

NGHIÊN CỨU TÁC ĐỘNG CỦA TỐC ĐỘ HÀN MA SÁT KHUẤY ĐẾN CƠ TÍNH VÀ MỐI LIÊN KẾT CỦA MỐI HÀN CHỮ T GIỮA AA6061 VÀ SUS304

Lê Công Sơn¹, Nguyễn Minh Quân², Nguyễn Hữu Thật², Nguyễn Quận³

TÓM TẮT

Nghiên cứu này khảo sát quá trình hàn ma sát khuấy (FSW) giữa hai vật liệu khác nhau, hợp kim nhôm AA6061 và thép không gỉ SUS304, với cấu trúc mối hàn chữ T. Các ảnh hưởng của tốc độ hàn (v) đến đặc tính mối hàn được nghiên cứu trong phạm vi tốc độ hàn từ 50 đến 200 mm/phút, trong khi tốc độ quay của dụng cụ hàn (ω) được giữ cố định ở 600 vòng/phút. Kết quả cho thấy tốc độ hàn có mối quan hệ nghịch đảo với kích thước hạt tại vùng khuấy (SZ), với kích thước hạt nhỏ nhất quan sát được ở tốc độ hàn cao nhất 200 mm/phút. Thử nghiệm độ cứng cho thấy độ cứng của vùng SZ đạt khoảng 70-75% so với vật liệu nền AA6061, với độ cứng thấp nhất ở vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ). Mẫu có tốc độ hàn 200 mm/phút đạt độ bền kéo cao nhất là 227,64 MPa. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng khi giảm tốc độ hàn (50 mm/phút), sẽ xuất hiện lớp oxide và liên kết yếu, dẫn đến chất lượng mối hàn giảm. Các phát hiện này cung cấp những thông tin quý giá giúp tối ưu hóa thông số hàn, nâng cao hiệu suất và độ bền của mối hàn trong ứng dụng hàn kim loại khác nhau.

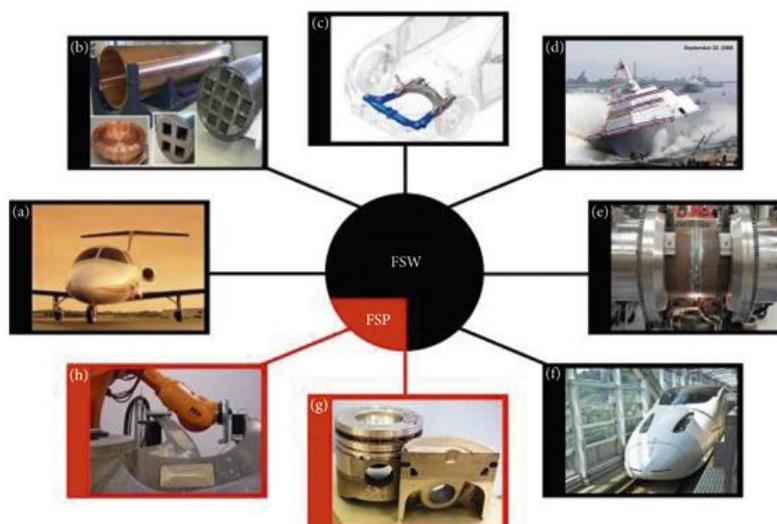
Từ khóa: Hàn ma sát khuấy, mối hàn chữ T, cơ tính mối hàn, hợp kim nhôm, thép không gỉ.

1. Đặt vấn đề

Hàn ma sát khuấy (FSW) đã nhanh chóng trở thành một trong những công nghệ tiên tiến và hiệu quả nhất trong ngành sản xuất chế tạo, nhờ vào những ưu điểm vượt trội và khả năng giảm thiểu tác động môi trường. Công nghệ này không chỉ hiệu quả trong việc tạo ra các mối hàn giữa các vật liệu đồng nhất, mà còn có khả năng hàn kết hợp giữa các vật liệu khác nhau, nhờ vào việc sử dụng nhiệt độ hàn thấp hơn so với nhiệt độ nóng chảy của vật liệu gốc [1]. Các ứng dụng của hàn ma sát khuấy đã được triển khai rộng rãi trong các ngành công nghiệp như hàng không vũ trụ, đóng tàu, ô tô và tàu cao tốc, được chỉ ra trong Hình 1 [2-4].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về hàn ma sát khuấy giữa các vật liệu khác nhau, chẳng hạn như hợp kim nhôm và hợp kim đồng [5], hợp kim nhôm và thép carbon [6], cũng như hợp kim nhôm và thép hợp kim [7], nhưng phần lớn các nghiên cứu tập trung vào việc hàn các kim loại có độ nóng chảy tương tự hoặc các mối hàn giáp mối. Gần đây, R. Jabraeili và cộng sự [8] cũng đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số hàn đến cấu trúc và cơ tính của mối hàn giáp mối giữa hợp kim nhôm AA2024 và thép không gỉ 304. Các nghiên cứu về mối hàn ma sát giữa nhôm 7075 và thép không gỉ 304 của E. Joshani và cộng sự [9] cũng về liên kết hàn giáp mối và cho độ bền rất tốt, lên đến 75% so với vật liệu nhôm 7075. Cũng cho mối hàn giáp mối thì D. Singh và cộng sự [10] đã nghiên cứu ảnh hưởng của thông số hàn cho liên kết của nhôm 6061 và thép không gỉ 304, kết quả cho thấy là các thông số hàn ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng mối hàn. Các nghiên

cứ trước đây chủ yếu tập trung vào mối hàn chồng hoặc giáp mối mà bỏ qua mối ghép chữ T, một kết cấu có ứng dụng nhiều trong thực tế. Trong đó các nghiên cứu về mối hàn chữ T giữa vật liệu thép hợp kim và hợp kim nhôm, đặc biệt là giữa thép không gỉ SUS304 và hợp kim nhôm AA6061, vẫn còn hạn chế. Do đó, nghiên cứu này nhằm khảo sát đặc điểm và cơ tính của mối hàn chữ T giữa hai vật liệu khác biệt, là thép không gỉ SUS304 và hợp kim nhôm AA6061.

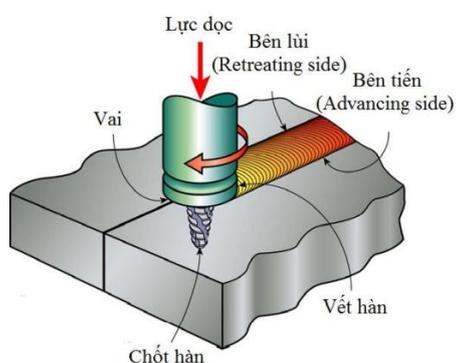


Hình 1. Ứng dụng sản phẩm cụ thể của FSW [9]

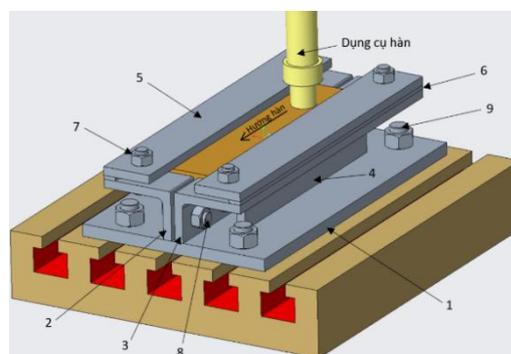
2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Cơ sở lý thuyết

Công nghệ hàn ma sát khuấy là một phương pháp hàn trong đó mối hàn được tạo ra trong trạng thái rắn. Nhiệt độ cần thiết cho quá trình hàn được sinh ra nhờ ma sát giữa dụng cụ quay và phôi, khiến bề mặt tiếp xúc giữa chúng nóng lên đến mức trở thành trạng thái chảy dẻo, từ đó tạo ra sự kết nối vững chắc giữa các vật liệu (Hình 2).

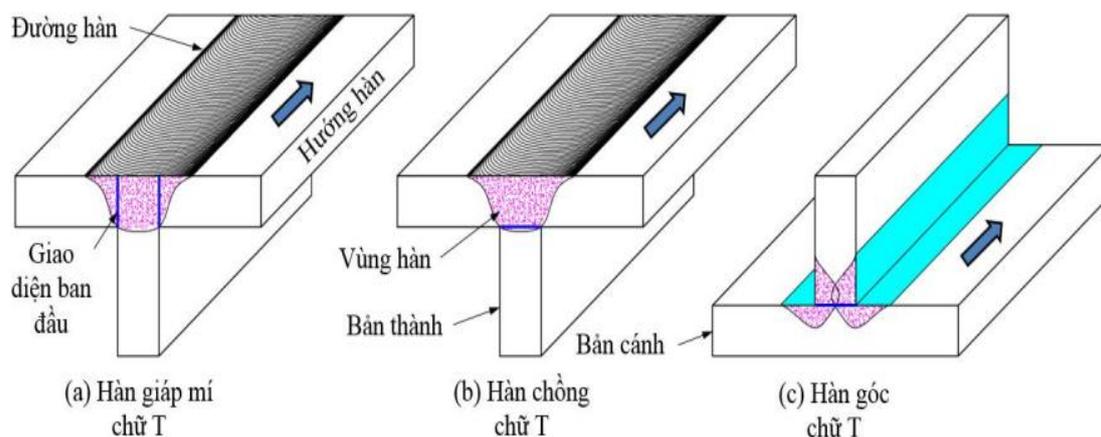


Hình 2. Nguyên lý hàn ma sát khuấy



Hình 3. Mô hình dụng cụ hàn ma sát khuấy

Phương pháp này lần đầu tiên được nghiên cứu và thực nghiệm vào tháng 12 năm 1991 bởi John Wayne và các cộng sự tại Viện Hàn Vương Quốc Anh (TWI - The Welding Institute), và sau đó được cấp bằng sáng chế tại Châu Âu, Mỹ, Úc và Nhật Bản [11]. Dụng cụ để hàn ma sát khuấy gồm chốt hàn, máy công cụ, đồ gá. Các thông số của quá trình hàn gồm có các thông số hình học của chốt hàn, tốc độ hàn và tốc độ quay của chốt hàn (Hình 3).



Hình 4. Môi ghép hàn chữ T

Trước đây, đã có nhiều nghiên cứu và thí nghiệm liên quan đến việc chế tạo các khớp nối hình chữ T trong công nghệ hàn ma sát khuấy. Ba phương pháp phổ biến hiện nay để tạo ra khớp nối hình chữ T, như thể hiện trong Hình 4, bao gồm hàn giáp mí, hàn góc và hàn chõng chữ T. Trong đó, hàn chõng chữ T được xem là phương pháp nhanh nhất. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là độ bền của mối hàn không cao và dễ xuất hiện nhiều liên kết yếu. Để cải thiện chất lượng mối hàn, cần nghiên cứu và điều chỉnh các yếu tố tác động đến thông số hàn, bao gồm tốc độ tịnh tiến, tốc độ quay và dòng chảy vật liệu.

2.2. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu trong báo cáo này là khảo sát mối liên kết và độ bền của mối hàn ma sát khuấy chữ T giữa hai vật liệu khác nhau, bao gồm thép không gỉ SUS304 và hợp kim nhôm AA6061. Bảng thông số vật liệu được thể hiện như Bảng 1, 2, 3, 4.

Bảng 1. Thành phần hóa học của AA6061 (%)

Fe	Si	Cr	Mg	Ti	Cu	Mn	Zn	Al
0,17	0,61	0,30	0,58	0,012	0,28	-	0,01	98,2

Bảng 2. Tính chất cơ học của AA6061

Độ bền chảy (MPa)	Độ bền cực đại (MPa)	Độ giãn dài phá hủy (%)
250	290	14

Bảng 3. Thành phần hóa học của SUS304 (%)

C	Si	Cr	Mo	P	S	Mn	Ni	Fe
0,08	0,75	19	2,7	<0,045	0,03	2	10	Còn lại

Bảng 4. Tính chất cơ học của SUS304

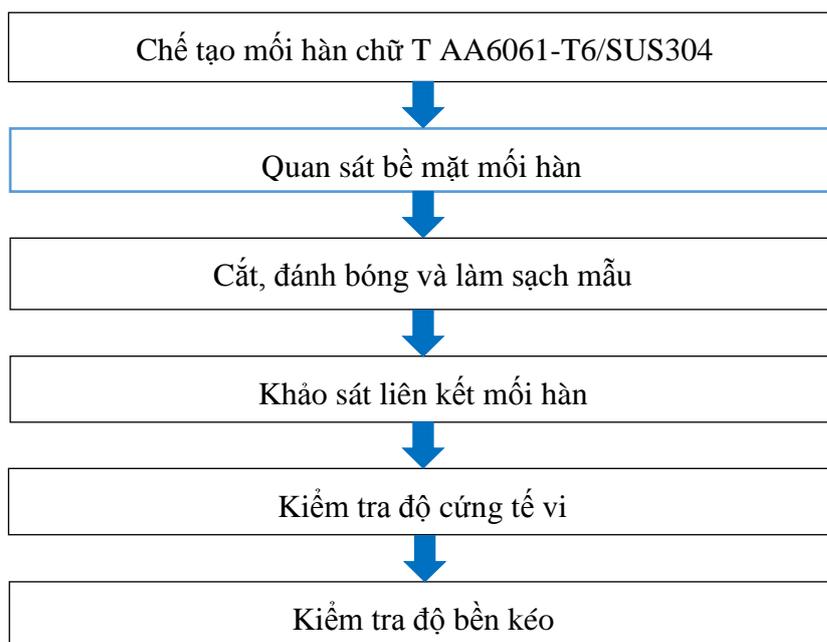
Độ bền chảy (MPa)	Độ bền cực đại (MPa)	Độ giãn dài phá hủy (%)
205	600	40%

2.3. Phương pháp nghiên cứu

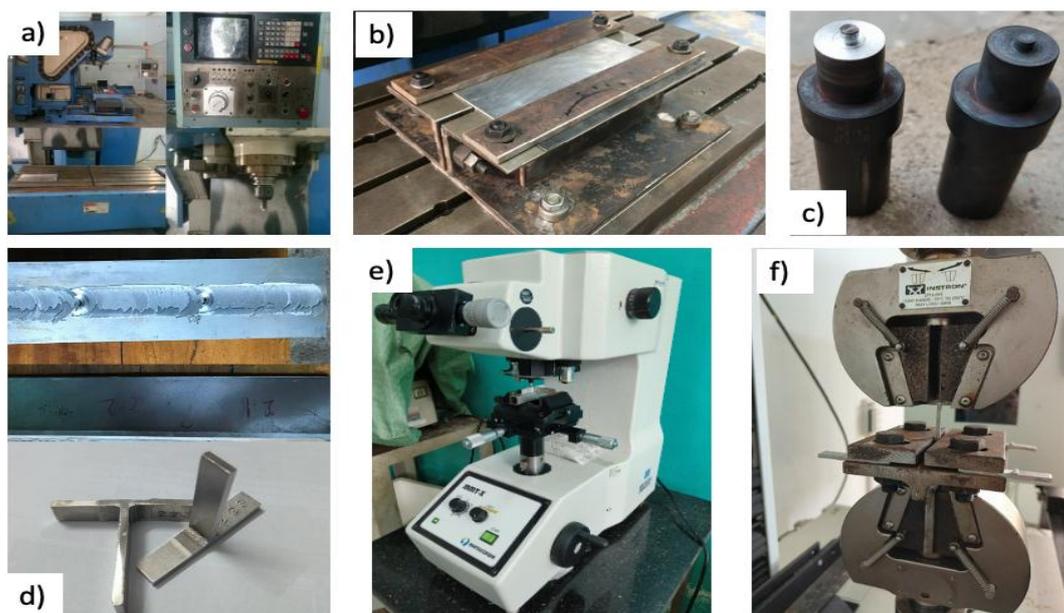
Dựa trên các nghiên cứu trước đây về hàn ma sát khuấy, tác giả đã tiến hành tổng hợp và chỉ ra những hạn chế còn tồn tại, từ đó thiết lập các thí nghiệm để phân tích và đánh giá kết quả một cách sâu sắc. Cụ thể, trong nghiên cứu này, tác giả tập trung vào việc đánh giá sự liên kết giữa hai vật liệu khác nhau khi thực hiện hàn với các thông số hàn đa dạng, đặc biệt là tốc độ hàn dao động trong phạm vi từ 50 đến 200 mm/phút. Bên cạnh đó, cơ tính của mỗi hàn cũng được khảo sát kỹ lưỡng nhằm xác định các thông số tối ưu cho quá trình hàn. Các mẫu hàn được kiểm tra độ cứng sử dụng máy đo độ cứng MMT-X Matsuzawa. Để đánh giá độ bền kéo của các mẫu hàn, tác giả đã áp dụng máy thử kéo nén Instron 3366. Quá trình thí nghiệm được thực hiện như Hình 5. Thiết bị và mẫu thí nghiệm được chỉ ra trong Hình 6. Các thông số thí nghiệm và quy trình tạo mỗi hàn ma sát được chi tiết hóa trong Bảng 5 dưới đây.

Bảng 5. Thông số các chế độ hàn thử nghiệm

TT	Tốc độ quay ω (vòng/phút)	Tốc độ tịnh tiến v (mm/phút)	Tỉ số ω/v (vòng/mm)
1	600	200	3
2	600	150	4
3	600	100	6
4	600	50	12



Hình 5. Sơ đồ thực hiện thí nghiệm



Hình 6. Thiết bị, dụng cụ và mẫu thí nghiệm

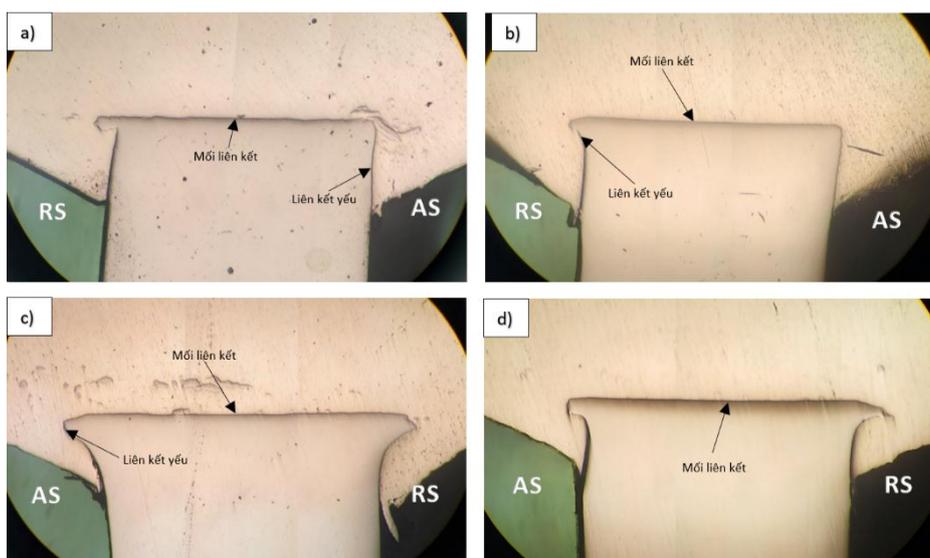
- a) Máy CNC làm thí nghiệm; b) Gá đặt trước khi hàn; c) Dụng cụ hàn; d) Mẫu hàn;
e) máy đo độ cứng tế vi; f) Gá đặt đo độ cứng

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Liên kết của mối hàn

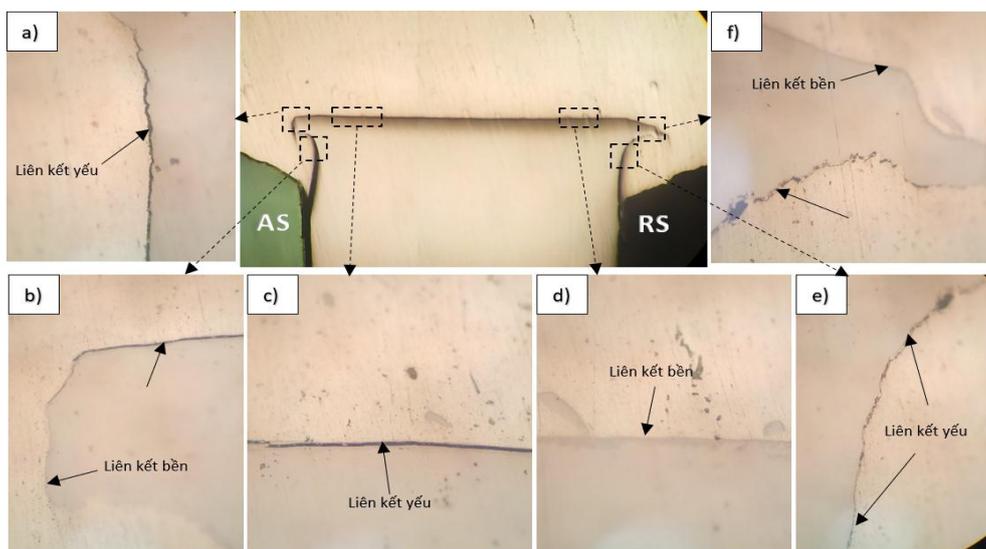
Hình dạng của mối liên kết giữa hai vật liệu tại vị trí hàn đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá chất lượng của mối hàn. Để thực hiện đánh giá này, các mẫu hàn được cắt ngang và đánh bóng, sau đó được kiểm tra dưới kính hiển vi kim tương Olympus. Kết quả thu được, như được thể hiện trong Hình 7, cho thấy tất cả các mẫu mối

hàn không có khuyết tật như lỗ hổng. Về hình dạng bề mặt mối liên kết (interface morphology), các mẫu hàn có bề mặt tương đối thẳng, với ít hiện tượng cong vênh hoặc ngoằn ngoèo. Các liên kết yếu chủ yếu hình thành ở hai bên góc của mối hàn ma sát khuấy. Các mối hàn cũng được quan sát để đánh giá sự xuất hiện của các lớp oxide và các vị trí có liên kết bền. Kết quả nghiên cứu cho thấy mẫu hàn với tốc độ hàn 200 mm/phút có lớp oxide ít nhất, trong khi thép hợp kim tạo độ ngẫu ở hai bên góc của mối hàn chữ T, như minh họa trong Hình 8.



a) Mẫu 200 mm/phút; b) Mẫu 150 mm/phút; c) Mẫu 100 mm/phút; d) Mẫu 50 mm/phút

Hình 7. Bề mặt cắt ngang của mối hàn



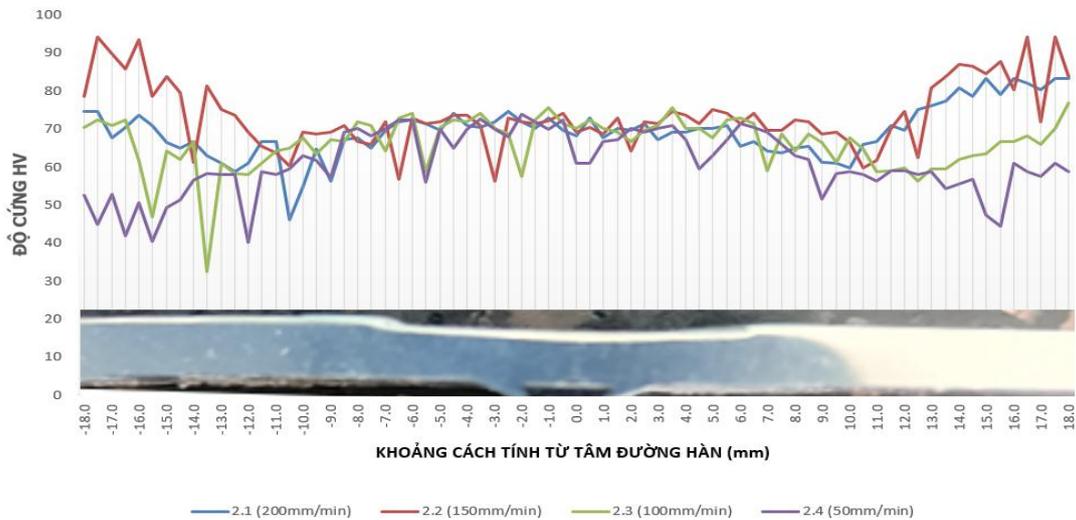
Hình 8. Liên kết của mối hàn có tốc độ hàn 200mm/phút

3.2. Cơ tính của mối hàn

Để đánh giá sự phân bố độ cứng tại các vị trí khác nhau trong vùng hàn, độ cứng đã được đo bằng thang đo HV trên thiết bị đo độ cứng MMT-X Matsuzawa, sử dụng đầu đo

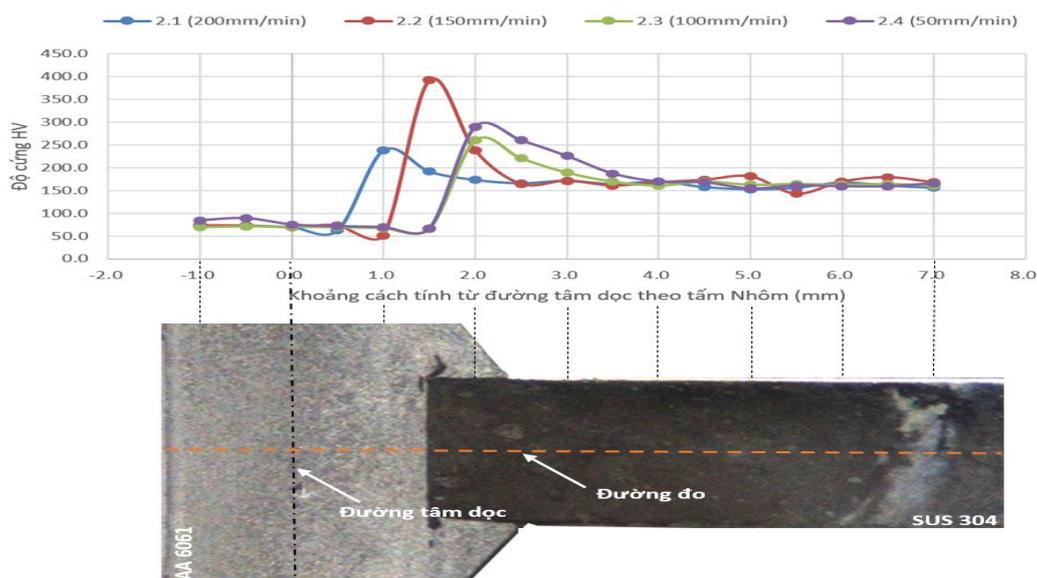
mũi kim cương với tải trọng 200g và thời gian giữ tải trong khoảng 7 - 10 giây. Việc đo độ cứng được thực hiện đối với cả phần nhôm AA6061 và thép không gỉ SUS 304. Kết quả đo được thể hiện trong Hình 9, với độ cứng của các mẫu được đo ở các vùng khác nhau của mối hàn cho bốn tốc độ hàn khác nhau. Kết quả cho thấy rằng, ở tất cả các tốc độ hàn, độ cứng thấp nhất luôn xuất hiện tại vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ). Vùng hàn khuấy (SZ) có độ cứng cao hơn vùng HAZ, tuy nhiên độ cứng của vùng SZ vẫn thấp hơn so với vật liệu nền (BM), với độ chênh lệch này có thể liên quan đến kích thước hạt của các vùng hàn. Cụ thể, vùng SZ có kích thước hạt nhỏ hơn, điều này dẫn đến độ cứng và độ bền cao hơn so với vùng HAZ, theo lý thuyết hiệu ứng Hall-Petch [9].

Độ cứng của các mẫu đã giảm rõ rệt tại vùng HAZ, với giá trị thấp nhất là 32,4 HV (ở mẫu với tốc độ hàn 100 mm/phút). Ngược lại, vùng SZ có độ cứng cao nhất, đạt 73 HV (ở mẫu với tốc độ hàn 150 mm/phút), mặc dù vẫn thấp hơn độ cứng của vật liệu nền AA6061 (107 HV) khoảng 25-30%. Điều này phù hợp với kết luận trong nghiên cứu của D. Hao [12], trong đó độ cứng của vật liệu nền luôn cao hơn SZ, và SZ lại có độ cứng cao hơn HAZ [13]. Quan sát biểu đồ phân bố độ cứng cho thấy rằng, khi giảm tốc độ hàn, độ cứng mối hàn có xu hướng tăng. Tuy nhiên, từ mẫu có tốc độ hàn 200 mm/phút xuống 50 mm/phút, sự thay đổi độ cứng không đáng kể.



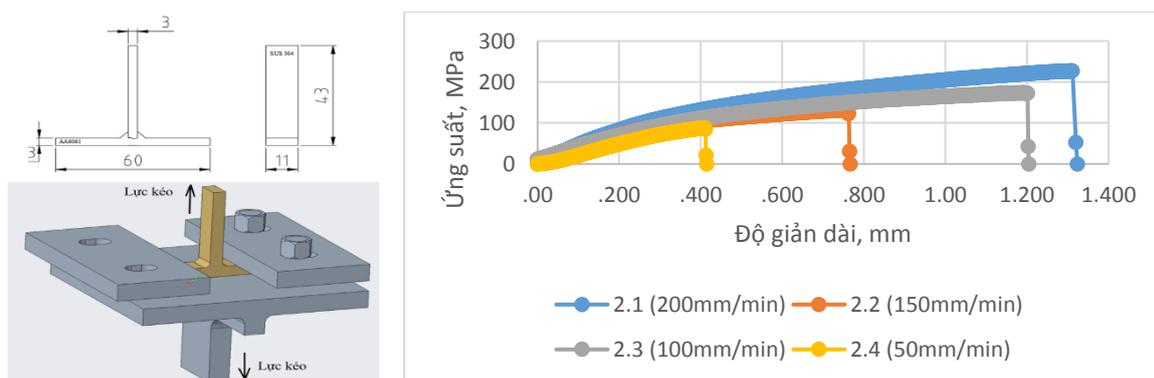
Hình 9. Độ cứng của mối hàn trên phần cánh (hợp kim nhôm)

Tại vùng khuếch tán ngay ranh giới giữa hai kim loại, độ cứng có xu hướng tăng đột ngột. Đặc biệt, khu vực xung quanh ranh giới giữa AA6061 và SUS304 cho thấy độ cứng cao nhất. Như đã được đề cập ở phần trước về vật liệu, độ cứng của thép không gỉ SUS304 dao động khoảng ≤ 200 HV. Tuy nhiên, như thể hiện trong Hình 10, độ cứng tại vùng mối liên kết này tăng đáng kể so với vật liệu nền SUS304, với mức độ tăng khoảng 25-35% (250-300HV). Sự phân bố độ cứng trong vùng này không ổn định, có sự dao động tăng giảm theo sự thay đổi tốc độ hàn (v). Đối với phần vật liệu thép, độ cứng bắt đầu ổn định dần từ vị trí cách đường tâm mối hàn dọc AA6061 trong khoảng từ 3,5 mm đến 7,0 mm theo hướng về phía thép hợp kim.



Hình 10. Phân bố độ cứng dọc theo tấm thép SUS 304

Trong phương pháp hàn ma sát khuấy với mỗi nối chữ T, độ bền kéo của mối liên kết giữa phần cánh (AA6061) và phần gân (SUS304) là một yếu tố quan trọng trong việc đánh giá chất lượng mối hàn. Nghiên cứu tập trung vào việc phân tích độ bền kéo của mối liên kết giữa cánh và gân dưới tác động của tốc độ hàn (v) dao động từ 50 đến 200 mm/phút. Ứng suất kéo của hợp kim nhôm AA6061 dao động trong khoảng từ 124 đến 290 MPa, trong khi của thép không gỉ SUS304 là ≤ 520 MPa. Kết quả thử nghiệm, được trình bày trong Hình 11, cho thấy mẫu có tốc độ hàn $v = 200$ mm/phút đạt ứng suất kéo lớn nhất, đạt giá trị 227,64 MPa (6829 N). Ngược lại, mẫu với tốc độ hàn $v = 50$ mm/phút (mẫu 2.4) có ứng suất kéo thấp nhất, chỉ đạt 88,32 MPa (2862 N).



Hình 11. Sơ đồ thử kéo và biểu đồ ứng suất

4. Kết luận

Kết quả khảo sát mối liên kết và cơ tính của mối hàn ma sát khuấy giữa hai vật liệu khác nhau, AA6061 và SUS 304, đã cho thấy một số kết luận quan trọng như sau:

- Các lớp oxide và mối liên kết yếu ngày càng gia tăng khi tốc độ hàn giảm từ 200 mm/phút xuống 50 mm/phút. Tuy nhiên, trong quá trình hàn không xuất hiện các khuyết tật như rỗ khí hay nứt.

- Nếu không tính vùng vật liệu nền (BM), vùng khuấy (SZ) có độ cứng cao nhất, tuy nhiên vẫn thấp hơn khoảng 70-75% so với vật liệu nền AA6061.

- Độ cứng thấp nhất được quan sát tại vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ), và độ cứng này có xu hướng mở rộng khi tốc độ hàn giảm.

- Mỗi hàn với tốc độ hàn $v = 200$ mm/phút cho kết quả độ bền kéo tốt nhất với ứng suất lớn nhất là 227.64 MPa, độ biến dạng lớn nhất, và có xu hướng giảm dần khi tốc độ hàn giảm do sự xuất hiện của các mối liên kết yếu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Dương Đình Hào (2021), *Nghiên cứu chế tạo thử nghiệm tấm panel giữa hai hợp kim nhôm 7075 và 5083 bằng công nghệ hàn ma sát khuấy*, Báo cáo khoa học.
- [2]. K. J. Colligan (2010), *Solid-state joining: fundamentals of friction stir welding, "Failure Mechanisms of Advanced Welding Processes*, pp. 137–163, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- [3]. R. S. Mishra, H. Sidhar (2016), *Friction Stir Welding of 2xxx Aluminum Alloys Including Al-Li Alloys*, Butterworth-Hei-Neumann, Oxford, GB, UK.
- [4]. A. Heidarzadeh, S. Mironov, R. Kaibyshev, et al (2021), *Friction stir welding/processing of metals and alloys: a comprehensive review on microstructural evolution*, Progress in Materials Science, vol. 117.
- [5]. P. Xue, D.R. Ni, D. Wang, B.L. Xiao, Z.Y. Ma, Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al–Cu joints, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 528, Issues 13–14, 2011, Pages 4683-4689,
- [6]. Peng Li, Su Chen, Honggang Dong, Hua Ji, Yongbing Li, Xin Guo, Guoshun Yang, Xiaosheng Zhang, Xinliang Han, Interfacial microstructure and mechanical properties of dissimilar aluminum/steel joint fabricated via refilled friction stir spot welding, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 49, 2020, Pages 385-396,
- [7]. Pankaj, Pardeep, Tiwari, Avinish, Dhara, Lakshmi Narayan, Medhi, Tanmoy, Biswas, Pankaj, Dissimilar Friction Stir Joining of Aluminum Alloy and Stainless Steel: A Study on the Intermetallic Compound Formation, Microstructure, and Mechanical Properties of the Joints, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol 51, Issue 2, 2023, Pages 588-619
- [8]. R. Jabraeili, H. R. Jafarian, R. Khajeh, N. Park, Y. Kim, A. Heidarzadeh, and A. R. Eivani, "Effect of FSW process parameters on microstructure and mechanical properties of the dissimilar AA2024 Al alloy and 304 stainless steel joints," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 814, p. 140981, 2021. doi: 10.1016/j.msea.2021.140981

- [9]. E. Joshani, B. Beidokhti, A. Davodi, and M. Amelzadeh, "Evaluation of dissimilar 7075 aluminum/AISI 304 stainless steel joints using friction stir welding," *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, vol. 3, p. 100017, 2023, doi: 10.1016/j.jalmes.2023.100017.
- [10]. D. Singh, D. Deepak, and G. S. Brar, "Investigations on the effect of friction crush welding parameters in joining 6061 aluminium alloy to 304 stainless steel," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 37, no. 4, pp. 1791–1803, Apr. 2023, doi: 10.1007/s12206-023-0336-6
- [11]. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-friction-stir-welding>, (Twi global, 7/2023, technical knowledge). Truy cập tháng 8/2025
- [12]. D.D Hảo, T.H Trà, Đ.X Phương, T.D Dac, Q.H Nam (2023), *Microstructure Evolution and Interfacial Bonding Properties of Dissimilar T-Lap Joints Using Friction Stir Welding Parameters*, Tạp chí KTVL&HS.
- [13]. D.D Hảo, T.H Trà, V.C Hòa (2016). *Study of effect of friction stir welding parameters on impact energy of AA7075-T6*, Tạp chí KH&CN 54 (1), pp. 99-108.

A STUDY ON THE EFFECT OF FRICTION STIR WELDING SPEED ON MECHANICAL PROPERTIES AND T-JOINTS FOR AA6061 AND SUS304

Le Cong Son¹, Nguyen Minh Quan², Nguyen Huu That², Nguyen Quan³

ABSTRACT

This study investigates the friction stir welding (FSW) of dissimilar materials in T-joint welding for SUS304 stainless steel and AA6061 aluminum alloy. The study examines the effects of welding speeds between 50 and 200 mm/min while keeping the tool's rotational speed at 600 rpm. Results of the study showed that the welding speed had an inverse relationship with the grain size in the stir zone (SZ), with the smallest grains observed at the highest welding speed of 200 mm/min. According to hardness testing, the SZ had between 70 and 75 percent of the underlying AA6061 material's hardness, while the heat-affected zone (HAZ) had the lowest hardness. The specimen welded at 200 mm/min had the highest tensile strength, 227.64 MPa, according to tensile testing. The study also showed that weak metallurgical bonding and the presence of oxide layers significantly reduced the weld quality at lower welding speeds (50 mm/min). These findings provide insightful information for optimizing welding parameters, improving weld performance and strength in dissimilar metal welding applications.

Keywords: *friction stir welding, T-joint, mechanical properties of the weld joint, stainless steel, aluminum alloy.*



¹Trường CD Kỹ nghệ Dung Quất, Quảng Ngãi; ²Khoa Cơ khí, Trường ĐH Nha Trang;

³Trường Đại học Phạm Văn Đồng; Email: minhquan@ntu.edu.vn.