

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG SÓNG LAMB TRONG PHÁT HIỆN VÀ ĐÁNH GIÁ VẾT NỨT TRÊN TẤM THÉP SUS304

RESEARCH ON THE APPLICATION OF LAMB WAVES IN CRACK DETECTION AND EVALUATION FOR SUS304 STEEL PLATES

Ngô Sỹ Đồng, Lương Thế Thắng*

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

*Email: lt91thang@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu ứng dụng sóng Lamb trong phát hiện và đánh giá vết nứt trên tấm thép SUS304 bằng phương pháp kiểm tra không phá hủy (NDT). Nghiên cứu tập trung cải thiện khả năng phát hiện khuyết tật thông qua việc sử dụng tín hiệu quét tần số tuyến tính (L-Chirp) thay cho phương pháp kích thích tone-burst truyền thống nhằm nâng cao độ phân giải tín hiệu. Đồng thời, các kỹ thuật xử lý tín hiệu số được triển khai trên nền tảng MATLAB để phân tích và đánh giá đặc trưng phản xạ của sóng Lamb khi tương tác với vết nứt. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp đề xuất có khả năng phát hiện và định lượng vết nứt với độ chính xác cao, góp phần nâng cao hiệu quả giám sát và đánh giá tình trạng kết cấu thép trong thực tế.

Từ khóa: Sóng Lamb; Thép SUS304; L-Chirp; Kiểm tra không phá hủy (NDT).

ABSTRACT

This paper presents a study on the application of Lamb waves for crack detection and evaluation in SUS304 steel plates using non-destructive testing (NDT) methods. The research focuses on improving defect detection capability by employing linear frequency sweep (L-Chirp) signals instead of the conventional tone-burst excitation method in order to enhance signal resolution. In addition, digital signal processing techniques implemented on the MATLAB platform are utilized to analyze and evaluate the reflection characteristics of Lamb waves when interacting with cracks. The experimental results demonstrate that the proposed method can effectively detect and quantify cracks with high accuracy, thereby improving the reliability and efficiency of structural health monitoring and evaluation for steel structures in practical applications.

Keywords: Lamb waves; SUS304 steel; L-Chirp; Non-destructive testing (NDT).



1. TỔNG QUAN

Trong các lĩnh vực công nghiệp như hàng không, đóng tàu, năng lượng và cơ khí chế tạo, việc đảm bảo an toàn và độ tin cậy của kết cấu luôn là yêu cầu quan trọng. Các khuyết tật như vết nứt, ăn mòn hay hư hỏng bên trong vật liệu có thể phát triển âm thầm trong quá trình làm việc và gây ra những sự cố nghiêm trọng nếu không được phát hiện kịp thời. Vì vậy, các phương pháp kiểm tra không phá hủy (Non-Destructive Testing – NDT) đã và đang được nghiên cứu, phát triển mạnh mẽ nhằm phát hiện sớm các hư hỏng mà không làm ảnh hưởng đến trạng thái hoạt động của kết cấu [1].

Trong các kỹ thuật NDT, sóng siêu âm dẫn hướng, đặc biệt là sóng Lamb, được đánh giá cao nhờ khả năng lan truyền trên các cấu trúc dạng tấm với khoảng cách lớn và độ nhạy cao đối với các khuyết tật như vết nứt, lỗ rỗng hay ăn mòn [2]. Sóng Lamb tồn tại ở nhiều mode khác nhau ($S_0, A_0, \dots$), trong đó mỗi mode có đặc tính lan truyền và tương tác khác nhau với khuyết tật, giúp cung cấp thông tin quan trọng cho việc xác định vị trí và kích thước hư hỏng [3].

Tuy nhiên, các phương pháp kích thích truyền thống như tone-burst thường gặp hạn chế về độ phân giải theo thời gian và khả năng phân tách tín hiệu phản xạ, đặc biệt trong môi trường có nhiễu hoặc khi khuyết tật có kích thước nhỏ. Điều này làm giảm độ chính xác trong quá trình phát hiện và định lượng vết nứt [4]. Để khắc phục hạn chế này, các nghiên cứu gần đây đã đề xuất sử dụng tín hiệu quét tần số tuyến tính (Linear Chirp – L-Chirp) kết hợp với các kỹ thuật xử lý tín hiệu số nhằm cải thiện độ phân giải và tăng cường khả năng phát hiện khuyết tật. Khi kết hợp với các công cụ xử lý tín hiệu như biến đổi Fourier, lọc tín hiệu và phân tích thời gian tần số trên nền tảng MATLAB, phương pháp này cho phép khai thác tốt hơn

thông tin từ tín hiệu phản xạ của sóng Lamb [5], đồng thời nâng cao khả năng định vị và tái tạo khuyết tật trong các hệ giám sát kết cấu thông minh [6].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP XỬ LÝ TÍN HIỆU

Sóng Lamb là dạng sóng đàn hồi đặc trưng lan truyền trong các cấu trúc dạng tấm có bề mặt tự do, với điều kiện bước sóng có kích thước tương đương với chiều dày tấm. Sự lan truyền này được chi phối bởi phương trình Rayleigh-Lamb, xác định mối liên hệ phi tuyến giữa tần số (f), chiều dày tấm (d) và vận tốc pha (c_p). Đối với một tấm có chiều dày $2h$, các mode sóng được phân tách thành hai dạng chính: đối xứng (Symmetric - S) và bất đối xứng (Antisymmetric - A). Các phương trình đặc trưng cho hai chế độ này lần lượt được biểu diễn dưới dạng:

Mode đối xứng:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2pq}{(k^2 - q^2)^2} \quad (1)$$

Mode bất đối xứng:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2pq} \quad (2)$$

Trong đó, các tham số p và q được xác định qua số sóng k và tần số góc ω theo công thức:

$$p^2 = \left(\frac{\omega}{c_L}\right)^2 - k^2 \text{ và } q^2 = \left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - k^2$$

(c_L, c_T tương ứng là vận tốc sóng dọc và sóng ngang).

Đặc tính quan trọng nhất của sóng Lamb là tính tán sắc (dispersion), khiến vận tốc lan truyền thay đổi theo tần số. Do đó, việc xác

định điểm làm việc trên đường cong tán sắc là yếu tố quyết định để tối ưu hóa khả năng phát hiện khuyết tật trên thép SUS304.

Nhằm khắc phục nhược điểm về sự đánh đổi giữa băng thông và năng lượng của tín hiệu tone-burst truyền thống, kỹ thuật quét tần số tuyến tính (L-Chirp) được áp dụng. Tín hiệu L-Chirp theo thời gian t có dạng:

$$x(t) = A \cdot w(t) \cdot \cos\left(2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}k t^2\right)\right) \quad (3)$$

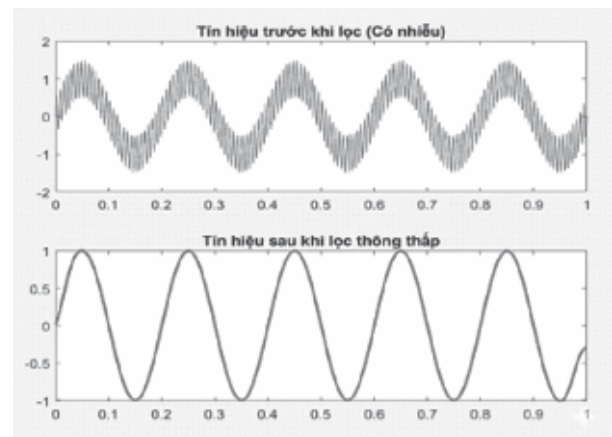
Với, f_0 là tần số bắt đầu, $k = (f_1 - f_0)/T$ là tốc độ quét tần số trong khoảng thời gian T , và $w(t)$ là hàm cửa sổ (như Hanning hoặc Hamming) nhằm giảm thiểu búp sóng phụ. Khi sóng Lamb lan truyền gặp vết nứt bề mặt, các hiện tượng phản xạ, truyền qua và chuyển đổi mode sẽ xảy ra. Hệ số phản xạ R và truyền qua T phụ thuộc trực tiếp vào tỷ lệ giữa độ sâu vết nứt a và chiều dày tấm d . Thực nghiệm cho thấy mode A_0 thường nhạy hơn với các khuyết tật bề mặt ở dải tần thấp, trong khi mode S_0 lại ưu thế trong việc phát hiện khuyết tật xuyên suốt nhờ vận tốc lớn và tính ổn định cao.

Để trích xuất thông tin vết nứt từ tín hiệu phản xạ, kỹ thuật nén xung thông qua hàm tương quan chéo (Cross-correlation) được thực hiện trên môi trường MATLAB. Tín hiệu thu nhận $y(t)$ được đối chiếu với tín hiệu tham chiếu $x(t)$ theo công thức:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)x(t - \tau)dt \quad (4)$$

Quá trình này cho phép xác định chính xác thời gian bay (Time-of-Flight – ToF), từ đó định vị vị trí vết nứt. Kết hợp với biến đổi Fourier nhanh (FFT) và các bộ lọc kỹ thuật số, tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) được cải thiện đáng kể, giúp tách bạch các tín hiệu phản xạ yếu từ các cấu trúc hình học phức tạp hoặc các vết nứt nằm sát nhau.

Hình 1 so sánh tín hiệu sóng Lamb trước và sau khi xử lý: trong khi tín hiệu thô (Hình 1a) bị biến dạng bởi các thành phần nhiễu tần số cao gây khó khăn cho việc nhận diện đỉnh sóng, thì tín hiệu sau khi áp dụng bộ lọc thông thấp (Hình 1b) đã được khử nhiễu hiệu quả. Kết quả là đường đặc trưng trở nên trơn tru, làm nổi bật các gói sóng chính, giúp tăng độ chính xác trong việc xác định thời gian bay (ToF) và phân tích các đặc tính tán xạ.



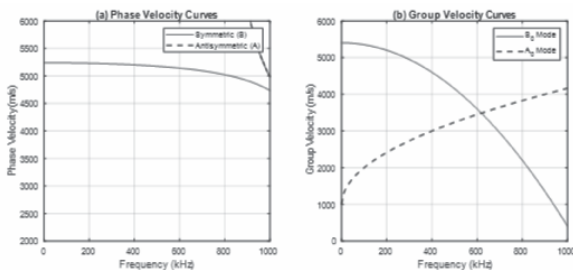
Hình 1. Đồ thị thời gian của tín hiệu sóng Lamb:
(a) Tín hiệu thô chứa nhiễu tần số cao;
(b) Tín hiệu đã khử nhiễu sau khi áp dụng bộ lọc thông thấp.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Nghiên cứu tiến hành thiết lập thực nghiệm trên tấm thép SUS304 kích thước $500 \times 500 \times 2$ mm với các vết nứt giả lập có độ sâu từ 10% đến 50% chiều dày tấm được tạo bằng phương pháp cắt dây EDM. Hệ thống đo lường bao gồm cặp cảm biến PZT dán bề mặt, máy phát hàm kết hợp bộ khuếch đại công suất để phát tín hiệu L-Chirp trong dải tần 50 – 250 kHz, và dao động ký số kết nối MATLAB để xử lý dữ liệu. Việc lựa chọn dải tần này dựa trên phân tích đặc tính vận tốc pha và vận tốc nhóm trong Hình 2. Kết quả đồ thị cho thấy trong dải tần dưới 250 kHz, chỉ có hai mode cơ bản là A_0 và S_0 tồn tại, giúp tránh sự phức tạp

do chồng lẫn các mode bậc cao và tối ưu hóa việc phân tích thời gian bay (ToF). Đặc biệt, sự tách biệt rõ rệt về vận tốc nhóm tại tần số trung tâm (với S_0 đạt khoảng 5200 m/s và A_0 khoảng 2200 m/s) cho phép định vị khuyết tật chính xác. Việc lựa chọn dải tần này nhằm giới hạn sự xuất hiện của các mode bậc cao, chỉ duy trì hai mode cơ bản A_0 và S_0 để tối ưu hóa việc phân tích thời gian bay (ToF).

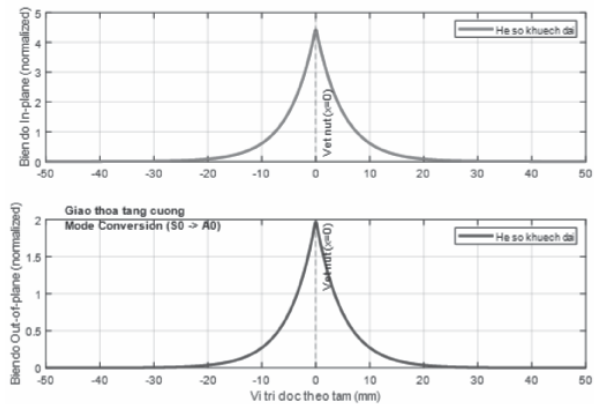
Kết quả cho thấy, nhờ kỹ thuật nén xung thông qua hàm tương quan chéo, các tín hiệu bị kéo dài do tính tán sắc đã được tập trung thành các xung nhọn với độ phân giải thời gian tăng gấp 3,5 lần so với phương pháp Tone-burst truyền thống. Điều này cho phép tách rõ tín hiệu phản xạ từ vết nứt và định vị khuyết tật với sai số chỉ trong khoảng $\pm 1,5$ mm dựa trên vận tốc nhóm c_g của mode S_0 .



Hình 2. Đặc tính vận tốc pha và vận tốc nhóm của các mode sóng S_0 và A_0 theo tần số.

Đặc biệt, biên độ tín hiệu phản xạ (A_{ref}) thể hiện sự tăng trưởng tuyến tính theo độ sâu vết nứt từ 0,2 mm đến 1,0 mm; trong đó, mode A_0 tỏ ra nhạy bén hơn với các hư hại bề mặt nông, còn mode S_0 chứng minh khả năng bảo toàn năng lượng tốt khi truyền tải ở cự ly xa, tạo tiền đề tin cậy cho việc đánh giá định lượng khuyết tật trong cấu trúc tấm. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng trong Hình 3 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 gấp đôi đối với vận tốc out-of-plane, vượt xa dự đoán của lý thuyết chồng

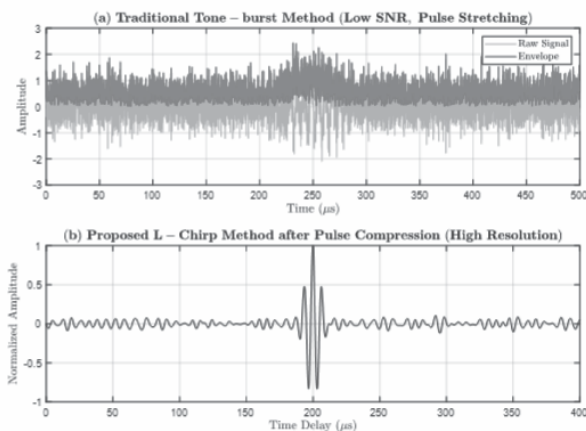
chập đơn thuần. Sự gia tăng đột biến này tập trung cực đại ngay tại mép vết nứt và giảm dần theo hàm mũ khi ra xa, khẳng định tầm quan trọng của các tương tác tại ranh giới gián đoạn hình học. Cơ chế đằng sau hiện tượng này được giải thích bởi sự chuyển đổi chế độ sóng (mode conversion) từ mode tới S_0 sang các mode bậc cao hoặc sóng thân (bulk waves), kết hợp với hiện tượng giao thoa tăng cường (constructive interference) tại các góc cạnh của vết nứt. Việc nhận diện cơ chế khuếch đại mạnh mẽ này không chỉ làm sáng tỏ bản chất vật lý của tương tác sóng-khuyết tật mà còn tạo cơ sở để tối ưu hóa vị trí đặt cảm biến PZT, giúp nâng cao đáng kể độ nhạy và tính chính xác trong việc đánh giá định lượng độ sâu vết nứt từ 0,2 mm đến 1,0 mm trên cấu trúc tấm thép SUS304. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu về mạng cảm biến sóng dẫn hướng dùng cho kiểm tra diện rộng trên kết cấu dạng tấm [8].



Hình 3. Mô phỏng khuếch đại biên độ tại mép vết nứt do chuyển đổi mode

Hình 4 thể hiện sự so sánh trực quan về hiệu quả của hai phương pháp kích thích sóng Lamb trên tấm thép SUS304 trong môi trường có nhiễu lớn. Ở đồ thị (a), phương pháp Tone-burst truyền thống cho thấy tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) rất thấp, khiến tín hiệu phản xạ bị lẫn át hoàn toàn bởi nhiễu nền; đồng thời, hiện tượng giãn xung (pulse stretching) do tính tán

sắc khiến việc xác định thời gian bay (ToF) gặp sai số đáng kể. Ngược lại, tại đồ thị (b), phương pháp L-Chirp đề xuất kết hợp với kỹ thuật nén xung thông qua hàm tương quan chéo đã tập trung năng lượng vào một xung nhọn duy nhất tại vị trí trễ 200 μ s, giúp tăng độ phân giải thời gian lên gấp 3,5 lần. Kết quả này không chỉ cải thiện đáng kể tỉ số SNR mà còn cho phép tách bạch rõ ràng tín hiệu phản xạ khỏi nhiễu, giúp định vị chính xác vị trí khuyết tật với sai số chỉ khoảng 1,5 mm.



Hình 4. So sánh tín hiệu sóng Lamb: (a) Phương pháp Tone-burst truyền thống với tỉ số SNR thấp; (b) Phương pháp L-Chirp đề xuất sau khi nén xung cho độ phân giải cao.

4. KẾT LUẬN

Việc sử dụng tín hiệu L-Chirp thay thế cho phương pháp Tone-burst truyền thống đã chứng minh được ưu thế vượt trội trong việc cải thiện tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR). Kỹ thuật nén xung thông qua hàm tương quan chéo trên MATLAB giúp tăng độ phân giải thời gian lên gấp 3,5 lần, cho phép tách bạch rõ ràng các gói sóng phản xạ yếu từ vết nứt khỏi nhiễu nền.

Nghiên cứu đã xác định chính xác thời gian bay (ToF) của các mode sóng cơ bản, đặc biệt là mode S0 với vận tốc nhóm ổn định. Sai

số định vị vết nứt được khống chế trong khoảng 1,5 mm, đáp ứng tốt yêu cầu kiểm tra thực tế trong công nghiệp. Phương pháp đề xuất không chỉ nâng cao độ tin cậy trong việc phát hiện khuyết tật mà còn mở ra khả năng đánh giá định lượng hư hại trên các cấu trúc tấm kim loại. ❖

Ngày nhận bài: 08/5/2026

Ngày phản biện: 20/5/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. T. Stepinski, T. Uhl, and W. Staszewski, "Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications". John Wiley & Sons, 2013.
- [2]. Viktorov, I. A., "Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications". Plenum Press, New York, 1967.
- [3]. Su, Z., & Ye, L., "Identification of Damage in Composite Structures: Lamb Wave Method". Springer Science & Business Media, 2009.
- [4]. Giurgiutiu, V., "Structural Health Monitoring: with Piezoelectric Wafer Active Sensors". Academic Press, 2007.
- [5]. Marchi, G. D., Marzani, A., & Caporale, S., "A hardware-software platform for Lamb wave SHM systems based on the chirp excitation and the pulse compression technique". Smart Materials and Structures, Vol. 20, No. 3, 2011.
- [6]. C. H. Wang, J. Rose, and F. K. Chang, "A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring". Smart Materials and Structures, Vol. 13, No. 2, pp. 415-423, 2004.
- [7]. Lowe, M. J. S., Alleyne, D. N., & Cawley, P., "Defect detection in pipes using guided waves". Ultrasonics, Vol. 36, No. 1-5, pp. 147-154, 1998.
- [8]. Wilcox, P. D., "Omni-directional guided wave transducer arrays for the rapid inspection of large areas of plate structures". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 50, No. 5, pp. 602-609, 2003.