



DOI:10.22144/ctujos.2026.083

KHẢO SÁT THỰC NGHIỆM KHUYẾT TẬT KHI HÀN MA SÁT KHUẤY CỦA VẬT LIỆU ĐỒNG NHẤT VÀ KHÔNG ĐỒNG NHẤT

Nguyễn Minh Kỳ*, Hoàng Trọng Nghĩa, Hồ Xuân Thành và Nguyễn Phan Anh

Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): kynm@hcmute.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 02/02/2026

Sửa bài (Revised): 09/03/2026

Duyệt đăng (Accepted): 14/05/2026

Title: Experimental study on defects in friction stir welding of similar and dissimilar alloys joining

Author(s): Nguyen Minh Ky*, Hoang Trong Nghia, Ho Xuan Thanh and Nguyen Phan Anh

Affiliation(s): Faculty of Mechanical Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering, Viet Nam

TÓM TẮT

Khảo sát thực nghiệm quá trình hình thành và xuất hiện khuyết tật hàn ma sát khuấy được thực hiện trên máy phay đứng của hãng MANFORD. Tốc độ của dụng cụ khuấy được quay với 1.875 vòng/phút và vận tốc chạy dọc theo đường hàn là 20 mm/phút là hai thông số quan trọng đối với thiết bị được để khảo sát. Vật liệu để khảo sát khuyết tật trong hàn ma sát là nhôm và đồng đỏ. Trong nghiên cứu khảo sát này, cái nhìn toàn diện về các yếu tố chính liên quan đến quá trình xuất hiện sự hình thành khuyết tật trong các phương pháp hàn khuấy thường được sử dụng với hợp kim nhôm và đồng bằng phương pháp thực nghiệm được làm rõ. Tốc độ quay của dụng cụ, độ sâu vật hàn, vận tốc di chuyển của dụng cụ, chi phối nhiệt độ cao được tạo ra trong quá trình hàn ma sát khuấy và thời gian cần thiết để hàn vật liệu là rất quan trọng. Mô hình nghiên cứu này đã dự đoán và phân tích thêm các khuyết tật của đường hàn trên bề mặt, đường hàn dưới bề mặt, sự hình thành không khuếch tán khuấy và lỗ thoát của chốt. Và đồng thời so sánh độ bền của mỗi hàn ma sát bị khuyết tật vượt trội hơn so với mỗi hàn Laser. Các giá trị này được kiểm tra bởi độ bền kéo tối đa lần lượt là 21.5 MPa và 15.8 MPa tại vùng hàn của FSW và Laser.

Từ khóa: Khuyết tật trong hàn ma sát khuấy, khuyết tật hàn vật liệu đồng chất và không đồng chất, liên kết ở trạng thái rắn, sự hình thành khuyết tật

ABSTRACT

The welding experiments were worked on the vertical milling machine MANFORD. The tool rotation speed of 1.875rpm and travel speed of 20mm/min was used in both the welding conditions. Defects associated with friction stir welding (FSW) of two steel grades including Aluminum and Copper were investigated. This study attempts to give an overview of the key factors related to the formation of defects in welding methods commonly used with aluminium and copper alloys by experimental method. Tool rotary speed, target depth and tool traverse speed govern the peak temperature generated during friction stir welding and the time required to weld the material are very important. The investigated model successfully predicted subsurface tunnel defects, surface tunnels, excessive flash formations, and exit hole of pin. And also the strength of the weld joint produced with defect in FSW was superior to that of the Laser weld. The maximum tensile test values of 21.5 MPa and 15.8 MPa are reported at the weld zone for FSW and Laser, respectively.

Keywords: Defects in Friction stir welding, defects of similar and dissimilar alloy joining, solid state joining, defect formation

1. GIỚI THIỆU

Hàn ma sát khuấy (Friction Stir Welding - FSW), được phát minh và cấp bằng sáng chế bởi Viện Hàn (The Welding Institute - TWI), Vương quốc Anh vào năm 1995 (Wayne, M. T et al., 1995) và ứng dụng đầu tiên là hợp kim nhôm. FSW phụ thuộc vào một công cụ quay thường được đưa vào giữa giao diện tại đường nối của các tấm kim loại và tạo ra một vùng biến dạng dẻo hỗn hợp được gọi là vùng khuấy (Stir zone - SZ). FSW là một công nghệ hàn ở trạng thái rắn được sử dụng rộng rãi, do có ít khuyết tật và không có hiện tượng nóng chảy. Kết quả của quá trình này là một mối nối được tạo ra ở trạng thái "rắn chắc". Nó được ứng dụng rộng rãi trong ngành kỹ thuật cơ khí dân dụng, đóng tàu, đường sắt và hàng không vũ trụ kể từ khi được phát minh vào năm 1990. Nó có thể được sử dụng để hàn các vật liệu kim loại khó liên kết có cường độ và độ bền cao, chẳng hạn như: hợp kim nhôm, hợp kim đồng và hợp kim magie, những vật liệu thường khó hàn bằng các quy trình hàn nóng chảy thông thường. Trong quá trình FSW, vật liệu trải qua quá trình biến dạng dẻo mạnh ở nhiệt độ cao, dẫn đến sự hình thành các hạt tinh thể tái kết tinh mịn và đẳng hướng (Rhodes et al., 1997). Cấu trúc hạt tế vi mịn trong các mối hàn ma sát khuấy tạo ra các đặc tính cơ học tốt. So với các loại phương pháp hàn khác thì hàn ma sát khuấy luôn luôn có những ưu điểm vượt trội. FSW được coi là bước phát triển quan trọng bậc nhất trong lĩnh vực hàn kim loại trong nhiều thập kỷ qua và là một công nghệ "xanh" nhờ hiệu quả tiêu hao năng lượng, thân thiện với môi trường và tính linh hoạt trong vận hành. So với các phương pháp hàn thông thường, hàn ma sát khuấy tiêu thụ năng lượng ít hơn đáng kể. Không sử dụng khí bảo vệ hoặc chất trợ hàn, do đó quy trình này thân thiện với môi trường. Quá trình hàn không sử dụng kim loại phụ, do đó có thể hàn bất kỳ hợp kim nhôm nào mà không cần lo lắng về sự tương thích thành phần, điều này thường xảy ra trong hàn nóng chảy.

Hiện nay, có nhiều dữ liệu đã được báo cáo trong các tài liệu nghiên cứu về phân loại và nguồn gốc khuyết tật trong quá trình hàn ma sát khuấy, bao gồm mô phỏng số và thực nghiệm. Tuy nhiên, phần lớn nghiên cứu này tập trung vào các hợp kim có điểm nóng chảy thấp và giống nhau, trong khi thông tin về sự hình thành khuyết tật trong vật liệu khác nhau bằng hàn ma sát khuấy còn rất hạn chế. Cater (2013) đã đưa việc hình thành khuyết tật vào mô hình FSW bằng cách thiết lập thời gian giữ và thời gian hàn. Sự hình thành khoảng trống ở phía dưới mặt tiếp xúc giữa đầu dò và phôi được giải thích là

do thiếu sự tiếp xúc giữa dụng cụ và vật liệu phôi do tốc độ di chuyển của dụng cụ quá cao. Morisada et al. (2015) đã chứng minh bằng thực nghiệm, nhờ sự hỗ trợ của hệ thống hình ảnh thời gian thực truyền tia X và bằng cách theo dõi dòng chảy vật liệu ba chiều trong quá trình hàn ma sát khuấy thép, rằng sự hình thành khuyết tật ở phía tiến triển là kết quả của sự tắc nghẽn vật liệu. Gibson et al. (2014) đã chỉ ra rằng các khuyết tật trong FSW là kết quả của các thông số hàn không phù hợp và nguồn gốc của các khuyết tật nứt bề mặt đến từ sự xâm nhập của oxit bề mặt vào vùng khuấy.

Do các đặc điểm hình học khác nhau của dụng cụ, chuyển động vật liệu xung quanh chốt có thể khá phức tạp (London et al., 2001) cũng là nguyên nhân sinh ra khuyết tật mối hàn. Tính khả dụng trong nghiên cứu của việc tạo ra mối hàn giữa hai tấm kim loại khác nhau như: các mối hàn giữa tấm nhôm AL-6061 và tấm đồng nguyên chất dày 6 mm bằng phương pháp hàn ma sát khuấy thông thường và hàn ma sát khuấy bằng dụng cụ vai ba rãnh sử dụng hình dạng "khe – rãnh" trên bề mặt vai đã được nghiên cứu (Kishan et al., 2022). Tuy nhiên, các khuyết tật về mối hàn ma sát khuấy ít được phân tích đầy đủ và kỹ lưỡng. Mặc dù quy trình FSW có nhiều ưu điểm, nhưng vẫn có một số nhược điểm đáng kể hạn chế phạm vi ứng dụng của nó. Chi phí thiết lập cao, kích thước máy, quy trình ổn ào, mối hàn phải được thực hiện trên máy và khó thực hiện tại hiện trường, bị hạn chế về độ dày vật liệu và cần giám sát cẩn thận các thông số hàn để đảm bảo mối nối hoàn chỉnh và nhất quán mà không có khuyết tật hàn là một số nhược điểm của quy trình (Akinlabi & Mahamood, 2020).

Những lợi ích chính của hàn ma sát khuấy được tham khảo từ (Mishra & Ma, 2005; Shalok et al., 2024) và có bổ sung là:

- + Lợi ích trong luyện kim: đây là quá trình pha rắn, độ biến dạng phôi thấp, không mất mát các nguyên tố hợp kim, đặc tính luyện kim tuyệt vời tại khu vực mối nối, cấu trúc vi mô mịn, độ ổn định kích thước và khả năng lặp lại tốt, nếu canh chỉnh tốt sẽ không có vết nứt, có thể thay thế nhiều bộ phận được nối với nhau bằng ốc vít.

- + Lợi ích về môi trường: không cần khí bảo vệ nên hạn chế ô nhiễm vật hàn và môi trường, không cần dung môi vệ sinh bề mặt, tiết kiệm vật liệu tiêu hao, chẳng hạn như vật liệu đắp, dây hàn hoặc bất kỳ loại khí hàn nào khác, loại bỏ chất thải từ quá trình khuấy nghiền.

+ Lợi ích năng lượng: Chỉ cần 2,5% năng lượng so với hàn laser, giảm mức tiêu thụ nhiên liệu trong các ứng dụng máy bay, ô tô và tàu thủy hạng nhẹ, việc cải tiến sử dụng vật liệu (ví dụ: ghép các vật liệu có độ dày khác nhau) giúp giảm trọng lượng.

+ Lợi ích trong hàng hải: Nhờ có độ bền, khả năng chống ăn mòn, cấu trúc tế vi toàn mỹ cho nên nó trở thành lựa chọn hấp dẫn cho việc chế tạo thân tàu, tấm vách ngăn,... giúp cải thiện hiệu quả và tuổi thọ của các công trình hàng hải đồng thời phù hợp với các mục tiêu về môi trường và kinh tế.

Mục đích chính của bài báo này là tập trung vào khảo sát và phân tích thực nghiệm quá trình hình thành khuyết tật của mối hàn ma sát khuấy của vật liệu đồng nhất, đồng nhất ở đây có nghĩa là giống nhau về mặt cấu trúc kim loại như: Alumium (AL-5052) - Alumium (AL-5052) và vật liệu không đồng nhất là: Alumium (AL-5052) - Copper (Cu-1010) trên thiết bị và công nghệ hiện có. Mô hình khảo sát này được thực hiện trên máy phay đứng MANFORD.

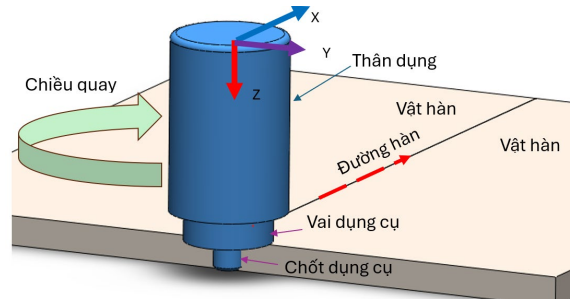
2. PHÂN TÍCH QUÁ TRÌNH HÌNH THÀNH HÀN MA SÁT KHUẤY

Hàn ma sát khuấy (FSW) là một quy trình hàn trạng thái rắn được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp và được ưa chuộng hơn các quy trình hàn khác nhờ khả năng hàn các vật liệu tương tự và khác nhau với chất lượng cao. Công nghệ FSW khá đơn giản, một dụng cụ quay được thiết kế đặc biệt với chốt ăn sâu vào tấm vật liệu hàn và vai được ép vào hai cạnh tiếp giáp của các tấm cần ghép nối và di chuyển dọc theo đường nối của hai tấm vật liệu hàn như minh họa ở Hình 1.

Dụng cụ này thực hiện hai chức năng chính: (a) làm nóng phôi và (b) di chuyển vật liệu để tạo ra khuấy mối nối. Trong quá trình này, một chốt dụng cụ (đầu dò) được cấy hoàn toàn giữa các bề mặt giao diện của phôi với tốc độ quay thích hợp cho đến khi vai tiếp xúc với bề mặt phôi và cung cấp lực nén thích hợp (lực hướng trục) trên vùng khuấy trộn. Quá trình nung nóng được thực hiện nhờ ma sát giữa dụng cụ và phôi, cùng với sự biến dạng dẻo của phôi. Việc gia nhiệt cục bộ làm mềm vật liệu xung quanh chốt và sự kết hợp giữa chuyển động quay và tịnh tiến của dụng cụ dẫn đến sự dịch chuyển vật liệu từ phía trước chốt ra phía sau chốt.

Sự tác động giữa bề mặt dụng cụ và phôi tạo ra một lượng nhiệt ma sát lớn làm mềm vật liệu phôi và khiến nó chảy xung quanh chốt. Vật liệu mềm chảy và tuàn hoàn từ trước ra sau và từ trên xuống dưới của chốt khi dụng cụ di chuyển dọc theo với

tốc độ quay chót thích hợp và lực nén vai phù hợp (Mishra & Ma, 2005). FSW lý tưởng cho các ứng dụng yêu cầu độ bền cao hơn hoặc vật liệu khác loại dọc theo đường hàn, do đó, đảm bảo chất lượng quy trình rất quan trọng để phê duyệt độ bền mối hàn bằng cách phát hiện các khuyết tật hàn và ngăn ngừa sự hình thành của chúng. Việc kiểm tra khuyết tật mối hàn là cần thiết để đảm bảo và kiểm soát chất lượng của mối hàn được tạo ra.



Hình 1. Sơ đồ hàn ma sát khuấy

Theo đó, có hai loại phương pháp đánh giá hoặc kiểm tra có thể được áp dụng để kiểm tra mối hàn, đó là đánh giá phá hủy và đánh giá không phá hủy. Việc đánh giá phá hủy các mối hàn như độ bền kéo, độ bền cắt, cấu trúc vi mô và độ bền uốn trong hầu hết các trường hợp nghiên cứu chuyên sâu là không thể thiếu để kiểm soát chất lượng nhưng chúng lại tốn kém, tổn thất vật liệu để kiểm tra và tốn nhiều thời gian và công sức thực hiện. Trong khi đó, kiểm tra bằng mắt thường, kiểm tra bằng chất thấm thấu màu, kiểm tra bằng hạt từ tính, siêu âm, dòng điện xoáy và tia X là các phương pháp không phá hủy thông thường và được ưa chuộng nhất trong các ngành công nghiệp.

3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM KHẢO SÁT

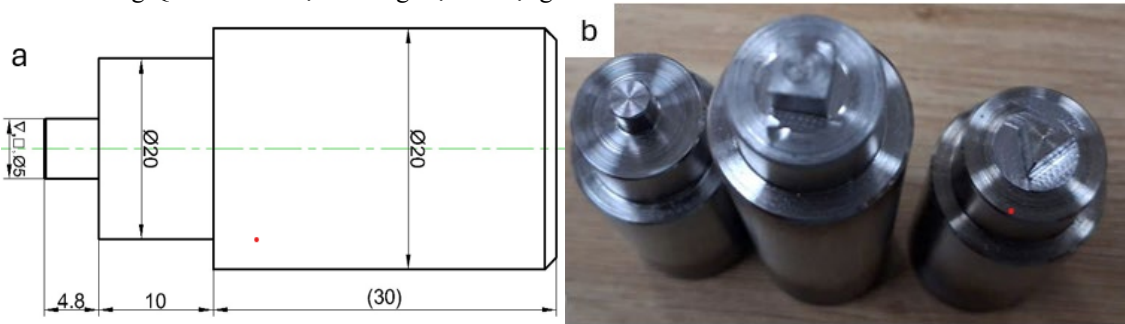
Quá trình hàn ma sát khuấy liên quan rất lớn đến sự chuyển động phức tạp của các hạt vật liệu và biến dạng dẻo kim loại. Các thông số của quá trình hàn và hình dạng dụng cụ ảnh hưởng đáng kể đến mô hình dòng chảy khuếch tán vật liệu và phân bố nhiệt độ cùng hàn, từ đó ảnh hưởng đến sự phát triển cấu trúc tế vi của vật liệu. Một thông số quan trọng không được đề cập trong nghiên cứu này là khoảng cách từ vai dụng cụ đến vật hàn, dùng để định vị khu vực làm việc và tiền đề sinh nhiệt trong quá trình hàn ma sát khuấy. Khoảng cách từ vai dụng cụ đến vật hàn hầu hết các tài liệu công bố trước đều chọn như nhau là $(0,1 \pm 0,2)$ mm. Trong bài báo này, một vài yếu tố chính ảnh hưởng đến quá trình FSW, chẳng hạn như hình dạng dụng cụ, thông số hàn,

thiết bị, vật liệu hàn và thử tải kéo với mỗi hàn bị khuyết tật được đề cập nghiên cứu và phân tích.

3.1. Thông số dụng cụ

Ở đây, chúng tôi khảo sát với dụng cụ khuấy là thép HSS có độ cứng 55HRC được sản xuất bởi Đài Loan – Trung Quốc và đã được thương mại hóa rộng

rãi, với ba mẫu dụng cụ khuấy khác nhau gồm: hình tròn, hình vuông và hình tam giác, trong đó bán kính góc bo của hình vuông và tam giác dưới 0,5mm. Các thông số các kích thước của dụng cụ này được tham khảo và tổng hợp từ các tài liệu nghiên cứu trước đó và được trình bày trên Hình 2.



Hình 2. Hình vẽ (a) và hình dạng thực tế (b) của dụng cụ FSW

3.2. Thông số hàn ma sát khuấy

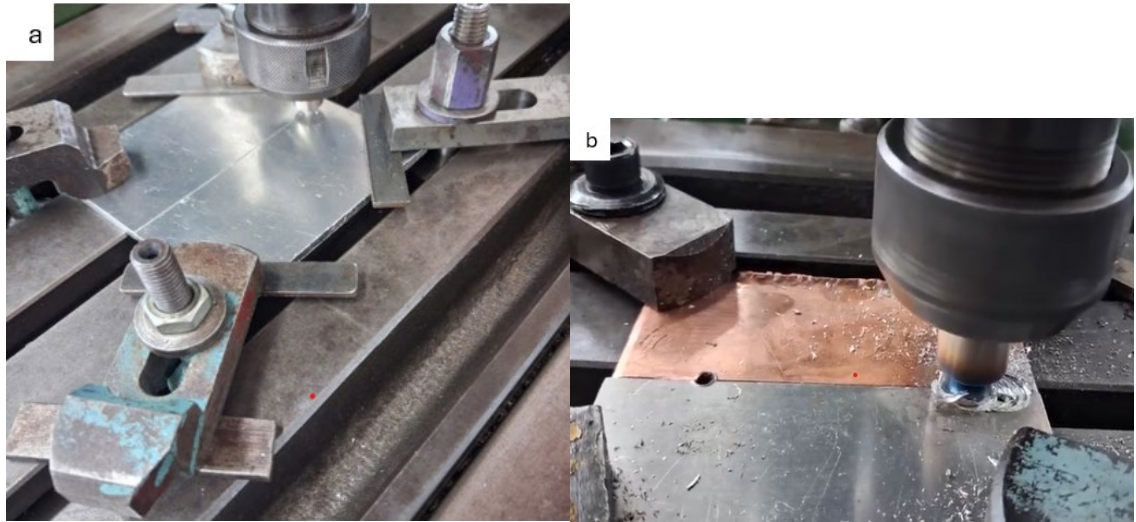
Đối với hàn ma sát khuấy, có rất nhiều thông số để khảo sát nhưng (Ashvinkumar & Amit, 2026) đã đề xuất hai thông số rất quan trọng là: tốc độ quay của dụng cụ (n , vòng/phút) và vận tốc di chuyển của dụng cụ (v , mm/min) dọc theo đường mối nối hàn. Sự quay của dụng cụ tạo ra sự khuấy trộn vật liệu xung quanh chốt quay và sự dịch chuyển của dụng cụ làm di chuyển vật liệu đã được khuấy trộn từ phía trước ra phía sau chốt và hoàn thành quá trình hàn. Tốc độ quay của dụng cụ cao thì ma sát sinh nhiệt lớn, dẫn đến sự khuấy trộn vật liệu mạnh mẽ hơn. Cơ sở lựa chọn thông số để khảo sát được phù hợp nhất (Ali et al., 2023). Các kết quả khảo sát với tốc độ vòng là: 600, 1.000 và 1.600 (vòng/phút) và lượng tiến dao là 50mm/phút. Và (Jupri et al., 2019) đã công bố tốc độ $n = 2.500$ (vòng/phút) và $v = 30$ (mm/phút), với thông số này thì hệ thống công nghệ xuất hiện độ rung động lớn có thể do hệ thống công

nghệ chưa đảm bảo độ cứng vững và đồng thời (Jinyoung et al., 2019) cũng công bố tốc độ $n = 700$ (vòng/phút) và $v = 150$ (mm/phút), thì với tốc độ này thì không đủ ma sát để sinh ra nhiệt nên chày không xuyên thủng được vật liệu hàn. Căn cứ vào các kết quả nghiên cứu trên, thí nghiệm được tiến hành với nhiều thông số khác nhau và cuối cùng thông số phù hợp nhất được lựa chọn để khảo sát là tốc độ quay của dụng cụ với năng lực máy hiện tại là $n = 1.875$ (vòng/phút) và vận tốc di chuyển của chày là $v = 20$ (mm/phút).

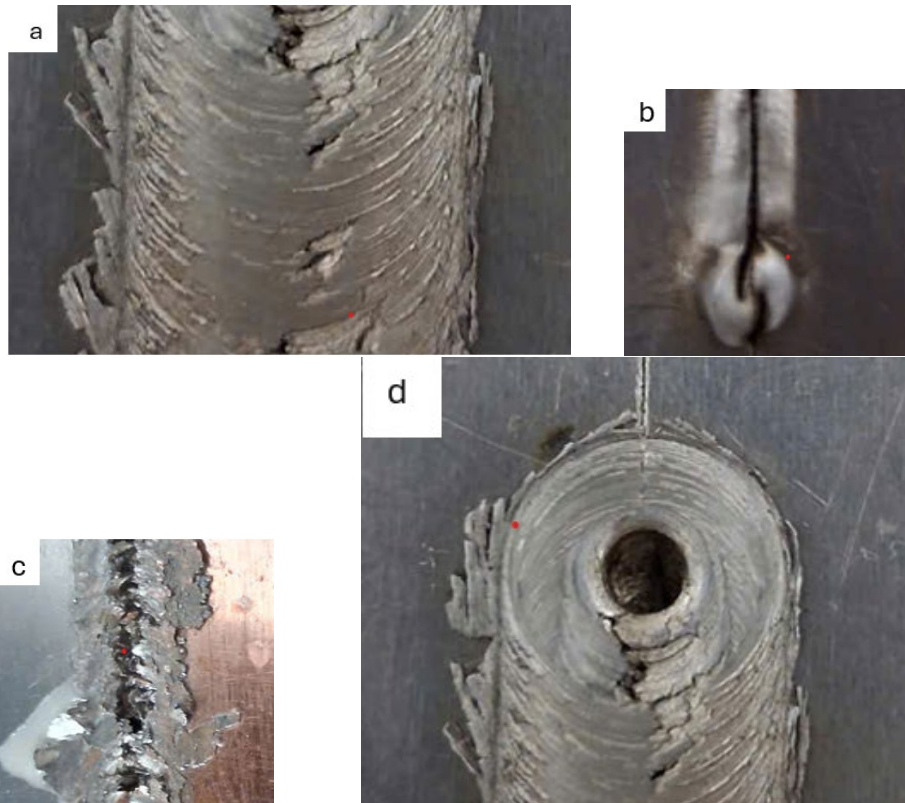
3.3. Thiết bị hàn

Thiết bị phục vụ quá trình hàn ma sát khuấy được thực hiện trên máy phay đứng truyền thống của hãng MANFORD được trình bày trên hình. Máy này có độ chính xác chưa cao nhưng độ cứng vững chấp nhận được cho nên có thể sử dụng để thử nghiệm quá trình hàn ma sát khuấy. Thiết bị này được minh họa trên Hình 3.





Hình 4. Sơ đồ thực nghiệm gá đặt mối hàn giáp mối cho hàn ma sát khuấy Al-Al (a) và AL-Cu (b)



Hình 5. Khuyết tật sau khi hàn ma sát khuấy Al-Al (a, b) và AL-Cu (c)

Ngoài ra, đảm bảo chất lượng không phải là một nhiệm vụ dễ dàng trong hàn ma sát khuấy, vì một số khuyết tật như liên kết cấu trúc, thiếu độ xuyên thấu, vết nứt nhỏ và liên kết tiếp xúc khó phát hiện bằng phương pháp kiểm tra không phá hủy. Do đó, việc cần tuân theo trong quá trình FSW là rất hữu ích để giảm thiểu hoặc loại bỏ khả năng hình thành khuyết

tật, tiết kiệm thời gian, tiền bạc và công sức. Ở đây, một số khuyết tật chính được đúc kết từ khảo sát thực nghiệm cần được làm rõ thêm đồng thời tham khảo tổng hợp từ các tác giả nghiên cứu trước đó là:

+ Lỗ hổng sâu kéo dài (Hình 5c): Đính quá nhiều vật liệu hàn vào chày hàn đặc biệt là hàn vật liệu không giống nhau.

+ Thiếu vật liệu lấp đầy: Khuyết tật chủ yếu do mất vật liệu hỗ trợ ở phía sau dụng cụ do lượng nhiệt đầu vào quá mức.

+ Các lỗ sâu, khoảng trống và đường hầm ở đáy mối hàn: Có thể do lượng nhiệt cung cấp không đủ và thiếu sự lưu thông vật liệu.

+ Các vết nứt tiếp xúc gần: Các vết nứt xuất hiện gần nhau, thường nằm ở chân mối hàn, chúng là các vật liệu thiếu liên kết hóa học và cơ học.

+ Dính chân hàn: Hiện tượng này xảy ra do nhiệt độ quá cao và thời gian tiếp xúc quá lâu dẫn đến phôi bị dính vào tấm đỡ dưới mẫu hàn.

+ Ba via vụn và dây xuất hiện: Kết cấu vai dụng cụ và chiều sâu tiếp xúc của vai với tấm chưa hợp lý.

+ Bề mặt gợn sóng kéo dài (Hình 5a): Xem lại vận tốc hàn và độ sâu tiếp xúc của vai.

+ Mối hàn không toàn mỹ: Do sự hiện diện của tạp chất trên bề mặt và các cạnh của phôi vì không có bước làm sạch các bề mặt này trước khi thực hiện quy trình hàn ma sát khuấy.

+ Hiện tượng hình thành khuyết tật lõm và làm mỏng vật liệu: Chủ yếu do nhiệt độ không đồng nhất gây ra bởi lực dọc trục quá lớn.

+ Không ngấu phần chân mối hàn (Hình 5b) hoặc vết nứt do khuyết tật chân mối hàn: Không có tấm lót ở đáy mẫu hoặc bắt đầu từ đáy của phôi tại các bề mặt không bằng phẳng hướng về phía vùng khuấy hàn.

+ Không có vật liệu điền đầy lỗ khi thoát chày ra khỏi vật hàn (Hình 5d).

+ Quá trình oxy hóa có thể xảy ra do nhiệt độ cao khi không có lớp khí bảo vệ trong quá trình hàn ma sát khuấy.

Mặc dù, hàn FSW dễ xảy ra nhiều khuyết tật nhưng nó vẫn là một công nghệ tiên tiến đang được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong nước và trên thế giới. Không những ứng dụng nhiều trong vật liệu khó hàn mà còn làm thay đổi cấu trúc hạt bên trong của vật liệu, làm tăng độ bền cơ tính và tính chống ăn mòn của nó trong môi trường y sinh.

4. THẢO LUẬN VÀ ĐÁNH GIÁ

Hàn ma sát khuấy giữa hai tấm kim loại giống nhau được sử dụng phổ biến và ít khuyết tật. Hầu như chỉ cần thiết bị và chọn thông số hàn thích hợp thì có thể hàn được. Tuy nhiên, hàn FSW cho hai vật liệu khác nhau như: hàn Al và Cu, thì rất dễ xảy ra

khuyết tật. Thậm chí, chúng không liên kết được với nhau. Chính vì vậy, để hàn được vật liệu không giống nhau thì chúng ta thay đổi kết cấu vật hàn, thêm vật liệu thứ yếu vào vùng hàn, sử dụng gia nhiệt hoặc làm mát cục bộ,... Hàn hai vật liệu khác nhau giữa Al và Cu, đã được nghiên cứu bởi nhóm tác giả trong tài liệu (Mehta et al., 2016) bằng cách thay đổi độ lệch của chốt nên được đặt về phía tấm Al để ngăn ngừa mất nhiệt trong quá trình hàn, vì hệ số giãn nở nhiệt cao hơn của Cu có thể lấy đi một lượng nhiệt nhỏ hơn so với Al, từ đó giúp phân bố ứng suất nhiệt một cách thích hợp và làm cho dòng hỗn hợp chảy trơn tru. Vì vậy, luồng vật liệu khuấy chịu ảnh hưởng rất lớn bởi thiết kế dụng cụ khuấy. Hiện tại chúng tôi vẫn đang tiếp tục đầu tư, nghiên cứu và triển khai hàn hai vật liệu khác nhau và được trình bày trong báo cáo khoa học tiếp theo.

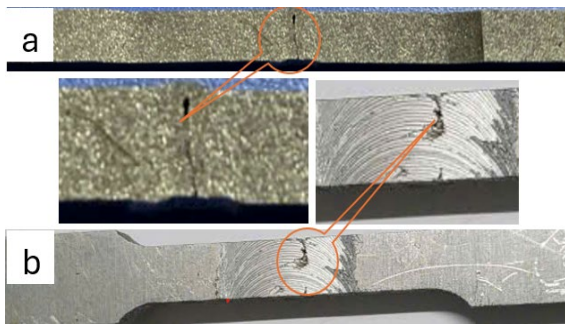
Trong quá trình khảo sát hàn ma sát khuấy, đầu chày hàn được khảo sát với ba loại là: tròn, vuông, tam giác. Tuy nhiên, sau khi thí nghiệm thì kết cấu đầu chày vuông và tam giác bị dính vật liệu hàn. Hiện tượng dính này gần giống như hiện tượng “leo dao” trong tiện kim loại. Lớp vật liệu này rất cứng và dính chặt vào đầu chày được mô tả ở Hình 6.



Hình 6. Đầu chày bị dính vật liệu hàn

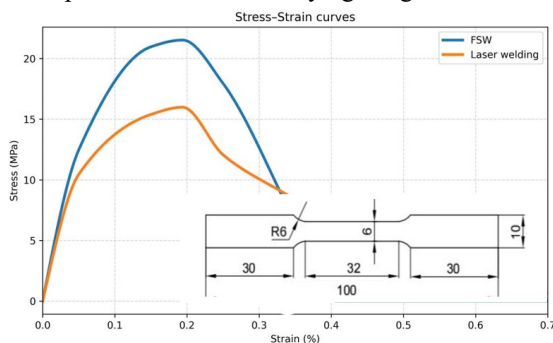
Lớp dính đầy chày này cũng có thể là nguyên nhân gây ra sự không đồng nhất trong cấu trúc tế vi ở mối hàn, làm giảm độ bền mối hàn. Muốn khảo sát chính xác vấn đề này thì phải dùng máy SEM để phân tích đánh giá.

Để đánh giá độ bền của mối hàn ma sát bị khuyết tật, thử kéo của mối hàn ma sát khuấy khuyết tật ngẫu không đều và so sánh với mẫu hàn Laser. Khuyết tật vĩ mô ở đây được quan sát bằng mắt và mang tính cảm tính nhiều; chiều dài khuyết tật được đo ước lượng bằng thước cặp và phần cấu trúc vi mô bên trong mối hàn chưa được khảo sát kỹ vì hiện tại nhóm nghiên cứu chưa có thiết bị phù hợp. Mẫu kéo được chế tạo theo tiêu chuẩn ASTM B557M-15, được trình bày trên Hình 7.



Hình 7. Mẫu bị khuyết tật khi hàn Laser (a) và FSW (b)

Kết quả về độ bền kéo được trình bày trên Hình 8. Từ kết quả này, dù bị khuyết tật nhưng độ bền kéo của FSW có thể tốt hơn so với mối hàn laser. Mặc dù sự so sánh này chỉ mang tính tương đối vì hàn laser phụ thuộc nhiều vào tay nghề người hàn.



Hình 8. Mối quan hệ giữa độ bền kéo của hàn FSW khuyết tật và hàn Laser

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Akinlabi, E. T., & Mahmood, R. M. (2020). Introduction to Friction Welding, Friction Stir Welding and Friction Stir Processing. *Springer Nature Link*. 1-12.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-37015-2_1
- Ali, M., Amir, A-Z., Sina, E., Tohis, S., Jing, T. W. (2023). The effects of friction stir welding on microstructure and formability of 7075-T6 sheet. *J. Result and Engineering*, 18, 101041
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101041>
- Ashvinkumar, K., Amit, G. (2026). Review: Friction Stir Welding Process and Process Parameters. *J. Scientific Research in Mechanical and Materials Engineering*, 10(1), 12-25.
<https://doi.org/10.32628/IJSRMME261012>
- Cater, S. (2013). Forge welding turns full circle: friction stir welding of steel. *Ironmak. Steelmak*, 40(7), 490-495.
<https://doi.org/10.1179/0301923313Z.000000000224>
- Debtanay, D., Swarup, B., Sukhomay, P., Abhay, S. (2023). Material Defects in Friction Stir Welding through Thermo-Mechanical Simulation: Dissimilar Materials with Tool Wear Consideration. *J. Materials*, 16(1), 301.
<https://doi.org/10.3390/ma16010301>
- Jinyoung, Y., Cheolhee, K., Seun, R. (2019). Performance of plunge depth control methods during friction stir welding. *J. Materials*, 9(3), 283.
<https://doi.org/10.3390/met9030283>
- Jupri., Jon A., Devi C., Mochamad A. (2019). mechanical and microstructure properties on Al-Cu joint processed by friction stir welding: The effect of tilt angle tool. *J. Material Science Research India*, 16(1), 56-61.
<http://dx.doi.org/10.13005/msri/160108>
- Gibson, B. T., Lammlin, D. H., Prater, T. J., Longhurst, W. R., Cox, C. D., Ballun, M. C. (2014). Friction stir welding: process,

Tóm lại, để giám sát đầy đủ các thông số trong quá trình hàn FSW bằng thực nghiệm, phải có nhiều trang thiết bị hiện đại và thực hiện trên nhiều mẫu. Đây cũng là một trong những hạn chế khi nghiên cứu về chất lượng hàn ma sát.

5. KẾT LUẬN

Nếu mong muốn ít xảy ra khuyết tật khi hàn FSW thì bất kỳ khâu nào trong quá trình hàn cũng cần được chuẩn bị và xem xét cẩn thận. Để xây dựng được một mô hình tổng thể, hầu hết các nghiên cứu không báo cáo về thiết kế dụng cụ và tất cả các điều kiện quy trình hàn. Vì vậy, kết quả nghiên cứu của các nhóm tác giả khác nhau và không dễ nhận biết chính xác. Thực nghiệm được thực hiện để đánh giá khuyết tật thường xảy ra khi hàn ma sát khuấy tại xưởng cơ khí Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh (HCMUTE) và nhận thấy rằng các khuyết tật này phù hợp với các tác giả trước. Có rất nhiều thông số rất quan trọng trong hàn ma sát khuấy, tuy nhiên có hai thông số quan trọng được khảo sát là tốc độ quay của dụng cụ và vận tốc chạy là 1.875 (vòng/phút) và 20 (mm/phút) là phù hợp và dùng để tham khảo. Đồng thời, sau khi thử kéo với các mẫu khuyết tật tương đương nhau thì mối hàn FSW bị khuyết tật có thể tốt hơn mối hàn đã thương mại hóa. Hiện tại quy trình này được tiếp tục đầu tư nghiên cứu hoàn thiện đồng thời kết hợp với phương pháp gia công khuấy ma sát (Friction stir processing - FSP) đã được phát triển để điều chỉnh cấu trúc vi mô của vật liệu kim loại. Vì thay đổi cấu trúc vi mô hạt sẽ nâng cao được chất lượng mối hàn.

- automation, and control. *J. Manuf Process*, 16, 56–73.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.04.002>
- Kishan, F., Vishvesh, B., Ankit, D. O., Chander, P., Dharam, B., Saurav, D., & Vatin, N. I. (2022). Microstructure and Mechanical Properties Analysis of Al/Cu Dissimilar Alloys Joining by Using Conventional and Bobbin Tool Friction Stir Welding. *Materials*, 15(15) 519, 1-12.
<https://doi.org/10.3390/ma15155159>
- London, B., Mahoney, M., Bingel, B., Calabrese M., Waldron, D., (2001). High Strain Rate Superplasticity in Thick Section 7050 Aluminum Created by Friction Stir Process, *Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding*, Kobe, Japan.
- Mehta, K. P., & Badheka, V. J. (2016). A review on dissimilar friction stir welding of copper to aluminum: process, properties, and variants. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(3), 233-254.
<https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1025971>
- Mishra, R. S., & Ma, Z. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials science and engineering: R: reports*, 50(1-2) 1-78.
<https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
- Morisada, Y., Imaizumi, I., Fujii, H. (2015). Clarification of material flow and defect formation during friction stir welding. *Sci. Technol. Weld. Join*, 20(2), 130–137.
<https://doi.org/10.1179/1362171814Y.0000000266>
- Rhodes, C. G., Mahoney, M. W., Bingel, W. H., Spurling, R. A., Bampton, C. C. (1997). Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. *Scripta mater*, 36, 69-75.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(96\)00344-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(96)00344-2)
- Shalok, B., Sudhir, K., Inderjeet, S., Dinesh, K. (2024). A review of recent developments in friction stir welding for various industrial applications. *J. J. Mar. Sci. Eng.* 12(1), 71
<https://doi.org/10.3390/jmse12010071>
- Wayne, M. T., Edward, D. N., James, C. N., Michael, G. M., Peter, T.S., Christopher, J. D. (1995). Friction welding. *International patent application no. US5460317A*.
<https://patents.google.com/patent/US5460317A/en>
- Yongxian, H., Yuming, X., Xiangchen, M. (2024). Friction Stir Welding and Processing. *Springer, Singapore*.
https://doi.org/10.1007/978-981-99-8688-0_1