

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG VÀ TỐI ƯU HÓA THÔNG SỐ HÀN LASER ĐẾN ĐỘ BỀN KÉO CỦA MỐI HÀN HỢP KIM NHÔM AA1050

STUDY ON THE INFLUENCE AND OPTIMIZATION OF LASER WELDING PARAMETERS ON THE TENSILE STRENGTH OF AA1050 ALUMINUM ALLOY WELDED JOINTS

Trần Quang Phước*, Đoàn Đình Khánh, Trần Thái Đức Duy

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: tqphuoc@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc khảo sát ảnh hưởng của các thông số hàn laser như công suất, vận tốc hàn, tần số và biên dạng quét chùm tia laser đến độ bền kéo của mối hàn hợp kim nhôm AA1050. Bằng cách sử dụng phương pháp Taguchi và thiết kế thực nghiệm bằng bảng trực giao, các thí nghiệm đã được tiến hành để thu thập dữ liệu về độ bền kéo của mối hàn dưới các điều kiện hàn khác nhau. Kết quả phân tích hồi quy cho thấy mối quan hệ giữa các thông số hàn và độ bền kéo, từ đó xác định được các thông số tối ưu nhằm đạt được độ bền kéo cao nhất. Nghiên cứu này cung cấp những hiểu biết quan trọng về quá trình hàn laser hợp kim nhôm AA1050 và đưa ra các khuyến nghị thực tiễn cho việc tối ưu hóa quy trình hàn trong sản xuất.

Từ khóa: Hàn laser; Hợp kim nhôm AA1050; Độ bền kéo; Tối ưu hóa; Taguchi.

ABSTRACT

This study investigates the influence of laser welding parameters as power, welding speed, laser beam scanning frequency and laser scanning path on the tensile strength of AA1050 aluminum alloy welds. Using the Taguchi method and the Orthogonal Arrays experimental design method, experiments were conducted to collect data on weld tensile strength under various welding conditions. Regression analysis results reveal the relationship between welding parameters and tensile strength, thereby identifying optimal parameters to achieve maximum tensile strength. This research provides important insights into the laser welding process of AA1050 aluminum alloy and offers practical recommendations for optimizing welding procedures in manufacturing.

Keywords: Laser welding; AA1050 aluminum alloy; Tensile strength; Optimization; Taguchi.

1. GIỚI THIỆU

Hàn laser hiện nay được xem là một trong những công nghệ hàn tiên tiến và được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực công nghiệp hiện đại. So với các phương pháp hàn truyền thống, hàn laser có nhiều ưu điểm nổi bật như mật độ năng lượng cao, vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ, độ chính xác cao và khả năng tự động hóa tốt. Nhờ những ưu điểm này, hàn laser đặc biệt phù hợp cho việc hàn các vật liệu kim loại mỏng và các hợp kim nhẹ trong nhiều ứng dụng công nghiệp hiện đại [1]. Hợp kim nhôm được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp như hàng không, ô tô và điện tử nhờ vào các đặc tính ưu việt như khối lượng riêng thấp, độ bền riêng cao, khả năng chống ăn mòn tốt và tính dẫn nhiệt cao. Trong nhiều ứng dụng thực tế, các chi tiết nhôm dạng tấm mỏng thường được liên kết bằng công nghệ hàn laser nhằm đáp ứng yêu cầu về độ chính xác và chất lượng mối hàn. Các nghiên cứu gần đây đã cho thấy hàn laser có thể được ứng dụng hiệu quả trong việc hàn các tấm nhôm mỏng cũng như các kết cấu kim loại khác nhau trong lĩnh vực sản xuất pin lithium-ion và các thiết bị điện tử [2], [3]. Tuy nhiên, quá trình hàn các hợp kim nhôm cũng gặp nhiều thách thức do độ phản xạ cao của vật liệu đối với chùm tia laser, độ dẫn nhiệt lớn và khả năng hình thành các khuyết tật như rỗ khí, nứt nóng hoặc thiếu ngấu trong quá trình hàn. Những yếu tố này có thể ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng cũng như các tính chất cơ học của mối hàn, đặc biệt là độ bền kéo và độ bền mỏi của liên kết hàn [5]. Trong quá trình hàn laser, chất lượng và đặc tính của mối hàn phụ thuộc mạnh vào các thông số công nghệ như công suất laser, tốc độ hàn, đường kính điểm laser và chế độ truyền năng lượng của chùm tia laser. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng sự thay đổi các thông số hàn có thể ảnh hưởng đáng kể đến vi cấu trúc, hình dạng vùng hàn cũng như các tính chất cơ học của vật liệu sau

khi hàn [2], [4]. Bên cạnh đó, các yếu tố liên quan đến chế độ quét của chùm tia laser như quỹ đạo quét (laser scanning path) và khoảng cách giữa các đường quét (scan line spacing) cũng đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát sự phân bố nhiệt và quá trình hình thành mối hàn. Một số nghiên cứu đã cho thấy rằng khoảng cách giữa các đường quét có ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng liên kết khi hàn các vật liệu kim loại mỏng, do nó tác động trực tiếp đến mức độ chồng lấp của vùng hàn và sự phân bố nhiệt trong vùng hàn [6].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về ảnh hưởng của các thông số hàn laser đến chất lượng mối hàn, các nghiên cứu liên quan đến ảnh hưởng của quỹ đạo quét laser và các thông số quét đến tính chất cơ học của mối hàn đối với các hợp kim nhôm vẫn còn hạn chế. Đặc biệt, các nghiên cứu về ảnh hưởng của các thông số quét laser đến độ bền kéo của mối hàn đối với hợp kim nhôm AA1050 chưa được thực hiện nhiều. Vì vậy, việc nghiên cứu ảnh hưởng và tối ưu hóa các thông số hàn laser đối với hợp kim nhôm AA1050 là cần thiết nhằm cải thiện chất lượng mối hàn và nâng cao các tính chất cơ học của liên kết hàn. Chất lượng mối hàn laser phụ thuộc rất nhiều vào sự tương tác phức tạp giữa các thông số hàn như công suất laser, vận tốc hàn và tần số quét chùm tia laser. Nghiên cứu này nhằm mục đích khảo sát một cách có hệ thống ảnh hưởng của các thông số hàn laser đến độ bền kéo của mối hàn hợp kim nhôm AA1050. Cụ thể, nghiên cứu này tập trung vào ba thông số chính: công suất hàn (P), vận tốc hàn (v) và tần số quét (f) ứng với hai biên dạng quét của chùm tia laser. Dựa trên các dữ liệu thực nghiệm thu được từ thiết kế thí nghiệm trực giao, mô hình hồi quy được xây dựng để phân tích mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và độ bền kéo của mối hàn. Từ đó, nghiên cứu sẽ đề xuất bộ thông số hàn tối ưu nhằm đạt được độ bền kéo cao nhất, góp phần

nâng cao hiệu quả và chất lượng trong các ứng dụng công nghiệp.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu và Thiết bị

Trong nghiên cứu này, vật liệu được sử dụng là hợp kim nhôm AA1050. Bề dày mẫu thực nghiệm là 0.73 mm. Quá trình hàn được thực hiện bằng máy hàn laser tự động như Hình 1. Môi trường bảo vệ trong quá trình hàn là khí Argon, nhằm ngăn chặn quá trình oxy hóa và đảm bảo chất lượng mối hàn.



Hình 1. Máy hàn Fiber laser tự động

2.2. Thiết kế Thực nghiệm

Phương pháp Taguchi có thể được áp dụng hiệu quả và hoạt động tối ưu trong nhiều điều kiện khác nhau nhờ khả năng phân tích mạnh mẽ đảm bảo cấu trúc thiết kế hợp lý và hiệu quả, tiết kiệm thời gian và chi phí, đồng thời giải quyết vấn đề với số lần thử nghiệm tối thiểu. Thiết kế bao gồm ba yếu tố chính: thiết kế ý tưởng, thiết kế tham số và thiết kế dung sai. Thiết kế ý tưởng được coi là một bước quan trọng trong toàn bộ quá trình thiết kế. Nó đòi hỏi phải điều tra sâu rộng và tạo ra giải pháp

cùng với kiến thức kỹ thuật thực tế để tìm ra phương pháp tốt nhất, đạt được kết quả phù hợp và giảm chi phí sản xuất. Thiết kế tham số được coi là một thử nghiệm kết hợp sự tương tác giữa các yếu tố kiểm soát và các yếu tố không thể kiểm soát để tìm ra các yếu tố kiểm soát tối ưu làm giảm sự thay đổi đáp ứng từ các yếu tố không thể kiểm soát. Thiết kế dung sai được tiến hành để giảm thiểu trường hợp không mong muốn từ thiết kế tham số và tăng cường kiểm soát chất lượng. Trong nghiên cứu này, các tham số được thiết kế dựa trên bảng trực giao (orthogonal array). Các tham số được xem xét bao gồm Công suất hàn (P), vận tốc hàn (v), tần số quét (f). Biên dạng quét được xét ở hai biên dạng là dạng tròn ($\circ$) và dạng số tám (∞). Các tham số sử dụng cho mô phỏng được trình bày trong Bảng 1.

Thực nghiệm được thiết kế trên phần mềm Expert Design, với 4 biến đầu vào (3 biến số và 1 biến danh mục) và số điểm tâm là 1. Biến đầu ra được kiểm tra là độ bền kéo của mối hàn.

Bảng 1. Tham số thiết kế thực nghiệm

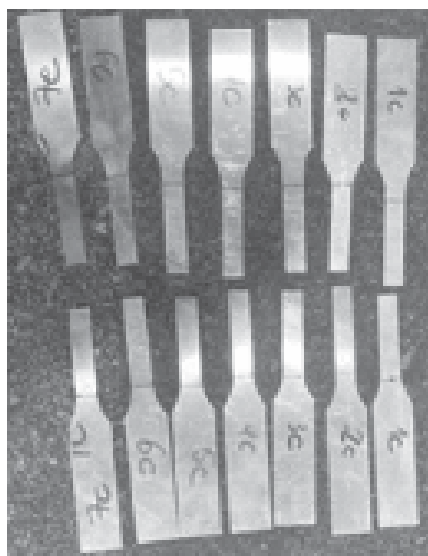
Yếu tố	Đơn vị	Mức độ		
		1	2	3
Công suất (P)	W	250	275	300
Vận tốc (v)	mm/p	500	600	700
Tần số (f)	Hz	50	75	100

2.3. Quy trình Thực nghiệm và Đánh giá

Quy trình thực nghiệm được tiến hành theo các bước sau:

1) Chuẩn bị mẫu: Các mẫu thử được đánh số trước khi hàn như Hình 2.



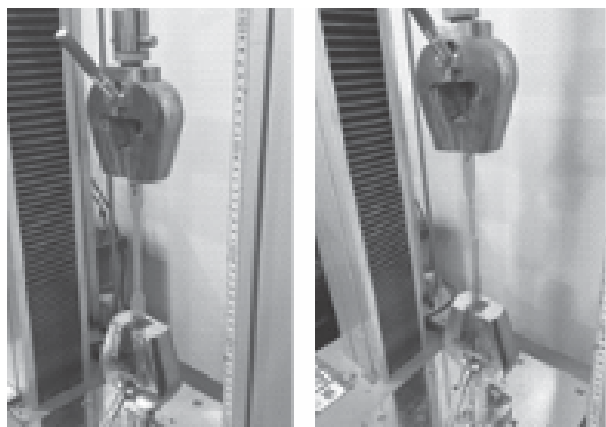


Hình 2. Các mẫu thử kéo được chuẩn bị và đánh số theo các điều kiện thí nghiệm.

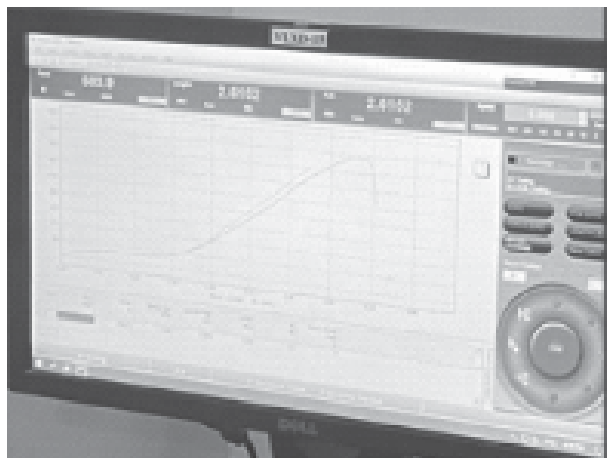
2) Hàn mẫu: Tiến hành hàn giáp mí hai tấm mẫu thử theo các thông số đã được thiết kế.

3) Chuẩn bị mẫu thử kéo: Sau khi hàn, các mẫu thử kéo được cắt từ mẫu hàn thực nghiệm theo tiêu chuẩn phù hợp.

4) Kiểm tra độ bền kéo: Các mẫu thử kéo được kiểm tra trên máy thử kéo như Hình 3 để xác định giá trị độ bền kéo tối đa (MPa). Kết quả được thể hiện và lưu lại như Hình 4.



Hình 3. Quá trình thử kéo mẫu trên máy thử kéo vạn năng.



Hình 4. Biểu đồ và dữ liệu thử kéo được ghi lại bằng phần mềm

2.4. Phân tích Dữ liệu

Dữ liệu thực nghiệm thu được từ các thí nghiệm được phân tích bằng phương pháp hồi quy để xây dựng mô hình toán học biểu diễn mối quan hệ giữa các thông số hàn và độ bền kéo. Phương trình hồi quy tuyến tính có dạng như phương trình (1):

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 \quad (1)$$

Trong đó:

- Y: Độ bền kéo của mỗi hàn (MPa);
- X_1 : Thông số công suất hàn (P);
- X_2 : Thông số vận tốc hàn (v);
- X_3 : Thông số tần số quét (f);
- B_0, B_1, B_2, B_3 : Các hệ số hồi quy.

Các hệ số hồi quy được tính toán dựa trên dữ liệu thực nghiệm. Sau đó, các hệ số này được kiểm định ý nghĩa bằng tiêu chuẩn Student, và sự tương thích của phương trình hồi quy được kiểm định bằng tiêu chuẩn Fisher. Mục tiêu của phân tích này là xác định các thông số có ảnh hưởng đáng kể đến độ bền kéo và tìm ra bộ thông số tối ưu để đạt được độ bền kéo cao nhất.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả thực nghiệm

Các thí nghiệm được tiến hành theo thiết kế Taguchi đã cung cấp dữ liệu về độ bền kéo của mối hàn hợp kim nhôm AA1050 dưới các điều kiện hàn khác nhau. Kết quả được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Bảng số liệu thực nghiệm và kết quả đo

STT	Công suất (W)	Vận tốc (mm/phút)	Tần số (Hz)	Độ bền kéo (Mpa)
1	250	500	50	594.53
2	250	600	50	428.93
3	250	700	50	435.03
4	250	500	75	341.43
5	250	600	75	373.13
6	250	700	75	369.63
7	250	500	100	294.69
8	250	600	100	325.07
9	250	700	100	328.78
10	275	500	50	669.73
11	275	600	50	710.70
12	275	700	50	474.40
13	275	500	75	387.60
14	275	600	75	662.71
15	275	700	75	743.05
16	275	500	100	771.70
17	275	600	100	678.86
18	275	700	100	697.50
19	300	500	50	507.30
20	300	600	50	744.34
21	300	700	50	665.30
22	300	500	75	676.08
23	300	600	75	707.08
24	300	700	75	681.78
25	300	500	100	609.78
26	300	600	100	637.10
27	300	700	100	658.17

3.2. Phân tích hồi quy

Dựa trên dữ liệu thực nghiệm, phương trình hồi quy tuyến tính biểu diễn mối quan hệ giữa độ bền kéo (Y) và các thông số hàn (X_1 : Công suất, X_2 : Vận tốc, X_3 : Tần số) được xác định là:

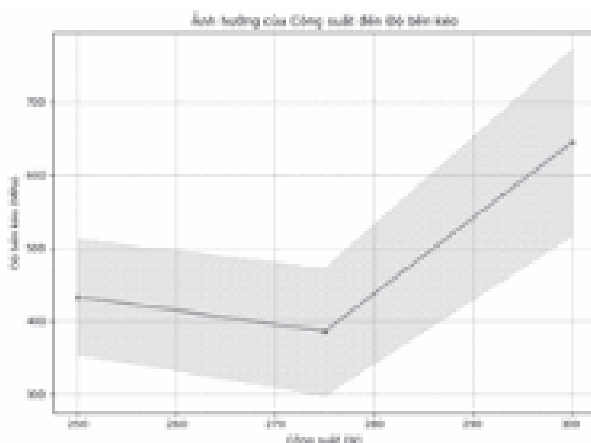
$$Y = 328.333 + 105X_1 - 65X_2 - 55X_3$$

Trong đó, các biến X_1 , X_2 , X_3 đã được mã hóa theo miền biến thiên của chúng. Cụ thể:

- X_1 : Công suất hàn (P) với miền biến thiên từ 250 W đến 300 W.
- X_2 : Vận tốc hàn (v) với miền biến thiên từ 500 mm/phút đến 700 mm/phút.
- X_3 : Tần số quét (f) với miền biến thiên từ 50 Hz đến 100 Hz.

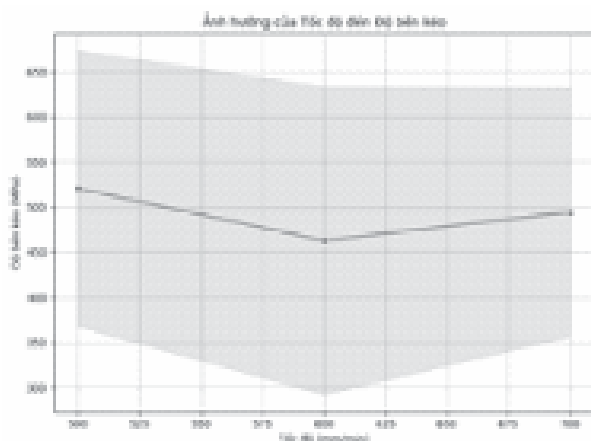
Các hệ số hồi quy được kiểm định ý nghĩa bằng tiêu chuẩn Student. Kết quả cho thấy các hệ số B_1 , B_2 , B_3 đều có ý nghĩa thống kê, với giá trị t lớn hơn giá trị $T_{0,05}$ (4.3). Điều này khẳng định rằng cả công suất, vận tốc và tần số đều có ảnh hưởng đáng kể đến độ bền kéo của mối hàn.

* Ảnh hưởng của Công suất (X_1): Hệ số $B_1 = 105$ mang dấu dương, cho thấy công suất hàn có ảnh hưởng tích cực đến độ bền kéo. Như kết quả ở Hình 5, khi công suất tăng, độ bền kéo của mối hàn có xu hướng tăng. Điều này là do công suất cao hơn cung cấp nhiều năng lượng hơn cho quá trình hàn, giúp vật liệu nóng chảy tốt hơn và tạo ra mối hàn chắc chắn hơn.



Hình 5. Ảnh hưởng của Công suất (W) đến Độ bền kéo (MPa)

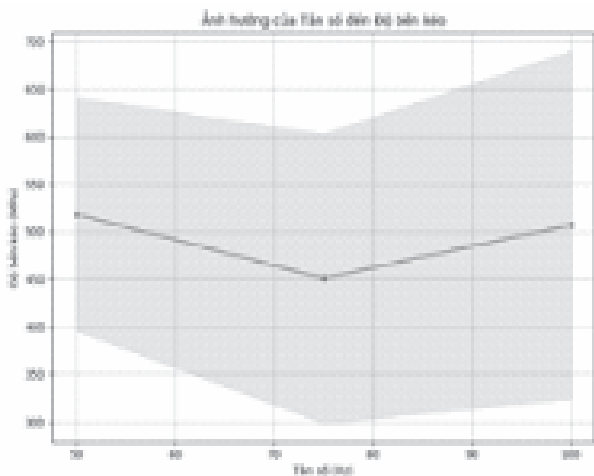
* Ảnh hưởng của Vận tốc (X_2): Hệ số $B_2 = -65$ mang dấu âm, cho thấy vận tốc hàn có ảnh hưởng tiêu cực đến độ bền kéo. Kết quả trong Hình 6 cho thấy khi vận tốc hàn tăng, độ bền kéo có xu hướng giảm. Vận tốc hàn quá nhanh có thể dẫn đến việc không đủ thời gian để vật liệu nóng chảy và kết tinh hoàn toàn, gây ra các khuyết tật và làm giảm độ bền mối hàn.



Hình 6. Ảnh hưởng của Tốc độ hàn (mm/min) đến Độ bền kéo (MPa)

* Ảnh hưởng của Tần số (X_3): Hệ số $B_3 = -55$ mang dấu âm, cho thấy tần số quét cũng có ảnh hưởng tiêu cực đến độ bền kéo. Trong Hình 7, tần số quét cao có thể làm giảm mật độ

năng lượng tập trung tại điểm hàn, dẫn đến việc vật liệu không được nung nóng đủ để tạo ra mối hàn tối ưu.



Hình 7. Ảnh hưởng của Tần số quét (Hz) đến Độ bền kéo (MPa)

Kiểm định sự tương thích của phương trình hồi quy bằng tiêu chuẩn Fisher cho thấy giá trị $F_{qs} = 16.1786$ nhỏ hơn giá trị $F_{0.095} = 19.16$. Điều này chứng tỏ phương trình hồi quy tuyến tính xây dựng được là tương thích với dữ liệu thực nghiệm và có thể được sử dụng để dự đoán độ bền kéo của mối hàn trong miền nghiên cứu.

3.3. Tối ưu hóa thông số hàn

Từ phương trình hồi quy, để đạt được độ bền kéo tối đa, cần tối ưu hóa các thông số hàn. Dựa trên các hệ số hồi quy, có thể thấy rằng để tăng độ bền kéo, cần tăng công suất hàn và giảm vận tốc hàn, tần số quét. Tuy nhiên, việc tối ưu hóa cần cân nhắc đến các yếu tố khác như hiệu quả sản xuất và chi phí. Cần có thêm các phân tích sâu hơn (ví dụ: sử dụng phương pháp đáp ứng bề mặt) để xác định chính xác bộ thông số tối ưu nhất trong miền nghiên cứu.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thành công trong việc khảo sát ảnh hưởng của các thông số hàn laser (công suất, vận tốc hàn, tần số quét) đến độ bền kéo của mối hàn hợp kim nhôm AA1050. Các kết quả chính có thể được tóm tắt như sau:

- Công suất hàn có ảnh hưởng tích cực đến độ bền kéo của mối hàn. Việc tăng công suất trong miền nghiên cứu giúp cải thiện đáng kể độ bền kéo.

- Vận tốc hàn và tần số quét có ảnh hưởng tiêu cực đến độ bền kéo. Để đạt được độ bền kéo cao, cần kiểm soát và tối ưu hóa hai thông số này ở mức phù hợp.

- Mô hình hồi quy tuyến tính được xây dựng từ dữ liệu thực nghiệm Taguchi đã chứng minh được sự tương thích và có thể được sử dụng để dự đoán độ bền kéo của mối hàn trong miền thông số đã khảo sát.

Nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc tối ưu hóa quy trình hàn laser hợp kim nhôm AA1050, góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả sản xuất trong các ứng dụng công nghiệp. Trong tương lai, các nghiên cứu sâu hơn có thể tập trung vào việc khảo sát ảnh hưởng của các thông số khác như khoảng cách tiêu cự, loại khí bảo vệ, cũng như sử dụng các phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu để tìm ra bộ thông số tối ưu toàn diện hơn.

Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 03/3/2026

Ngày phản biện: 17/3/2026



Tài liệu tham khảo:

- [1]. V. Dimatteo, A. Ascari, E. Liverani, and A. Fortunato, “*Experimental investigation on the effect of spot diameter on continuous-wave laser welding of copper and aluminum thin sheets for battery manufacturing*”. Optics & Laser Technology, vol. 145, p. 107495, 2022.
- [2]. A. Fortunato and A. Ascari, “*Laser welding of thin copper and aluminum sheets: feasibility and challenges in continuous-wave welding of dissimilar metals*”. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, vol. 6, no. 2, pp. 136-157, 2019.
- [3]. B. Kumar, S. Bag, C. Paul, C. Das, R. Ravikumar, and K. Bindra, “*Influence of the mode of laser welding parameters on microstructural morphology in thin sheet Ti6Al4V alloy*”. Optics & Laser Technology, vol. 131, p. 106456, 2020.
- [4]. F. Shu et al., “*Influence of scan line spacing on nanosecond pulse laser welding of 6063 Al to steel thin sheets*”. Optics & Laser Technology, vol. 145, p. 107497, 2022.
- [5]. L. N. Trinh and D. Lee, “*The characteristics of laser welding of a thin aluminum tab and steel battery case for lithium-ion battery*”. Metals, vol. 10, no. 6, p. 842, 2020.
- [6]. J. Tu and A. Paleocrassas, “*Fatigue crack fusion in thin-sheet aluminum alloys AA7075-T6 using low-speed fiber laser welding*”. Journal of Materials Processing Technology, vol. 211, no. 1, pp. 95-102, 2011.