứt lớn nhất số 1 đến nhỏ nhất số 15 trong Bảng 1), cảm biến di chuyển dọc hoặc cắt ngang vết nứt. Sự chênh lệch biên độ điện áp trong trường hợp không có và có vết nứt khi cảm biến di chuyển dọc hoặc cắt ngang vết nứt được thể hiện lần lượt trong Hình 7a và 7b. Trong đó, trục tung thể hiện sự chênh lệch điện áp; trục hoành (mẫu/sample) thể hiện các thời điểm thu thập dữ liệu khi cảm biến di chuyển (tỷ lệ với vị trí của cảm biến trên tấm nhôm). Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng, giá trị chênh lệch biên độ điện áp này tỷ lệ thuận với kích thước vết nứt. Vết nứt càng lớn sự chênh lệch điện áp càng nhiều và ngược lại. Dạng của đồ thị cũng thay đổi khi cảm biến di chuyển dọc hay cắt ngang vết nứt do sự khác nhau tương đối giữa vị trí cảm biến và vết nứt. Tuy nhiên, với cùng một vết nứt, giá trị cực đại sẽ không đổi, tại vị trí cảm biến nằm ở chính giữa vết nứt. Kết quả cũng chỉ ra rằng hệ thống có khả năng phát hiện vết nứt nhỏ nhất với kích thước dài $3,0 \times$ rộng $1,0 \times$ sâu $0,6$ mm (vết nứt số 15).



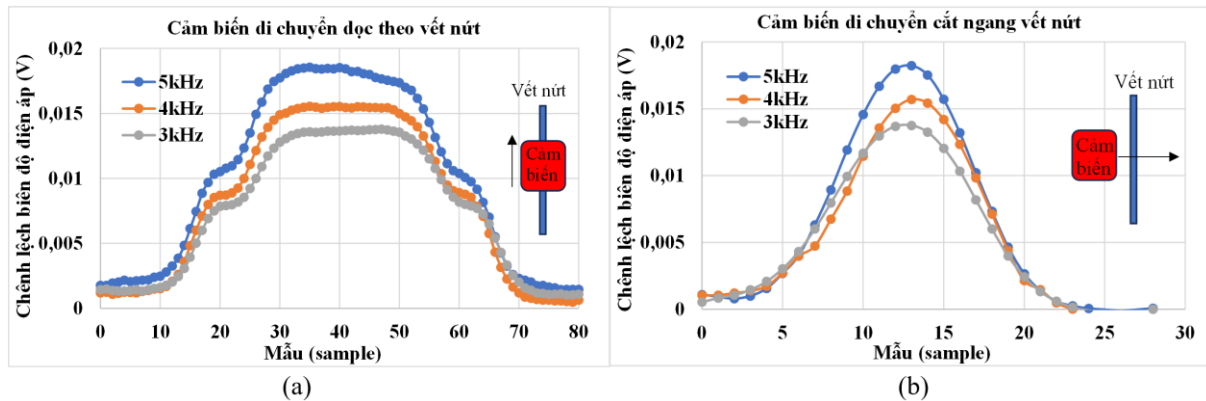
Hình 7. Khảo sát khả năng phát hiện với các vết nứt có kích thước khác nhau khi cảm biến di chuyển dọc theo vết nứt (a) và khi cảm biến di chuyển cắt ngang vết nứt (b).



Hình 8. So sánh sự chênh lệch biên độ điện áp ΔV_{out} khi kích thích với các điện áp khác nhau khi cảm biến di chuyển dọc theo vết nứt (a) và khi cảm biến di chuyển cắt ngang vết nứt (b).

Khảo sát khả năng phát hiện khi cảm biến được kích thích với các điện áp khác nhau: Sự thay đổi của biên độ điện áp ra từ cảm biến với các điện áp kích thích khác nhau được khảo sát trên vết nứt số 1 ($45,0 \times 1,0 \times 2,0$ mm) với tần số kích thích 5 kHz. Hình 8a trình bày giá trị chênh lệch biên độ điện áp khi cảm biến di chuyển dọc theo vết nứt và được kích thích với các mức điện áp 9, 7 và 5 Vpp. Có thể thấy rằng, giá trị đo được giảm đi đáng kể nếu điện áp kích thích giảm. Dữ liệu với cùng điều kiện thực nghiệm khi cảm biến di chuyển cắt ngang vết nứt

được thể hiện ở Hình 8b.



Hình 9. So sánh sự chênh lệch biên độ điện áp ΔV_{out} khi kích thích với các tần số khác nhau khi cảm biến di chuyển dọc theo vết nứt (a) và khi cảm biến di chuyển cắt ngang vết nứt (b).

Khảo sát khả năng phát hiện khi cảm biến được kích thích với các tần số khác nhau: Tần số của điện áp kích thích cũng là một thông số ảnh hưởng đáng kể đến khả năng phát hiện của hệ thống. Vì vậy, hệ thống được khảo sát với các tần số kích thích khác nhau trên vết nứt số 1 với cùng giá trị điện áp kích thích 9 Vpp. Chênh lệch biên độ điện áp khi cảm biến di chuyển dọc và di chuyển cắt ngang vết nứt số 1 ở các tần số kích thích khác nhau (từ 3 đến 5 kHz) được trình bày lần lượt trên Hình 9a và 9b. Tương tự như sự thay đổi điện áp, tần số kích thích cũng tỷ lệ thuận với sự chênh lệch của biên độ điện áp ra từ cảm biến. Có thể kết luận rằng, khả năng phát hiện vết nứt của hệ thống sẽ tốt hơn khi kích thích với tần số cao hơn.

Bảng 3. So sánh giữa các cấu hình cảm biến dòng điện xoáy trong phát hiện vết nứt bề mặt

Tiêu chí	Cảm biến 1 cuộn dây [14, 16]	Cảm biến 2 cuộn dây [7, 8]	Nghiên cứu này
Cấu trúc cảm biến	1 cuộn dây duy nhất	1 cuộn kích thích và 1 cuộn thu tín hiệu	1 cuộn dây duy nhất
Độ nhạy phát hiện	Chủ yếu dùng đo khe hở	Chiều rộng vết nứt < 0,1 mm	Chiều rộng vết nứt $\geq 1,0$ mm
Tính đơn giản phần cứng	Cao	Trung bình đến cao	Cao
Yêu cầu hiệu chuẩn	Thấp	Cao hơn do phải đồng bộ 2 kênh	Thấp
Khả năng tích hợp hệ thống	Cao (thiết kế nhỏ gọn)	Đôi khi hạn chế tích hợp cầm tay	Cao
Khả năng đo định hướng (góc nứt)	Hạn chế	Có thể xác định	Chưa thực hiện
Xử lý tín hiệu	Biên độ hoặc tần số	Biên độ, pha, tần số	Biên độ qua bộ khuếch đại khóa pha
Ứng dụng đặc trưng	Giám sát khe hở, mòn, dịch chuyển (tuabin)	Phát hiện vết nứt mịn trên thép, titan, lớp in 3D	Phát hiện vết nứt bề mặt nhôm, hướng tới nội địa hóa

Bảng 3 trình bày sự so sánh giữa ba cấu hình cảm biến dòng điện xoáy phổ biến, bao gồm cảm biến một cuộn dây, hai cuộn dây, và cấu hình được trình bày trong nghiên cứu này. Có thể thấy rằng, mặc dù các hệ thống hai cuộn dây gần đây đã đạt được độ nhạy cao/rất cao trong một số ứng dụng cụ thể, song phần lớn vẫn yêu cầu cấu trúc phần cứng phức tạp và hiệu chuẩn đồng bộ tín hiệu. Ngược lại, cấu hình một cuộn dây trong nghiên cứu này có độ nhạy thấp hơn nhưng

có thiết kế đơn giản, giảm yêu cầu phần cứng và tăng khả năng tích hợp. Đây là ưu điểm quan trọng trong hướng phát triển thiết bị kiểm tra không phá hủy gọn nhẹ, chi phí thấp và có khả năng nội địa hóa trong điều kiện ứng dụng thực tế tại Việt Nam.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này trình bày một phương pháp phát hiện vết nứt trên bề mặt kim loại dựa trên phương pháp dòng điện xoáy. Một hệ thống gồm cảm biến, mạch khuếch đại, chương trình đo lường và xử lý tín hiệu được thực hiện để đánh giá khả năng phát hiện vết nứt trên bề mặt nhôm. Giá trị đầu ra của cảm biến được khảo sát với các vết nứt, điện áp và tần số kích thích khác nhau. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng:

- ✓ Hệ thống thành công phát hiện vết nứt trên bề mặt nhôm với kích thước nhỏ nhất $3,0 \times 1,0 \times 0,6$ mm.
- ✓ Sự chênh lệch biên độ điện áp từ cảm biến khi tấm nhôm có và không có vết nứt tỷ lệ thuận với điện áp kích thích.
- ✓ Hệ thống phát hiện vết nứt tốt hơn ở tần số kích thích cao hơn.

Hệ thống trong nghiên cứu này giúp giảm thiểu yêu cầu phần cứng, đơn giản hóa thiết kế và tăng tính linh hoạt trong tích hợp. Điều này cho thấy tiềm năng của cấu hình cảm biến một cuộn dây trong thực tiễn, đặc biệt trong phát triển các thiết bị kiểm tra không phá hủy nội địa hóa, gọn nhẹ và dễ ứng dụng. Tuy nhiên, kích thước của vết nứt vẫn chưa được ước lượng từ dữ liệu cảm biến. Khi đo lường thực nghiệm cảm biến cũng cần được giữ một khoảng cách không đổi với tấm nhôm. Tương lai, sự ảnh hưởng của khoảng cách giữa cảm biến đến tấm nhôm và thông số vết nứt cần được ước lượng từ dữ liệu cảm biến. Cuộn dây cảm biến cũng cần được tối ưu về hình dạng cũng như kích thước để có thể phát hiện các vết nứt có kích thước nhỏ hơn.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2025-DT-001.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J. Seo, S. Kwon, H. Jun, D. Lee, Fatigue crack growth behavior of surface crack in rails, *Procedia Engineering*, 2 (2010) 865–872. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.093>
- [2]. X. Gibert, V.M. Patel, R. Chellappa, Robust fastener detection for autonomous visual railway track inspection, in *IEEE winter conference on applications of computer vision IEEE*, 2015, IEEE, pp.694–701. <https://doi.org/10.1109/WACV.2015.98>
- [3]. A. Poudel, B. Lindeman, R. Wilson, Current practices of rail inspection using ultrasonic methods: A review, *Materials Evaluation*, 77 (2019) 870–883.
- [4]. S. Hongbin, R. Pradeep, E.J. Richard, Machine learning for ultrasonic nondestructive examination of welding defects: A systematic review, *Ultrasonics*, 127 (2023) 106854–106866. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2022.106854>
- [5]. Y. Jia, K. Liang, P. Wang, K. Ji, P. Xu, Enhancement method of magnetic flux leakage signals for rail track surface defect detection, *IET Science, Measurement & Technology*, 14 (2020) 711–717. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5651>
- [6]. A.G. Antipov, A.A. Markov, Detectability of Rail Defects by Magnetic Flux Leakage Method, *Russ J Nondestruct Test*, 55 (2019) 277–285. <https://doi.org/10.1134/S1061830919040028>

- [7]. E.H. Farag, E. Toyserkani, M.B. Khamesee, Non-Destructive Testing Using Eddy Current Sensors for Defect Detection in Additively Manufactured Titanium and Stainless-Steel Parts, *Sensors*, 22 (2022) 5440–5457. <https://doi.org/10.3390/s22145440>
- [8]. L. Han, Y. Jiang, M. Yuan, Design and Study of Pulsed Eddy Current Sensor for Detecting Surface Defects in Small-Diameter Bars, *Sensors*, 24 (2024) 8063–8084. <https://doi.org/10.3390/s24248063>
- [9]. B. Marchand, J.M. Decitre, O. Casula, Recent developments of multi-elements eddy current probes, in *Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing*, Shanghai, China, 2008, pp.25–28.
- [10]. R.J. Ditchburn, S.K. Burke, M. Posada, Eddy-Current Nondestructive Inspection with Thin Spiral Coils: Long Cracks in Steel, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 22 (2003) 63–77. <https://doi.org/10.1023/A:1026340510696>
- [11]. M. Lu, X. Meng, R. Huang, L. Chen, Z. Tang, J. Li, A. Peyton, W. Yin, Determination of Surface Crack Orientation Based on Thin-Skin Regime Using Triple-Coil Drive-Pickup Eddy-Current Sensor, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70 (2021) 1–9. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3044729>
- [12]. R.J. Ditchburn, S.K. Burke, Planar rectangular spiral coils in eddy-current non-destructive inspection, *NDT & E International*, 38 (2005) 690–700. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.04.001>
- [13]. M. Qiuping, Y.T. Gui, G. Bin, Z. Xiangyu, R. Gaige, L. Haoran, Lift-off suppression based on combination of bridge and transformer signal conditionings of eddy current testing, *NDT & E International*, 132 (2022) 102724–102748. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102724>
- [14]. S. Borovik, Y. Sekisov, Single-Coil Eddy Current Sensors and Their Application for Monitoring the Dangerous States of Gas-Turbine Engines, *Sensors*, 20 (2020) 2107–2124. <https://doi.org/10.3390/s20072107>
- [15]. S. Borovik, M. Kuteynikova, Y. Sekisov, Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors, *Sensors*, 23 (2023) 351–376. <https://doi.org/10.3390/s23010351>
- [16]. Z. Xu, Y. Feng, Y. Liu, F. Shi, Y. Ge, H. Liu, W. Cao, H. Zhou, S. Geng, W. Lin, Single-Ended Eddy Current Micro-Displacement Sensor with High Precision Based on Temperature Compensation, *Micromachines*, 15 (2024) 366–382. <https://doi.org/10.3390/mi15030366>
- [17]. L.M. Huy, P.H. Phuong, L.Q Trung, H.S Phuong, L.D Minh, P.Q Vuong, L.V Su, Enhancing corrosion detection in pulsed eddy current testing systems through autoencoder-based unsupervised learning, *Measurement*, 229 (2024) 113146–113161. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103175>
- [18]. L.M. Huy, J.H. Lee, Y.H. Hwang, Development of differential Hall sensors for pulsed eddy current testing, *Sensors and Actuators A: Physical*, 365 (2024) 114777–114799. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.114777>