

NGHIÊN CỨU PHÁT HIỆN VẾT NỨT BỀ MẶT TRÊN THÉP S45C SỬ DỤNG SÓNG RAYLEIGH

INVESTIGATION OF SURFACE CRACK DETECTION IN S45C STEEL USING RAYLEIGH WAVES

Lương Thế Thắng*, Ngô Sỹ Đồng

Khoa Cơ khí – Ô tô và Xây dựng, Trường Đại học Điện lực

*Email: lt91thang@gmail.com

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, mô hình mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được xây dựng để phân tích sự lan truyền của sóng Rayleigh và tương tác của chúng với các vết nứt bề mặt trên thép S45C. Với việc sử dụng xung Rayleigh băng rộng tần số 590 kHz, nhóm tác giả đã tính toán đặc tính tán xạ qua các rãnh có độ sâu từ 0,5 mm đến 20 mm. Kết quả cho thấy sự gia tăng mạnh biên độ vận tốc hạt thành phần trong mặt phẳng (in-plane) tại khu vực gần khuyết tật, cao hơn so với thành phần ngoài mặt phẳng (out-of-plane). Hiện tượng này được giải thích do sự chuyển đổi chế độ sóng tạo ra các sóng dọc lướt bề mặt. Ngoài ra, việc quan sát các xung Rayleigh đến muộn từ sự phản xạ nội tại trong rãnh cho phép xác định chính xác độ sâu vết nứt. Nghiên cứu cung cấp cơ sở quan trọng để tối ưu hóa kỹ thuật kiểm tra không phá hủy (NDT) trên vật liệu thép kết cấu.

Từ khóa: Sóng Rayleigh; Thép S45C; FEM; Kiểm tra không phá hủy (NDT).

ABSTRACT

In this study, a finite element method (FEM) numerical simulation model was constructed to analyze the propagation of Rayleigh waves and their interaction with surface cracks on S45C steel. By employing a broadband Rayleigh pulse with a central frequency of 590 kHz, the scattering characteristics were calculated for slots with depths ranging from 0.5 mm to 20 mm. The results show a significant increase in the amplitude of the in-plane particle velocity component in the region near the defect, which is greater than that of the out-of-plane component. This phenomenon is explained by mode conversion that generates surface-skimming longitudinal waves. In addition, the observation of delayed Rayleigh pulses resulting from internal reflections within the slot enables accurate determination of crack depth. The study provides an important basis for optimizing non-destructive testing (NDT) techniques for structural steel materials.

Keywords: Rayleigh waves; S45C steel; FEM; Non-destructive testing (NDT).



1. TỔNG QUAN

Thép S45C được sử dụng rộng rãi trong chế tạo các chi tiết cơ khí chịu tải trọng cao như trục khuỷu, bánh răng và các bộ phận truyền động. Trong quá trình làm việc, các vết nứt bề mặt có thể hình thành do ứng suất chu kỳ và môi trường khắc nghiệt, làm giảm độ bền mỏi và tiềm ẩn nguy cơ hư hỏng nghiêm trọng nếu không được phát hiện kịp thời [1].

Phương pháp kiểm tra không phá hủy bằng siêu âm sử dụng sóng Rayleigh có khả năng phát hiện hiệu quả các khuyết tật bề mặt nhờ năng lượng sóng tập trung gần bề mặt vật liệu [2]. Tuy nhiên, việc xác định chính xác độ sâu vết nứt vẫn gặp khó khăn do hiện tượng phản xạ và nhiễu xạ phức tạp tại vị trí khuyết tật.

Trong nghiên cứu này, mô hình mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được xây dựng để phân tích sự lan truyền của sóng Rayleigh và tương tác của chúng với các vết nứt bề mặt trên thép S45C có độ sâu từ 0,5 mm đến 20 mm [3]. Kết quả nghiên cứu góp phần hỗ trợ tối ưu hóa các hệ thống kiểm tra siêu âm trong đánh giá tình trạng và tuổi thọ của các chi tiết cơ khí.

2. MÔ HÌNH VẬT LIỆU VÀ HÌNH HỌC

Trong mô hình này, thép S45C được giả thiết là vật liệu đàn hồi tuyến tính, đồng nhất và đẳng hướng. Quan hệ ứng suất – biến dạng được mô tả bởi định luật Hooke tổng quát:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Trong đó: σ_{ij} và ε_{ij} lần lượt là các tensor ứng suất và biến dạng, δ_{ij} là hàm Kronecker. Các hằng số Lamé (λ , μ) được xác định thông qua mô-đun đàn hồi E và hệ số Poisson ν [4]:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2)$$

Với các thông số đặc trưng của thép S45C bao gồm $E = 210$ GPa, $\nu = 0,29$ và khối lượng riêng $\rho = 7850$ kg/m³.

Sự lan truyền sóng trong môi trường rắn được mô tả bởi phương trình Navier:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (3)$$

Từ phương trình (3), ta xác định được vận tốc của các loại sóng cơ bản trong thép S45C:

Vận tốc sóng dọc (c_L):

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \approx 5890 \text{ m/s} \quad (4)$$

Vận tốc sóng ngang (c_S):

$$c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \approx 3220 \text{ m/s} \quad (5)$$

Vận tốc sóng bề mặt Rayleigh là nghiệm dương của phương trình đặc trưng bậc ba [2]:

$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8(3-2\nu)\eta^2 - 16(1-\nu) = 0 \quad (6)$$

với $\eta = c_R/c_S$ và $\beta = (c_S/c_L)^2$.

Sử dụng công thức xấp xỉ của Viktorov:

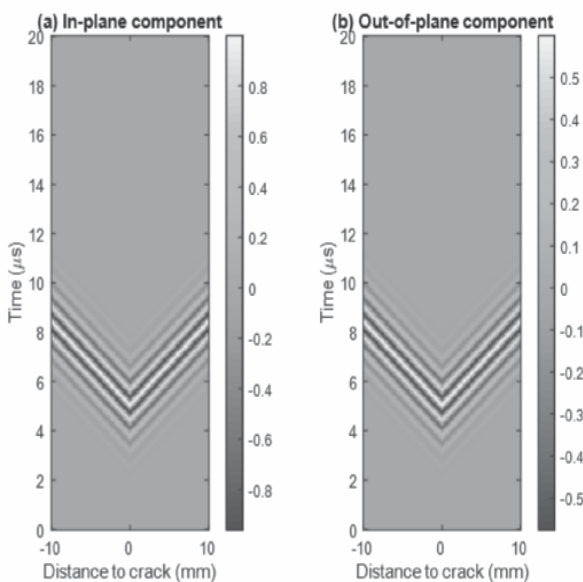
$$c_R \approx c_S \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \approx 0,925 c_S \approx 2980 \text{ m/s} \quad (7)$$

Lực kích thích được áp dụng dưới dạng hàm thời gian là đạo hàm bậc hai của cửa sổ Blackman-Harris [5], với phổ tần số phân bố dạng Gaussian tập trung tại tần số trung tâm 500 kHz. Do gói phần mềm phần tử hữu hạn (FEM) chủ yếu tính toán vận tốc hạt, tín hiệu vận tốc hạt của sóng Rayleigh thu được (sau khi

lấy đạo hàm theo thời gian của độ dịch chuyển) có tần số trung tâm dịch chuyển lên mức 590 kHz với băng thông 520 kHz.

Tại tần số 590 kHz, bước sóng Rayleigh (λ_R) trong thép S45C tương ứng với khoảng 5.05 mm. Lực kích thích có độ rộng 1 mm, tác động theo phương pháp tuyến với bề mặt mẫu. Các vết nứt được mô phỏng với độ sâu thay đổi từ 0.5 mm đến 12 mm (bước nhảy 0.5 mm) và từ 13 mm đến 20 mm (bước nhảy 1 mm). Khoảng cách từ nguồn lực đến vết nứt được cố định tại 180 mm ($\approx 35.6\lambda_R$) đảm bảo sóng Rayleigh tới nằm trong vùng trường xa (far-field) để các biến đổi quan sát được chỉ do tương tác trực tiếp với vết nứt.

Lưới phần tử hữu hạn được thiết lập với mật độ xấp xỉ 30 phần tử trên một bước sóng Rayleigh để đảm bảo độ hội tụ. Bề rộng vết nứt tại bề mặt được duy trì ở mức $1/6$ mm ($\approx 1/30\lambda_R$) và thu hẹp dần về phía đầu vết nứt (point-like tip), mô phỏng chính xác đặc tính hình học của vết nứt thực tế trong vật liệu thép [6].



Hình 1. Mô phỏng quá trình lan truyền và tán xạ của sóng Rayleigh tại vết nứt bề mặt trên thép S45C

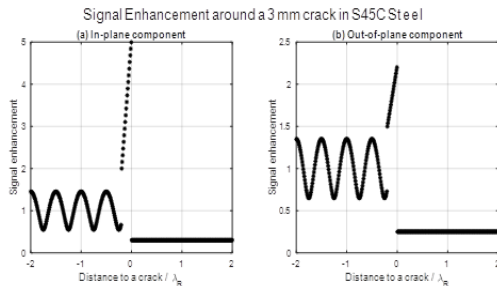
Kết quả phân bố thời gian - không gian của các thành phần vận tốc hạt được thể hiện qua Hình 1. Từ kết quả mô phỏng, có thể quan sát rõ ràng quá trình tương tác giữa sóng Rayleigh tới (R_i) và thực thể hình học của vết nứt tại vị trí $x = 0$ mm. Tại thời điểm $t \approx 5.5 \mu s$, xung sóng Rayleigh va chạm với miệng vết nứt, dẫn đến sự hình thành của sóng phản xạ (R_r) lan truyền ngược về phía nguồn và sóng truyền qua (R_t) tiếp tục di chuyển sang phía đối diện. Do mật độ lưới được thiết lập đủ mịn, các vận tốc trong cả hai thành phần u_x và u_z đều hiển thị độ phân giải cao, cho phép xác định chính xác độ dốc của các đường tín hiệu, tương ứng với vận tốc pha của sóng Rayleigh trong thép S45C. Sự sụt giảm biên độ của sóng truyền qua R_t so với sóng tới R_i là minh chứng cho việc một phần năng lượng đã bị tán xạ và chuyển đổi chế độ sóng (mode conversion) tại đỉnh vết nứt, tạo tiền đề cho việc phân tích độ sâu vết nứt dựa trên các tín hiệu nhiễu xạ này.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

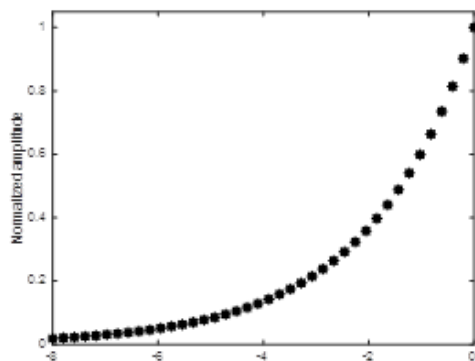
Trong không gian hai chiều (2D), sóng Rayleigh về lý thuyết không suy giảm biên độ theo khoảng cách do hiệu ứng hình học. Khi tương tác với một vết nứt bề mặt trong thép S45C có độ sâu $d > \lambda_R$, biên độ sóng phản xạ thường khoảng 0.4 lần biên độ sóng tới. Theo nguyên lý chồng chập tuyến tính, biên độ cực đại của trường giao thoa trước vết nứt dự kiến không vượt quá khoảng 1.4.

Tuy nhiên, kết quả mô phỏng trong Hình 2 cho thấy một sự khuếch đại biên độ rất lớn ngay tại mép vết nứt ($x = 0$). Hệ số khuếch đại đạt khoảng 4.5 đối với vận tốc in-plane và 2.2 đối với vận tốc out-of-plane, vượt xa dự đoán của lý thuyết chồng chập đơn thuần. Điều này cho thấy tồn tại một cơ chế khuếch đại mạnh trong vùng cận trường. Hiện tượng này được giải thích bởi cơ chế chuyển đổi chế

độ sóng (mode conversion) và giao thoa tăng cường (constructive interference) với các sóng thân phát sinh tại các góc gián đoạn hình học của vết nứt, như được minh họa cụ thể trong Hình 3 [7].



Hình 2. Sự tăng cường tín hiệu của các thành phần vận tốc hạt (a) trong mặt phẳng và (b) ngoài mặt phẳng xung quanh vết nứt sâu 3 mm trên thép S45C



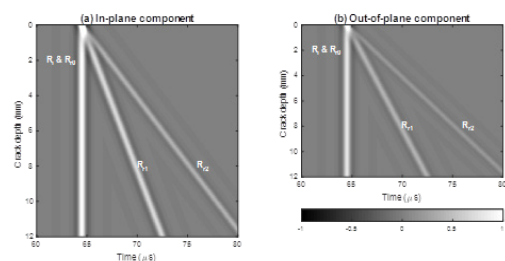
Hình 3. Biên độ chuẩn hóa thành phần vận tốc hạt trong mặt phẳng của sóng dọc chuyển đổi chế độ tại miệng vết nứt (độ sâu 3 mm) trên bề mặt mẫu

Hiện tượng khuếch đại này chỉ xuất hiện trong vùng rất gần mép vết nứt, trong khi phía sau vết nứt ($x > 0$) biên độ giảm mạnh ($< 0,5$), cho thấy phần lớn năng lượng đã bị phản xạ hoặc chuyển đổi. Kết quả này chứng minh sự tập trung năng lượng cận trường và chuyển đổi chế độ sóng tại các góc gián đoạn, đồng thời cho thấy tỷ lệ biên độ in-plane/out-of-plane là một chỉ số nhạy để đặc trưng hóa vết nứt bề mặt.

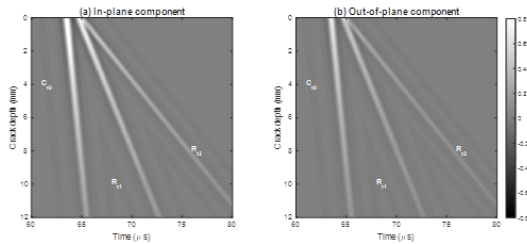
Trong kỹ thuật NDT sử dụng sóng Rayleigh trên thép S45C, mối quan hệ giữa hệ số phản xạ và độ sâu vết nứt (d) diễn biến rất phức tạp. Khi d nhỏ hơn nửa bước sóng ($d < 0,5\lambda_R$), hệ số phản xạ ban đầu tăng theo độ sâu nhưng sau đó giảm dần, đạt giá trị cực tiểu khoảng 0,23. Khi $d \approx 0,8\lambda_R$ đối với xung băng rộng. Khi độ sâu vượt quá ngưỡng $0,8\lambda_R$, hệ số phản xạ bắt đầu dao động (oscillation). Sự khác biệt về giá trị dao động này giữa xung băng hẹp và băng rộng khiến việc định lượng trực tiếp độ sâu khuyết tật chỉ dựa vào biên độ phản xạ trở nên thiếu chính xác [8], thậm chí bất khả thi.

Năng lượng của sóng Rayleigh phân bố theo chiều sâu gần bề mặt của thép S45C, trong đó các thành phần tần số thấp có khả năng thâm nhập sâu hơn vào lớp vật liệu. Vì vậy, đặc tính tần số của sóng phản xạ và truyền qua có liên hệ trực tiếp với độ sâu của khuyết tật.

Tuy nhiên, phân tích phổ tần số gặp hai hạn chế chính. Thứ nhất, tín hiệu rất nhạy với hiệu ứng lift-off, đặc biệt khi sử dụng đầu dò EMAT, do khoảng cách giữa cuộn dây và bề mặt thép ảnh hưởng mạnh đến biên độ thu được. Thứ hai, sự chồng lấn giữa các xung Rayleigh phản xạ bậc cao (reverberations) làm cho việc tách và phân tích phổ tần số trở nên phức tạp. Để minh họa, các thành phần vận tốc hạt được phân tích tại vùng lân cận vết nứt, trong khoảng độ sâu từ 0 đến 12 mm như trên Hình 4 và Hình 5.



Hình 4. Phân tích thành phần vận tốc hạt (a) trong mặt phẳng và (b) ngoài mặt phẳng của sóng Rayleigh phản xạ theo độ sâu vết nứt từ 0 đến 12 mm



Hình 5. Bản đồ B-scan các thành phần vận tốc hạt của tín hiệu truyền qua thu được tại vị trí 0,4 mm phía sau vết nứt bề mặt trên thép S45C

Bằng cách đo thời điểm đến (arrival times) của các xung phản xạ và xung truyền qua, độ sâu vết nứt có thể được xác định trực tiếp. Các kết quả dự đoán cho thấy sự phù hợp tốt với các phép đo thực nghiệm.

4. KẾT LUẬN

Cơ chế tăng cường tín hiệu trong vùng cận trường là sự kết hợp giữa hiện tượng giao thoa của sóng Rayleigh (tới và phản xạ) với các sóng dọc lướt bề mặt (surface skimming longitudinal waves) phát sinh tại miệng vết nứt. Trên vật liệu thép S45C, biên độ của sóng dọc này tỉ lệ nghịch với căn bậc hai khoảng cách tới vết nứt, tạo nên sự phân bố năng lượng phức tạp và phụ thuộc chặt chẽ vào vị trí đặt đầu dò.

Do hệ số phản xạ dao động phi tuyến theo độ sâu vết nứt (d), việc sử dụng trực tiếp biên độ phản xạ để định lượng kích thước khuyết tật là rất khó khăn. Tương tự, các đặc tính tần số cũng tỏ ra nhạy cảm với sai số khoảng cách (lift-off). Tuy nhiên, nghiên cứu này đã chứng minh rằng việc sử dụng thời gian truyền (arrival times) của các xung Rayleigh phản xạ và truyền qua là phương pháp tin cậy và hiệu quả nhất để tính toán chính xác độ sâu vết nứt trên các chi tiết thép S45C [9]. ♦

Ngày nhận bài: 12/3/2026

Ngày phản biện: 24/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O., “*Metal Fatigue in Engineering*”, 2nd Edition [M]. John Wiley & Sons. 2000.
- [2]. Viktorov, I. A., “*Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications*” [M]. Plenum Press. 1967.
- [3]. Rose, J. L., “*Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*” [M]. Cambridge University Press. 2014.
- [4]. Achenbach, J. D., “*Wave Propagation in Elastic Solids*” [M]. North-Holland. 1973.
- [5]. Harris, F. J., “On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform” [J]. *Proceedings of the IEEE*. 1978, 66(1):51-83.
- [6]. Zerwer, A., Cascante, G., & Hutchinson, J., “Parameter estimation in finite element simulations of Rayleigh waves” [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2003, 129(3):249-261.
- [7]. Gunawan, A., & Hirose, S., “Mode conversion of Rayleigh waves at a surface-breaking crack” [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2004, 115(3):1070-1081.
- [8]. Pecorari, C., “Scattering of Rayleigh waves by surface-breaking cracks: Numerical simulation” [J]. *NDT & E International*. 2001, 34(6):411-418.
- [9]. Hirao, M., & Ogi, H., “*EMATs for Science and Industry: Noncontacting Ultrasonic Measurements*” [M]. Springer. 2017.