

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC NHA TRANG**

HỒ HỮU HUY

**NGHIÊN CỨU ĐỘ BỀN VÀ CƠ CHẾ PHÁ HỦY CỦA
MỐI HÀN MA SÁT GIỮA HỢP KIM NHÔM AA6061-T6
VỚI THÉP KHÔNG GỈ SUS316**

Ngành đào tạo: Kỹ thuật cơ khí

Mã số: 9520103

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

KHÁNH HÒA - 2025

Công trình được hoàn thành tại Trường Đại học Nha Trang

Người hướng dẫn khoa học: 1. PGS.TS.Trần Hưng Trà
2. PGS.TS.Dương Đình Hảo

Phản biện 1: PGS.TS.Đặng Quốc Khánh

Phản biện 2: PGS.TS.Vũ Công Hòa

Luận án được bảo vệ tại Hội đồng đánh giá luận án cấp trường họp tại Trường Đại học Nha Trang vào hồi 14 giờ, ngày 17 tháng 05 năm 2025.

Có thể tìm hiểu luận án tại: Thư viện Quốc gia và Thư viện Trường Đại học Nha Trang.

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài nghiên cứu FSW giữa AA6061 và SUS316

AA6061-T6 và SUS316 theo tiêu chuẩn Nhật Bản JIS là những vật liệu có tính ứng dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp gồm hàng không vũ trụ, tàu thủy, kết cấu hàng hải, ô tô, xây dựng và chế tạo máy. Việc nghiên cứu hàn giữa hai vật liệu giúp cải thiện chất lượng và hiệu quả cho các ngành công nghiệp này.

Tối ưu hóa kết cấu: AA6061-T6 có trọng lượng nhẹ và độ bền cao, trong khi đó SUS316 có khả năng chống ăn mòn và chịu nhiệt tốt. Kết hợp ưu điểm của hai vật liệu có thể tạo ra các cấu trúc mối hàn có tính năng vượt trội.

Giải quyết thách thức trong liên kết giữa hai vật liệu khác loại: Hàn hai vật liệu AA6061-T6 và SUS316 là một thách thức kỹ thuật lớn do sự khác biệt lớn về tính chất vật lý và hóa học. Nhôm có nhiệt độ nóng chảy thấp, dễ oxy hóa. Trong khi đó, thép không gỉ có khả năng chống oxy hóa tốt nhưng khó hàn với nhôm. Nghiên cứu giúp giải quyết các vấn đề kỹ thuật trong quá trình hàn. Từ đó, nâng cao chất lượng mối hàn và độ bền của sản phẩm.

Đóng góp cho học thuật: Hiện nay, có rất ít công trình nghiên cứu chi tiết về cơ chế phá hủy do tác dụng lực và cơ chế ăn mòn mối hàn AA6061-T6/SUS316 trong các môi trường khác nhau. Việc nghiên cứu sâu về đề tài này không chỉ đóng góp vào kiến thức khoa học mà còn cung cấp cơ sở lý thuyết và thực tiễn cho việc thiết kế, chế tạo các sản phẩm hàn chất lượng cao.

Góp phần phát triển kinh tế và bảo vệ môi trường: Hiểu rõ hơn cơ chế ăn mòn của mối hàn giúp tăng cường khả năng chống ăn mòn, kéo dài tuổi thọ và giảm chi phí bảo trì. Điều này không chỉ mang lại lợi ích kinh tế mà còn góp phần bảo vệ môi trường và tăng cường an toàn cho các ứng dụng trong công nghiệp.

Đóng góp cho phát triển và ứng dụng hàn công nghệ mới: Nghiên cứu này có thể mở ra hướng đi mới trong công nghệ hàn, đặc biệt trong việc phát triển kỹ thuật hàn tiên tiến như FSW. Kết quả nghiên cứu có thể được ứng dụng vào việc phát triển các quy trình hàn mới hiệu quả hơn.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu của đề tài: Xác định cơ chế phá hủy của mối hàn ma sát giữa hợp kim nhôm AA6061-T6 và thép không gỉ SUS316 được chế tạo bởi các tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép chót và chiều dài chót hàn khác nhau. Ngoài ra, sự phá hủy của mối

hàn do bị ăn mòn dưới tác động của các môi trường làm việc thực tế khác nhau cũng được làm rõ.

3. Đối tượng nghiên cứu

- Ảnh hưởng các thông số hàn đến độ cứng tế vi, lực kéo và cơ chế phá hủy mối hàn chồng FSW AA6061-T6/SUS316.

- Cơ chế ăn mòn mối hàn trong các môi trường ăn mòn khác nhau.

4. Phạm vi nghiên cứu

- Hàn chồng FSW giữa tấm AA6061-T6 với chiều dày 3,0 mm và tấm SUS316, dày 1,0 mm.

- Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số hàn gồm: tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép chót và chiều dài chót hàn đến cấu trúc tế vi, cơ tính và cơ chế phá hủy mối hàn.

- Nghiên cứu ảnh hưởng của các môi trường ăn mòn khác nhau gồm: %NaCl, %NaCl + hiệu điện thế, %NaCl + hiệu điện thế + nhiệt độ đến quá trình ăn mòn mối hàn.

5. Phương pháp nghiên cứu

5.1. Nghiên cứu lý thuyết

Tổng hợp các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước đã công bố làm cơ sở để kế thừa và tiếp cận các nội dung liên quan đến đề tài.

5.2. Nghiên cứu thực nghiệm

- Thực nghiệm chế tạo mối hàn, kiểm tra cấu trúc, độ bền kéo, độ cứng tế vi, ăn mòn mối hàn trong các môi trường khác nhau, gồm:

- Chế tạo mối hàn FSW giữa AA6061-T6 và SUS316 tại phòng thí nghiệm hàn ma sát trường Đại học Nha Trang.

- Chế tạo mẫu theo tiêu chuẩn ASTM phục vụ cho khảo sát cấu trúc, kiểm tra độ cứng tế vi mối hàn.

- Xác định cấu trúc vùng hàn gồm: cấu trúc hạt, chiều dày lớp IMC, chiều dày lớp khuếch tán, hình thái bề mặt tiếp giáp giữa AA6061-T6 và SUS316.

- Thực nghiệm mối hàn trong các môi trường ăn mòn khác nhau gồm: %NaCl, %NaCl + hiệu điện thế, %NaCl + hiệu điện thế + nhiệt độ đến quá trình ăn mòn.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

6.1. Ý nghĩa khoa học

Đóng góp học thuật trong lĩnh vực hàn hai hợp kim khác loại: Mối hàn đạt chất lượng tối ưu tương ứng với thông số hàn giúp hiểu rõ quá trình hình thành mối hàn,

tương tác giữa các thành phần hóa học và vật lý giữa AA6061-T6 và SUS316, đóng góp quan trọng cho khoa học vật liệu.

Góp phần phát triển kỹ thuật vật liệu mới: Nghiên cứu, phân tích cơ chế hàn ma sát khuấy giữa AA6061-T6 và SUS316 có thể dẫn đến sự phát triển và cải tiến kỹ thuật hàn mới. Những kỹ thuật này có thể được áp dụng nhiều lĩnh vực công nghiệp, giúp nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả sản xuất.

Phân tích cơ chế ăn mòn và tiền đề để phòng chống: Nghiên cứu cơ chế ăn mòn mối hàn trong các môi trường ăn mòn khác nhau (NaCl, hiệu điện thế, nhiệt độ) giúp hiểu rõ hơn về cơ chế ăn mòn điện hóa và cách phòng chống. Điều này cung cấp kiến thức cần thiết để phát triển phương pháp bảo vệ ăn mòn khi mối hàn AA6061-T6/SUS316 hoạt động trong các môi trường ăn mòn. Từ đó, tăng độ bền và tuổi thọ các sản phẩm FSW.

Cơ sở khoa học cho các công trình nghiên cứu tiếp theo: Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở dữ liệu khoa học chi tiết về tính chất cơ học, hóa học và vi cấu trúc của mối hàn AA6061-T6/SUS316. Dữ liệu có thể sử dụng làm tài liệu tham khảo cho các nghiên cứu sau này và ứng dụng trong thực tiễn công nghiệp.

6.2. Ý nghĩa thực tiễn

Góp phần nâng cao hiệu quả chế tạo: Kỹ thuật FSW có thể được áp dụng trong các dây chuyền công nghệ để chế tạo các sản phẩm đạt chất lượng tốt hơn với chi phí thấp. FSW giữa AA6061-T6 và SUS316 có thể được áp dụng trong các ngành hàng không, vũ trụ hoặc ngành ô tô để giảm khối lượng xe và cải thiện hiệu suất nhiên liệu.

Góp phần phát triển các sản phẩm công nghệ cao: Kết quả nghiên cứu có thể được áp dụng trên các sản phẩm công nghệ cao như thiết bị y tế, các bộ phận điện tử, các sản phẩm tiêu dùng cao cấp... nơi yêu cầu tính thẩm mỹ và hiệu suất cao.

Tiết kiệm nguyên liệu và năng lượng: Kỹ thuật FSW cho phép sử dụng năng lượng thấp, không sử dụng que hàn, khí, thuốc bảo vệ. Kỹ thuật hàn hiệu quả giúp giảm lượng vật liệu bị lãng phí và tiêu thụ năng lượng, từ đó giảm chi phí sản xuất.

Cải thiện độ an toàn và tin cậy của sản phẩm: Nghiên cứu cơ chế ăn mòn giúp đảm bảo độ an toàn và tin cậy các sản phẩm hàn hoạt động trong môi trường khắc nghiệt như kết cấu hàng không vũ trụ, hàng hải.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

1.1. Phương pháp liên kết hợp kim nhôm và thép

Hiện nay, có nhiều phương pháp hàn đang sử dụng để liên kết các hợp kim với nhau, bao gồm: hàn hồ quang, hàn điện có khí bảo vệ, hàn điện dưới lớp thuốc bảo vệ, hàn điện trở và nhiều phương pháp khác.

Giảm thiểu trọng lượng của thiết bị, kết cấu là mục tiêu hàng đầu của các lĩnh vực công nghệ. Sự khác biệt rất lớn về tính chất hóa học, vật lý nên liên kết giữa nhôm và thép chưa ổn định, đặc biệt nhôm và thép khó liên kết thành công bằng phương pháp hàn nóng chảy truyền thống. Hiện nay, các nhà nghiên cứu đã sử dụng phương pháp FSW để chế tạo mối liên kết giữa hợp kim nhôm và thép.

1.2. Tiềm năng của công nghệ FSW

Công nghệ FSW là một trong những kỹ thuật hàn ở trạng thái rắn. Hàn FSW đã và đang nổi lên như một công nghệ vượt trội để hàn hợp kim nhôm và thép với độ bền và tuổi thọ cao. Đến thời điểm hiện nay, một số nghiên cứu trong nước cũng chỉ dừng lại trong việc chế tạo mối hàn FSW giữa các hợp kim nhôm. Mai Đăng Tuấn (2019) thử nghiệm hàn FSW giáp mí AA6061. Dương Đình Hảo và cộng sự (2015) đã thử nghiệm các thông số hàn ảnh hưởng đến nhiệt độ và cấu trúc tế vi mối hàn AA7075-T6. Phan Thanh Nhân và cộng sự (2019) đã chế tạo thành công mối hàn FSW chữ T của AA5083.

Trên thế giới, liên kết giữa hợp kim nhôm với thép bằng kỹ thuật hàn ma sát đã và đang được nghiên cứu, ứng dụng khá nhiều. FSW đang được ứng dụng hàn các hợp kim khác nhau mà phương pháp hàn nóng chảy truyền thống chưa thực hiện được. Số lượng lớn các công trình nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ quay dụng cụ, vận tốc hàn, chiều sâu ép chốt đến cấu trúc tế vi và cơ tính của mối hàn giữa hợp kim nhôm và thép. Hơn nữa, tốc độ quay, vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt còn ảnh hưởng đến sự hình thành lớp IMC, lớp khuếch tán. Sự hình thành lớp IMC được quan sát hầu hết trên mối hàn vật liệu khác nhau do các nguyên tố kim loại khuếch tán lẫn nhau. Xác định mối tương quan giữa tốc độ quay, vận tốc hàn để mối hàn đạt được cơ tính tốt là cần thiết.

1.3. Vai trò của hợp kim nhôm và thép không gỉ trong kỹ thuật

1.3.1. Hợp kim nhôm

Hợp kim nhôm nhẹ, mềm, màu xám bạc mờ và có khả năng chống oxy hóa tốt. Đặc tính oxy hóa của nhôm hình thành lớp Al_2O_3 trên bề mặt, giúp tăng khả năng chống

ăn mòn trong khí quyển. Hợp kim nhôm nhóm 2xxx được ứng dụng trong ngành hàng không, giao thông vận tải và dụng cụ thể thao. Hợp kim nhôm nhóm 5xxx là nhóm có độ bền và chống ăn mòn tốt nhất trong các nhóm hợp kim nhôm không hóa bền bằng nhiệt luyện, được ứng dụng nhiều vào các lĩnh vực đóng tàu, vận tải, bồn áp lực và cầu đường. Hợp kim nhôm nhóm 6xxx và 7xxx được sử dụng để gia công các chi tiết chịu tải trọng lớn, làm việc trong môi trường độ ẩm cao như máy bay, tên lửa và các thiết bị hàng không. Hầu hết hợp kim nhôm đều khó liên kết bằng phương pháp hàn, đặc biệt các hợp kim nhôm nhóm 2xxx và nhóm 7xxx. Hiện nay, phương pháp hàn ma sát được xem là giải pháp hữu hiệu để hàn tất cả các hợp kim nhôm.

1.3.2. Thép không gỉ

Thép không gỉ là thép thường có hàm lượng crom ít nhất 10,5 %, bổ sung thêm niken. Thép không gỉ ferritic thường được sử dụng trong kiến trúc, dụng cụ sinh hoạt gia đình. Thép không gỉ chịu được axit và không co giãn ở nhiệt độ lên đến 1100 °C, là vật liệu phổ biến cho các ứng dụng khác nhau trên giàn khoan dầu. Ngoài ra, thép không gỉ được chế tạo thiết bị vận tải và bảo quản khí hóa lỏng, chịu nhiệt độ -196 °C. Với khả năng chống ăn mòn nên được chế tạo khung nền cho hệ thống pin năng lượng mặt trời.

1.4. Một số kỹ thuật liên kết giữa hợp kim nhôm với thép không gỉ

Các phương pháp liên kết giữa nhôm và thép đang được áp dụng hiện nay gồm: hàn laser, hàn điện trở, đinh tán và hàn ma sát khuấy được sử dụng. Bằng phương pháp hàn MIG, mối hàn chồng giữa nhôm và thép không gỉ bị rỗ, không liên kết đều nên cần chọn hiệu điện thế và vật liệu phụ trợ phù hợp thì mối hàn đạt được độ bền cao nhất có thể.

Để hạn chế hình thành lớp IMC giòn, đã áp dụng phương pháp hàn trạng thái rắn như hàn điểm điện trở, hàn laser và hàn siêu âm. Nhược điểm của hàn điểm điện trở gồm năng lượng tiêu thụ và độ mài mòn điện cực. Hàn laser và hàn siêu âm có nhiều ưu điểm như không yêu cầu vật liệu phụ bổ sung, chu trình hàn ngắn và tiêu thụ năng lượng thấp, dễ tự động hóa. Tuy nhiên, hàn laser giữa nhôm và thép hình thành lớp liên kết kim loại dày nên gây bất lợi cho mối hàn và không thể áp dụng cho các tấm mỏng. Hàn ma sát khuấy và hàn ma sát áp lực thể hiện sự hòa trộn hợp kim tốt nên độ bền kéo cao hơn hàn MIG.

Hiện nay các công trình nghiên cứu hàn FSW giữa AA6061-T6 và SUS316 còn nhiều hạn chế, cụ thể:

- Trong nước: Hàn FSW giữa AA6061-T6 và SUS316 là bài toán hoàn toàn mới và chưa được nghiên cứu.

- Nước ngoài: Công trình nghiên cứu hàn chồng hợp kim nhôm và thép không gỉ bằng phương pháp hàn MIG. Kết quả, mối hàn gồ ghề, ít ngấu, độ bền mối hàn đạt 20 % độ bền hợp kim nhôm ban đầu. Mối hàn đạt độ bền cao hơn, xấp xỉ 50 % hợp kim nhôm bằng phương pháp hàn chồng ma sát áp lực nhưng mối hàn không thẳng và nhiều xỉ. Mahto R.P. và cộng sự (2016) nghiên cứu cấu trúc vi mô mối hàn AA6061/AISI304, xuất hiện hợp chất Fe_2Al_5 , Fe_4Al_{13} . Newishy M. và cộng sự (2023) nghiên cứu cấu trúc vi mô mối hàn AA6061/SUS316, xuất hiện hợp chất $FeAl_3$ và $FeAl_6$ của lớp IMC. Kích thước hạt thép trong AA6061 lớn, đạt 6 μm . Zheng Q. và cộng sự (2016) nghiên cứu độ bền mối hàn chồng AA6061/SUS316 với vật liệu phụ trợ là tấm lót Zn. Zn hạn chế hình thành lớp IMC, độ bền mối hàn đạt 28 % hợp kim nhôm ban đầu. Xingbin H. và cộng sự (2024) ủ nhiệt SUS316 đến 800 °C. Kết quả độ bền mối hàn giáp mí AA6061/SUS316 tăng xấp xỉ 14,5 % vì chiều dày hợp chất liên kim giòn $FeAl_3$ của lớp IMC nhỏ.

Số lượng các công trình nghiên cứu FSW giữa AA6061-T6 và SUS316 trên thế giới rất ít. Các công trình tập trung nghiên cứu ảnh hưởng các hợp chất của lớp IMC đến độ bền mối hàn, chưa đi sâu vào cơ chế phá hủy. Vì vậy, mục tiêu đề tài “Nghiên cứu độ bền và cơ chế phá hủy của mối hàn ma sát giữa AA6061-T6 với SUS316”.

1.5. Ứng dụng mối hàn giữa thép không gỉ với hợp kim nhôm

Giảm trọng lượng nhằm mục đích tiết kiệm nhiên liệu, giảm khí thải CO_2 là mối quan tâm hàng đầu của các hãng ô tô hiện nay. Hợp kim nhôm kết hợp với thép không gỉ trong thân tàu và các cấu trúc, bộ phận khác để tăng cường khả năng chống ăn mòn từ nước biển và giảm trọng lượng. Bên cạnh đó, sự kết hợp giữa hợp kim nhôm và thép không gỉ giúp tối ưu hóa cấu trúc khung và vỏ máy bay, giảm trọng lượng tổng thể và tăng cường độ bền. Các chi tiết trang trí nội thất như lan can, cửa và các bộ phận, kết cấu nhẹ khác sử dụng tấm lưỡng kim nhôm/thép mang lại tính thẩm mỹ, độ bền và giảm giá thành sản phẩm. Thiết bị chế biến thực phẩm sử dụng sự kết hợp giữa hợp kim nhôm và thép không gỉ để đảm bảo tính vệ sinh, chống ăn mòn và độ bền. Thiết bị gia dụng như nồi, chảo và các dụng cụ nhà bếp khác sử dụng sự kết hợp giữa hợp kim nhôm và thép không gỉ mục đích đảm bảo độ bền, khả năng chống ăn mòn, dễ dàng vệ sinh và giảm giá thành sản phẩm. Kết cấu hỗn hợp nhôm/thép còn được ứng dụng trong lĩnh vực sản xuất năng lượng. Ngoài ra, thiết bị y tế như: bàn mổ, giường bệnh và các dụng cụ y

tế khác được sản xuất từ sự kết hợp giữa hợp kim nhôm và thép không gỉ nhằm đảm bảo tính chống ăn mòn, dễ vệ sinh và độ bền cao.

1.6. Những thách thức khi hàn giữa thép không gỉ và hợp kim nhôm

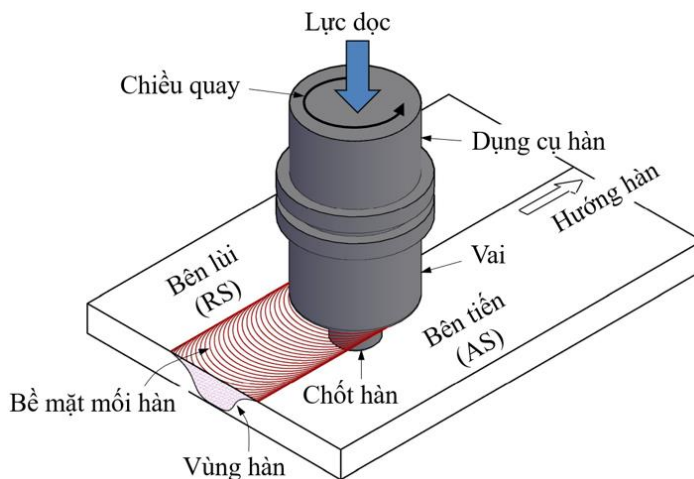
Nhiệt độ nóng chảy hai hợp kim chênh lệch khá lớn nên hệ số giãn nở nhiệt khác nhau. Cấu trúc mạng tinh thể của hai kim loại đa dạng nên khó liên kết ổn định với nhau bằng phương pháp hàn nóng chảy thông thường. Bên cạnh đó, vùng tiếp giáp của mối hàn giữa nhôm với thép không gỉ dễ sinh ra các hợp chất IMC giòn như FeAl_2 , FeAl_3 , Fe_2Al_5 ... dẫn đến hình thành vết nứt mối hàn. Màng oxit Al_2O_3 khi chịu nhiệt ma sát dễ hình thành trên bề mặt hợp kim nhôm. Al_2O_3 dưới tác dụng nhiệt độ cao tạo thành lớp oxit nên cơ tính mối hàn giảm. Hơn nữa, lớp IMC không đồng nhất được hình thành do phân bố năng lượng không đồng đều và tốc độ hàn tương đối thấp khi hàn hồ quang. Khi hàn nóng chảy, mối hàn nhiều khuyết tật như: rỗ xỉ, nứt nóng, nứt nguội, vùng hàn bị giòn, ứng suất dư và biến dạng khá lớn... dẫn đến độ bền và tuổi thọ mối hàn thấp. Bên cạnh đó, hàn nóng chảy tiêu hao điện năng, chất trung gian, chất thải. Khói hàn có khả năng gây bệnh cho người lao động, ô nhiễm môi trường.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Tổng quan về kỹ thuật FSW

2.1.1. Nguyên lý FSW

Hàn ma sát khuấy với nguyên lý cơ bản: dụng cụ hàn xoay, chịu lực hướng trục nên từ từ tiếp xúc và thâm nhập vào phôi để hình thành nhiệt ma sát (Hình 2.1).



Hình 2.1. Sơ đồ mô tả quá trình FSW

Dụng cụ hàn xuyên vào phôi làm biến dạng dẻo ở vùng khuấy do đó làm thay đổi cấu trúc vật liệu hàn. Sự di chuyển dọc theo hướng hàn của dụng cụ sẽ hình thành mối hàn dọc theo đường hàn. Dụng cụ hàn vừa có chức năng tạo nhiệt cho phôi, vừa di chuyển và ép vật liệu để tạo mối hàn, đồng thời ngăn vật liệu hàn không bị trôi ra khỏi vai dụng cụ. Hàn ma sát khuấy có thể được thực hiện cho nhiều loại mối hàn khác nhau như hàn giáp mí, hàn chồng, hàn chữ T...

2.1.2. Ưu, nhược điểm của kỹ thuật FSW

2.1.2.1. Ưu điểm

- Không cần vật liệu phụ trợ, không cần khí hay thuốc bảo vệ mối hàn. FSW giúp tiết kiệm năng lượng, không tạo ra khói, tán xạ và tia hồ quang.
- Mối hàn ít biến dạng, ít ứng suất dư và ít khuyết tật. Chiều dày lớp IMC tại mặt tiếp giáp nhỏ hơn so với phương pháp hàn nóng chảy.
- Hàn được các hợp kim khác nhau cho kết quả độ bền và tuổi thọ vượt trội.

2.1.2.2. Nhược điểm

- Lực ép dọc trục lớn nên bộ máy, đồ gá chi tiết hàn phải cứng vững và bền. Khó khăn hàn các đường hàn có biên dạng phức tạp bằng công nghệ FSW.

- Giá thành thiết bị cao nên khả năng tiếp cận FSW hạn chế.
- Xuất hiện lỗ chốt hàn ở cuối đường hàn.

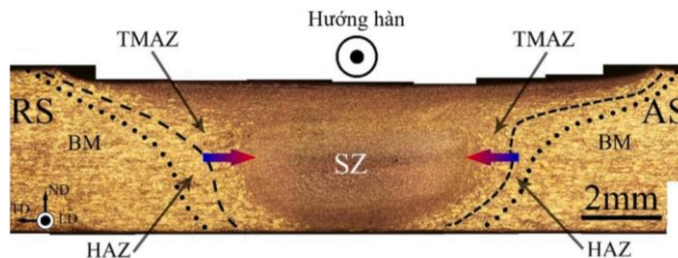
2.1.3. Sự phân bố nhiệt độ, dòng chảy vật liệu và cấu trúc vùng hàn

2.1.3.1. Sự phân bố nhiệt độ và dòng chảy kim loại

Quá trình hàn ma sát khuấy bao gồm 3 hiện tượng: gia nhiệt, biến dạng dẻo và quá trình nguội. Trong quá trình hàn, vật liệu trải qua quá trình biến dạng dẻo mạnh ở nhiệt độ cao, dẫn đến việc tạo ra các hạt mịn và kết tinh lại tạo ra tính chất cơ học tốt. Dụng cụ hàn làm nóng phôi và tạo chuyển động vật liệu để hình thành mối hàn. Do ma sát và biến dạng dẻo của vật liệu hàn, phôi được gia nhiệt. Tốc độ quay cao, vận tốc hàn thấp là hàn nhiệt cao. Nhiệt độ hàn cao dẫn đến chiều dày lớp liên kết kim loại dày và giòn nên cơ tính mối hàn giảm. Ở nhiệt độ hàn thấp, lỗ hổng bên trong mối hàn thường xuất hiện. Vì vậy, hàn ở nhiệt độ thấp hay cao đều ảnh hưởng không tốt đến mối hàn.

2.1.3.2. Cấu trúc vùng hàn

Tổ chức kim loại của mối hàn như trên Hình 2.2. Cấu trúc mối hàn gồm 03 vùng: vùng ảnh hưởng nhiệt (heat affected zone - HAZ), vùng ảnh hưởng cơ nhiệt (thermo mechanically affected zone - TMAZ) và vùng khuấy (stirred zone - SZ). Khu vực SZ có vật liệu biến dạng lớn nhất. Vùng TMAZ nằm ngay hai bên vùng SZ nên nhiệt độ ở vùng này thấp hơn. Vùng HAZ, nhiệt độ thấp hơn vùng SZ và vùng TMAZ.



Hình 2.2. Tổ chức kim loại mối hàn

2.1.4. Các thông số hàn cơ bản

- Lực dọc trục F_z (hay áp lực P): là lực nén dọc trục chính, ép vật liệu vào tâm đường hàn, làm giảm các khuyết tật nứt, rỗ của mối hàn.
- Góc nghiêng dụng cụ hàn θ : Góc nghiêng phù hợp giúp vai dụng cụ hàn giữ được vật liệu không trôi ra ngoài vùng hàn.
- Tốc độ quay dụng cụ hàn ω : tốc độ quay ngược chiều hay cùng chiều kim đồng hồ sẽ tạo ra nhiệt ma sát, làm mềm vật liệu xung quanh dụng cụ.

- Vận tốc hàn v : Cùng với tốc độ quay, trong quá trình di chuyển, dụng cụ hàn làm mềm vật liệu từ vị trí đầu đến cuối đường hàn.

- Chiều dài chót hàn L : là một trong các thông số ảnh hưởng đến chất lượng mối hàn, liên quan đến việc khuấy, trộn vật liệu hàn chồng lên nhau.

2.2. Đặc tính lớp IMC giữa thép và nhôm

2.2.1. Thành phần lớp IMC giữa thép và nhôm

Cấu trúc vi mô mặt tiếp giáp hai hợp kim không mịn do các hạt α -Fe (ferit) và lớp hợp chất liên kết kim loại rất mỏng Fe_xAl_y được hình thành bởi các phản ứng hóa học và khuếch tán giữa các nguyên tố Al và Fe. Thời gian khuếch tán và thành phần hóa học trong quá trình hàn nhôm/thép là hai yếu tố chính ảnh hưởng đến sự hình thành IMC. Lớp IMC giàu Al tạo thành mối nối ít dẻo và cứng hơn lớp IMC giàu Fe. Trong sơ đồ pha Fe-Al, tùy theo nhiệt độ đầu vào mối hàn, hai loại IMC nhìn thấy gồm pha giàu Fe (Fe_3Al và $FeAl$) và pha giàu Al (Fe_2Al_5 , $FeAl_2$ và $FeAl_3$). Lớp IMC giàu Fe giữa nhôm và thép như $AlCrFe_2$, $AlFe$, $Al_{13}Fe_4$ của mối hàn chồng FSW AA6061/AISI304.

2.2.2. Dự đoán chiều dày lớp IMC

Theo các nghiên cứu được công bố, đặc biệt là hàn FSW giữa nhôm 6061 và thép không gỉ, chiều dày lớp IMC thay đổi từ 0,34 μm đến 5,5 μm . Chiều dày lớp liên kết kim loại thay đổi theo tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép chót và chiều dài chót hàn nên lớp kim loại khuếch tán cũng thay đổi tương ứng.

2.3. Ăn mòn điện hóa - thách thức của mối hàn hai hợp kim khác loại

Phản ứng oxi hóa khử xảy ra trên mặt tiếp xúc giữa kim loại và môi trường điện ly được gọi là ăn mòn điện hoá. Hai kim loại khác nhau tiếp xúc trong môi trường điện ly hình thành pin điện, dịch chuyển ion giữa hai điện cực sinh ra dòng điện. Trên bề mặt kim loại có tồn tại các vùng cực dương (anot) và vùng cực âm (catot) là do sự chênh lệch về thế điện cực của các kim loại khác nhau.

- Kim loại hòa tan cực dương xảy ra quá trình oxi hóa: $Me - Ze \rightarrow Me^{Z+}$

- Cực âm xảy ra phản ứng hòa tan oxi trong dung dịch: $\frac{Z}{4}O_2 + Ze + ZH^+ \rightarrow \frac{Z}{2}H_2O$

và giải phóng điện của các ion H_2 : $2H^+ + 2e \rightarrow H_2$.

Hoạt động cơ nhiệt của quá trình hàn FSW làm thay đổi cấu trúc vi mô, tính chất cơ học và điện hóa của mối hàn. Quá trình tác động cơ nhiệt có ảnh hưởng đến ăn mòn cục bộ như ăn mòn rỗ, ăn mòn liên vùng hợp kim của mối hàn. Ngoài ra, vi cấu trúc hạt kim loại các vùng hàn khác nhau, hình thành các tế bào ăn mòn điện hóa cục bộ ở cấp

độ vi cấu trúc. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của tốc độ quay và vận tốc hàn đến trạng thái ăn mòn của mối hàn ma sát khuấy. Kích thước tương đối của cực dương, loại kim loại và môi trường làm việc như nhiệt độ, độ ẩm, độ mặn, dòng điện... ảnh hưởng đến ăn mòn điện hóa.

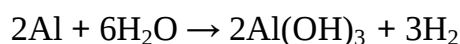
Mối hàn AA6061-T6/SUS316 tiếp xúc với dung dịch điện ly NaCl nên bị ăn mòn điện hóa. Các phản ứng ăn mòn A được dự đoán như sau:

- Cực dương: $2\text{Fe} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{e}^-$
- Cực âm: khử oxi $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ và giải phóng hydro $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$



Hình 2.3. Sơ đồ ăn mòn điện hóa mối hàn AA6061-T6/SUS316

Bên cạnh đó, AA6061-T6 phản ứng mạnh với H_2O tạo thành màng oxit thụ động $\text{Al}(\text{OH})_3$ trên bề mặt mối hàn trong quá trình ăn mòn.



Màng $\text{Al}(\text{OH})_3$ phủ kín trên AA6061-T6 bị ăn mòn, ngăn không cho AA6061-T6 tiếp xúc với dung dịch NaCl nên có khả năng chống ăn mòn cao. Tuy nhiên, khi các ion hình thành di chuyển từ cực dương qua cực âm và ngược lại, tạo thành dòng điện. Dòng điện tăng đã phá vỡ lớp oxit thụ động $\text{Al}(\text{OH})_3$. Thế điện cực tiêu chuẩn các nguyên tố Al, Fe như sau:

Nguyên tố	Al^{3+}	Fe^{2+}
Thế điện cực (V)	- 1,67	- 0,441

Thế điện cực Al^{3+} nhỏ hơn Fe^{2+} nên AA6061-T6 bị ăn mòn. Bên cạnh đó, những hạt Fe làm giảm khả năng chống ăn mòn cục bộ, tức là AA6061-T6 trải qua quá trình hòa tan ở cực âm. Các hạt liên kết kim loại như Fe có trong nền AA6061-T6 ảnh hưởng đến ăn mòn của AA6061-T6. Mặt tiếp giáp giữa AA6061-T6 và SUS316 hình thành nhiều pin ăn mòn do các hợp chất Fe_3Al và FeAl_3 của lớp IMC. Vì vậy, ăn mòn mối hàn trên tấm AA6061-T6 và tập trung tại lớp IMC.

CHƯƠNG 3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ THÍ NGHIỆM

3.1. Phương pháp nghiên cứu

3.1.1. Nghiên cứu lý thuyết

Tổng hợp các công trình nghiên cứu đã công bố trong và ngoài nước để kế thừa và tiếp cận các nội dung liên quan đến đề tài.

3.1.2. Nghiên cứu thực nghiệm

- Chế tạo mối hàn chồng FSW giữa AA6061-T6 và SUS316.

Theo các công trình nghiên cứu đã công bố, đặc biệt là công trình FSW giữa nhôm và thép không gỉ, các thông số hàn được lựa chọn. Trong đề tài nghiên cứu này, quá trình chế tạo sơ bộ được thực hiện. Từ kết quả khảo sát sơ bộ, các thông số công nghệ sau đây được lựa chọn để chế tạo mối FSW giữa AA6061-T6 và SUS316.

STT	Thông số hàn			
	Tốc độ quay ω (vòng/phút)	Vận tốc hàn v (mm/phút)	Chiều sâu ép chốt P (mm)	Chiều dài chốt hàn L (mm)
1	800	100 - 250	0,20 - 0,35	2,9
2	600 - 900	50 - 200	0,30	2,9
3	800	200	0,20 - 0,40	2,7 - 3,0

- Chế tạo mẫu theo tiêu chuẩn ASTM phục vụ cho khảo sát cấu trúc, kiểm tra độ cứng tế vi mối hàn.

- Xác định cấu trúc vùng hàn bằng thiết bị SEM và EDS: cấu trúc hạt, chiều dày lớp IMC, lớp khuếch tán, mặt tiếp giáp 2 hợp kim sau thực nghiệm kéo.

- Chế tạo mẫu thực nghiệm ăn mòn khi đã chế tạo thành công mối hàn AA6061-T6/SUS316 đạt độ bền cao nhất.

- Thực nghiệm mối hàn trong các môi trường ăn mòn khác nhau gồm: %NaCl, %NaCl + hiệu điện thế, %NaCl + hiệu điện thế + nhiệt độ đến quá trình ăn mòn.

3.2. Vật liệu thí nghiệm

Hợp kim nhôm AA6061-T6 dày 3,0 mm và thép không gỉ SUS316 dày 1,0 mm theo tiêu chuẩn Nhật Bản JIS được sử dụng trong nghiên cứu này.

3.3. Quá trình chế tạo mối hàn chồng giữa AA6061-T6 và SUS316

3.3.1. Thiết bị chế tạo

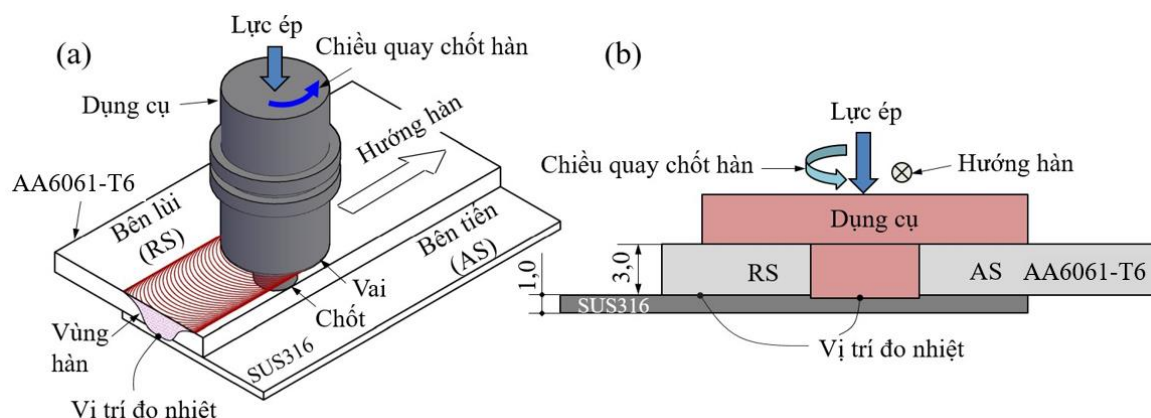
Mối hàn chồng giữa AA6061-T6 và SUS316 được chế tạo tại phòng thí nghiệm hàn ma sát trường Đại học Nha Trang.

3.3.2. Dụng cụ hàn

Dụng cụ hàn có đầu chốt hình trụ không ren, được chế tạo từ thép SKD11 theo tiêu chuẩn Nhật Bản JIS. Đường kính của vai và chốt hàn lần lượt 18 mm và 6 mm, chiều dài chốt hàn thay đổi từ 2,6 mm đến 3,0 mm.

3.3.3. Quá trình chế tạo

Vị trí của hai vật liệu được thể hiện trong Hình 3.1. Để giảm lực cản do phôi tạo nên và hạn chế sự trôi vật liệu, dụng cụ hàn được đặt nghiêng so với phương vuông góc với mặt phẳng phôi một góc $\theta = 2^\circ$.



Hình 3.1. Minh họa vị trí gá đặt vật liệu trong quá trình hàn chồng FSW

3.4 Quá trình phân tích

3.4.1. Đo nhiệt độ vùng hàn

Nhiệt độ vùng hàn được ghi lại bằng cách sử dụng cặp nhiệt kế liên kết với bộ dữ liệu Graphtec GL240. Vị trí đo nhiệt độ như Hình 3.1.

3.4.2. Phân tích vi cấu trúc trong và xung quanh vùng hàn

Mẫu được đánh bóng bằng giấy nhám Sankyo - Nhật từ 1000 đến 4000 kết hợp với nước trên máy đánh bóng MA-PO250. Sau đó, mẫu được đánh bóng với vải cùng với nhôm oxit Al_2O_3 . Sau cùng, mẫu được tẩy thực bằng dung dịch Keller.

3.4.3. Đặc tính bề mặt liên kết mối hàn

Mặt liên kết hai hợp kim, bề mặt phá hủy mối hàn sau khi kéo, đặc tính lớp liên kết kim loại ảnh hưởng rất lớn đến độ bền của mối hàn được thể hiện chi tiết qua kính hiển vi điện tử quét (SEM), phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS).

3.4.4. Sự phân bố độ cứng tế vi trong và xung quanh vùng hàn

Khảo sát độ cứng tế vi dọc theo chiều dày và mặt cắt ngang mối hàn. Độ cứng tế vi được đo bằng thiết bị Vickers MMT-X1, hãng sản xuất Matsuzawa - Nhật Bản, dưới tải trọng đo là 200 g, thời gian giữ tải 10 giây theo tiêu chuẩn ASTM E92.

3.4.5. Độ bền và ứng xử phá hủy của mối hàn

Quá trình thử nghiệm được thực hiện bằng máy Instron 3366 với tốc độ kéo 2,0 mm/phút theo tiêu chuẩn ASTM E8. Máy kết nối máy vi tính để xuất ra đồ thị, lực kéo khi mẫu bị phá hủy.

3.4.6. Điều kiện môi trường ăn mòn ảnh hưởng đến quá trình phá hủy

3.4.6.1. Chuẩn bị mẫu và tính toán tốc độ ăn mòn

Kích thước mẫu thí nghiệm ăn mòn điện hóa theo tiêu chuẩn ASTM G71-81 và G31-72. Nhằm xác định tốc độ ăn mòn tương đối, cần làm sạch và đánh giá mối hàn thí nghiệm ăn mòn theo tiêu chuẩn ASTM G1. Tốc độ ăn mòn của mối hàn trong các môi trường ăn mòn khác nhau được xác định bằng phương pháp trọng lượng.

3.4.6.2. Các môi trường ăn mòn

Mẫu được ngâm trong 4 dung dịch NaCl với các nồng độ khác nhau: 0 %, 1,5 %, 3,0 % và 4,5 % NaCl. Khối lượng và cấu trúc mối hàn sau khi ăn mòn được kiểm tra theo chu kỳ 1 tháng/lần với 3 lần kiểm tra.

Mẫu hàn được ngâm trong dung dịch 3,0 % NaCl dưới tác dụng của các hiệu điện thế khác nhau 3 V, 4 V và 5 V. Khối lượng và cấu trúc mối hàn sau khi ăn mòn được kiểm tra theo chu kỳ 30 phút/lần, kiểm tra 5 lần.

Mẫu hàn được ngâm trong dung dịch 3,0 % NaCl, tác dụng hiệu điện thế 3 V và nhiệt độ thay đổi từ 30 °C - 100 °C. Khối lượng và cấu trúc mối hàn sau khi ăn mòn được kiểm tra 30 phút/lần, kiểm tra 5 lần.

CHƯƠNG 4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

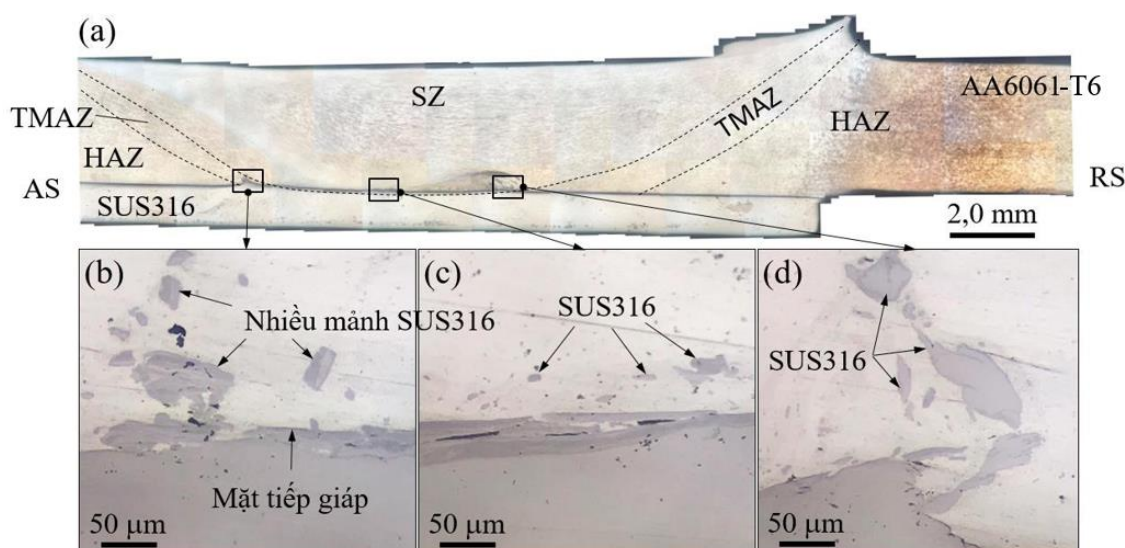
4.1. Sự tương tác giữa vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt đến đặc tính mối hàn

4.1.1. Nhiệt độ vùng hàn

Tăng chiều sâu ép chốt từ 0,20 mm lên 0,35 mm, nhiệt độ hàn tăng khoảng 20 °C. Vận tốc hàn ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ hàn, nhiệt độ cao nhất giảm khoảng 80 °C khi vận tốc hàn tăng từ 100 mm/phút lên 200 mm/phút tại chiều sâu ép chốt 0,20 mm. Một phát hiện tương tự đã được Mahto và cộng sự báo cáo. Giá trị lớn nhất xấp xỉ 500 °C tương ứng với vận tốc hàn 100 mm/phút và chiều sâu ép chốt 0,35 mm. Kết quả trên cho thấy nhiệt độ hàn bị ảnh hưởng mạnh bởi vận tốc hàn hơn chiều sâu ép chốt.

4.1.2. Sự phát triển cấu trúc tế vi mối hàn

Như hiển thị trong Hình 4.1(a), mối hàn không bị khuyết tật như: nứt, rãnh, lỗ hổng. Mảnh thép phân tán trong vùng SZ của nhôm như Hình 4.1(b, c, d).



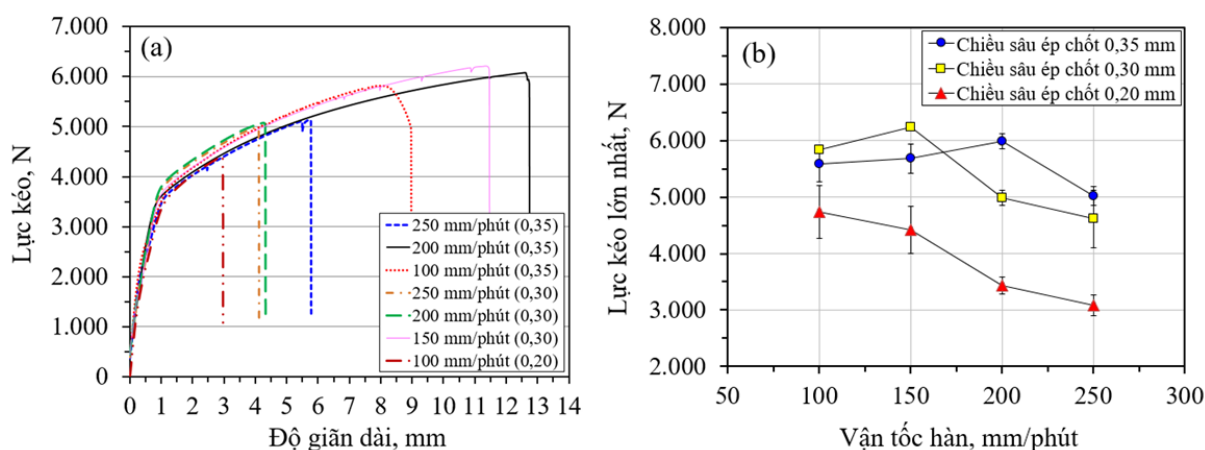
Hình 4.1. (a) Cấu trúc vĩ mô và (b, c, d) cấu trúc vi mô của mẫu hàn tại vận tốc hàn là 100 mm/phút, chiều sâu ép chốt là 0,35 mm

Tăng vận tốc hàn dẫn đến giảm chiều dày lớp IMC. Lớp IMC dày 2,1 μm ở vận tốc hàn 100 mm/phút. Trong khi đó, chiều dày lớp IMC giảm còn 0,6 μm tại vận tốc hàn 250 mm/phút. Vận tốc hàn 100 mm/phút, chiều dày lớp IMC đạt giá trị cao nhất là 6,25 μm tại chiều sâu ép chốt là 0,35 mm. Bên cạnh đó, chiều dày của lớp IMC tăng khi tăng chiều sâu ép chốt. Việc tăng chiều sâu ép chốt hoặc giảm vận tốc hàn sẽ làm tăng chiều dày của lớp IMC và lớp khuếch tán.

4.1.3. Phân bố độ cứng tế vi mỗi hàn

Vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt không ảnh hưởng lớn đến độ cứng AA6061-T6. Tuy nhiên, giá trị độ cứng của SUS316 ở tâm mỗi hàn tăng nhanh chóng, do chốt hàn khuấy mạnh. Giá trị độ cứng SUS316 tại SZ cao hơn là do cấu trúc hạt của lớp liên kết kim loại nhỏ, mịn. Độ cứng lớn nhất đạt giá trị 260 HV với chiều sâu ép chốt 0,35 mm và vận tốc hàn 150 mm/phút.

4.1.4. Lực kéo và cơ chế phá hủy mỗi hàn



Hình 4.2. Ảnh hưởng thông số hàn đến (a) độ giãn dài, (b) lực kéo mỗi hàn

Vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt ảnh hưởng lớn đến biến dạng dài của mỗi hàn. Vận tốc hàn thấp, lực kéo mỗi hàn cao khi chiều sâu ép chốt 0,30 mm. Tại chiều sâu ép chốt 0,35 mm, lực kéo mỗi hàn cao khi tăng vận tốc hàn. Lực kéo mỗi hàn cao nhất đạt được xấp xỉ 6.231 N khi chiều sâu ép chốt 0,30 mm và vận tốc hàn 150 mm/phút như trên Hình 4.2(b).

Diện tích liên kết có giá trị là 53 mm² tại tốc độ hàn 150 mm/phút và chiều sâu ép chốt 0,30 mm. Diện tích liên kết đạt giá trị 49 mm² tại chiều sâu ép chốt 0,35 mm, vận tốc hàn 200 mm/phút. Mỗi hàn bị đứt tại vùng HAZ bên AA6061-T6 khi vận tốc hàn 100 mm/phút ở cả hai chiều sâu ép chốt 0,30 mm và 0,35 mm với diện tích liên kết lớn nhất xấp xỉ 60 mm².

4.2. Sự tương tác giữa vận tốc hàn và tốc độ quay đến đặc tính mỗi hàn

4.2.1. Nhiệt độ vùng hàn và bề mặt mỗi hàn

Nhiệt độ cao nhất là 515 °C đạt được ở vận tốc hàn 50 mm/phút. Nhiệt độ này giảm xuống 401 °C ở tốc độ hàn 200 mm/phút. Nhiệt độ cao nhất giữa vùng HAZ và vùng SZ chênh lệch xấp xỉ 100 °C trong mọi trường hợp.

Bề mặt hàn nhẵn không có khuyết tật như: rãnh hoặc vết nứt. Mỗi hàn bị khuyết tật trôi vật liệu hình thành đáng kể ở vận tốc hàn thấp 50 mm/phút.

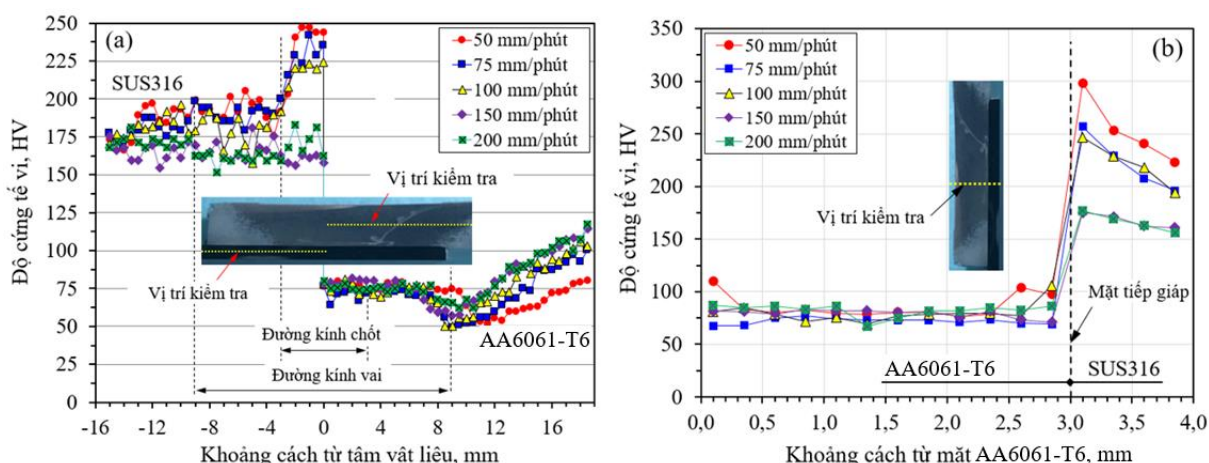
4.2.2. Mặt cắt ngang mối hàn

Do khác biệt nhiệt độ hàn, sự phát triển hạt của các vùng hàn không đồng nhất. Kích thước hạt tăng từ vùng SZ đến vùng HAZ ứng với việc giảm khuấy của chót hàn.

Việc giảm chiều dày lớp IMC do tăng vận tốc hàn. Chiều dày lớp IMC dọc mặt tiếp giáp không đồng nhất. Lớp IMC không được phát hiện tại vận tốc hàn 200 mm/phút, đường nứt dọc tại mặt tiếp giáp chỉ ra AA6061-T6 không liên kết với SUS316.

4.2.3. Phân bố độ cứng tế vi mối hàn

Độ cứng vùng HAZ của AA6061-T6 giảm và được mở rộng tương ứng với vận tốc hàn giảm như Hình 4.3(a). Nhiệt độ hàn cao khiến cấu trúc hạt AA6061-T6 thô nên độ cứng mối hàn giảm. Độ cứng vùng SZ bên SUS316 rất cao tại 50 mm/phút và 75 mm/phút.



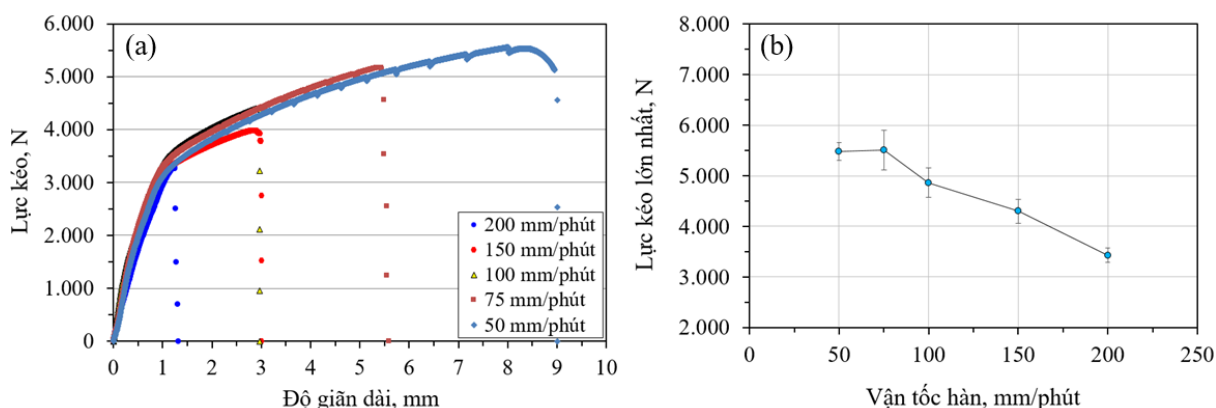
Hình 4.3. Sự phân bố độ cứng tế vi (a) mặt cắt ngang (b) chiều dài mối hàn tại các vận tốc hàn khác nhau

So với AA6061-T6, độ cứng của SUS316 nhạy hơn với tốc độ quay dụng cụ. Độ cứng mối hàn cao nhất xấp xỉ 282 HV ở tốc độ quay 900 vòng/phút. Kết quả cho thấy, việc tăng tốc độ quay làm tăng giá trị độ cứng.

4.2.4. Lực kéo và cơ chế phá hủy mối hàn mối hàn

Các đường cong ứng suất - biến dạng phụ thuộc đáng kể vào việc thay đổi vận tốc, đặc biệt là ở lực kéo của mối hàn. Như Hình 4.4(b), lực kéo cao nhất đạt giá trị khoảng 5.506 N, giảm sâu khi vận tốc hàn tăng 75 mm/phút - 200 mm/phút. Tuy nhiên khi tốc độ quay giảm, lực kéo mối hàn tăng khi tăng vận tốc hàn. Mối hàn có lực kéo cao nhất xấp xỉ 6.228 N tại 700 vòng/phút, với vận tốc hàn 200 mm/phút, chiều sâu ép chót 0,30

mm không đổi. Khi tốc độ quay tăng đến 900 vòng/phút, lực kéo mỗi hàn giảm, đạt giá trị khoảng 6.055 N. Lực kéo mỗi hàn bị ảnh hưởng bởi đặc tính lớp IMC và hiệu quả khuấy của chót hàn.



Hình 4.4. (a) Đường cong ứng suất - biến dạng và (b) lực kéo của mỗi hàn AA6061-T6/SUS316 tại các vận tốc hàn khác nhau

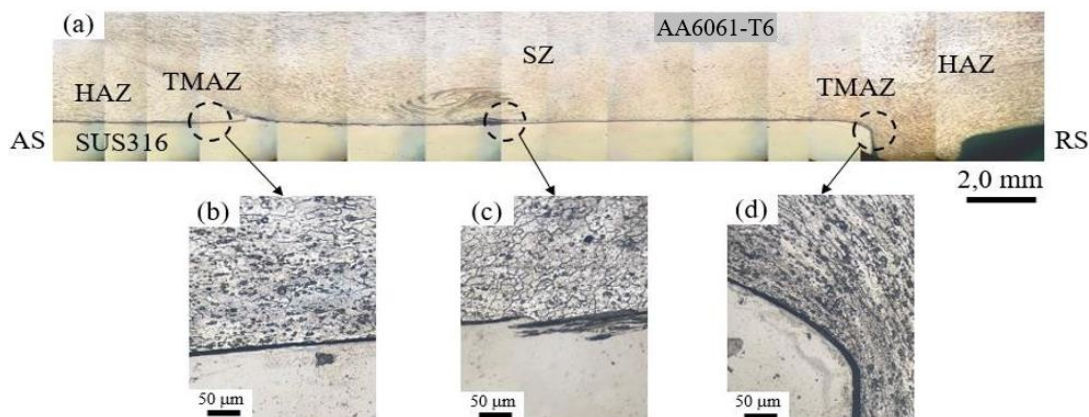
Diện tích liên kết cao nhất 60 mm² ở vận tốc hàn 75 mm/phút. Diện tích liên kết giảm mạnh khi tăng vận tốc hàn từ 75 mm/phút lên 200 mm/phút. Tại tốc độ quay 700 vòng/phút diện tích liên kết giữa AA6061-T6 và SUS316 xấp xỉ 60 mm². Tốc độ quay 600 vòng/phút và 800 vòng/phút, diện tích liên kết tương tự nhau, khoảng 34 mm².

4.3. Sự tương tác của chiều sâu ép chót, chiều dài chót hàn đến đặc tính mối hàn

4.3.1. Bề mặt mối hàn

Mối hàn được chế tạo với chiều dài chót hàn thay đổi từ 2,7 mm - 3,0 mm, tốc độ quay 800 vòng/phút, vận tốc hàn 200 mm/phút và chiều sâu ép chót 0,30 mm là hằng số cố định. Bề mặt hàn nhẵn, không trôi vật liệu, nứt với chiều dài chót hàn 2,7 mm. Mối hàn bị trôi vật liệu được hình thành đáng kể tại chiều dài chót hàn 2,9 mm.

4.3.2. Sự phát triển cấu trúc tế vi mối hàn



Hình 4.5. (a) Cấu trúc vĩ mô và (b, c, d) cấu trúc vi mô của mẫu hàn tại tốc độ quay 800 vòng/phút, vận tốc hàn 200 mm/phút, chiều sâu ép chót là 0,30 mm

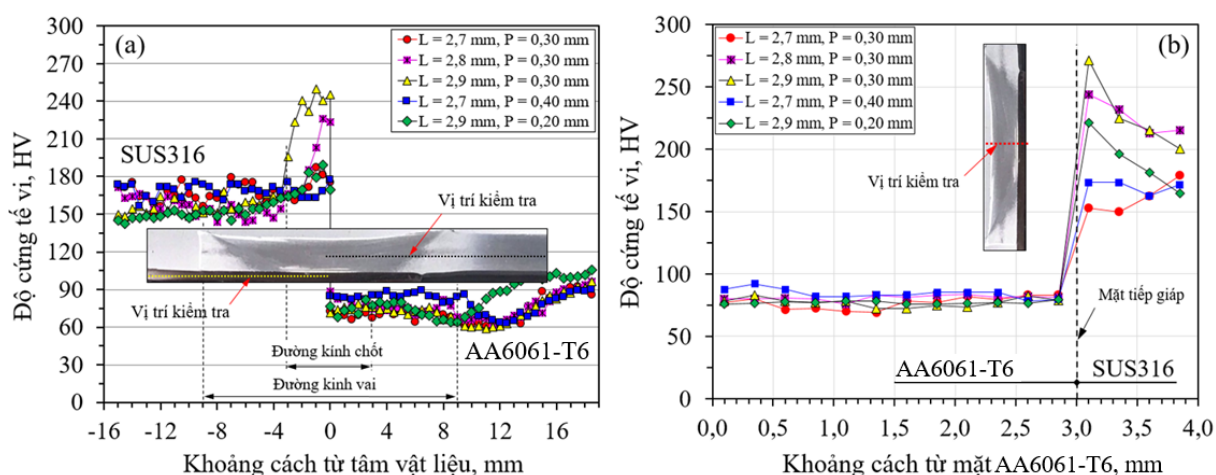
Môi hàn được chế tạo với chiều dài chốt hàn 2,9 mm, không bị khuyết tật như: nứt, rãnh, lỗ rỗng như Hình 4.5(a). Kích thước hạt nhôm thay đổi theo các vùng hàn. Kích thước hạt lớn dần tương ứng từ vùng SZ đến TMAZ (Hình 4.5(b, c, d)). Phân bố nhiệt độ hàn khác nhau nên sự phát triển hạt quanh vùng hàn không đồng nhất.

4.3.3. Đặc tính bề mặt liên kết mối hàn

Chiều dày lớp IMC khoảng 0,12 μm tại chiều dài chốt 2,9 mm, chiều sâu ép chốt hàn 0,20 mm. Chiều dài chốt hàn giảm còn 2,7 mm không hình thành lớp IMC, mặc dù tăng chiều sâu ép chốt lớn đạt giá trị 0,40 mm. Rõ ràng, AA6061-T6 liên kết tốt với SUS316 khi tăng chiều dài chốt hàn. Chiều dài chốt hàn 2,9 mm và chiều sâu ép chốt 0,20 mm, chiều dày lớp khuếch tán đạt giá trị 4,1 μm . Trong khi đó, chiều dày lớp khuếch tán tăng đến 6,1 μm tại chiều sâu ép chốt 0,30 mm. Kết quả có thể khẳng định rằng, chiều dày lớp IMC tăng sẽ làm tăng chiều dày lớp khuếch tán.

4.3.4. Phân bố độ cứng tế vi mối hàn

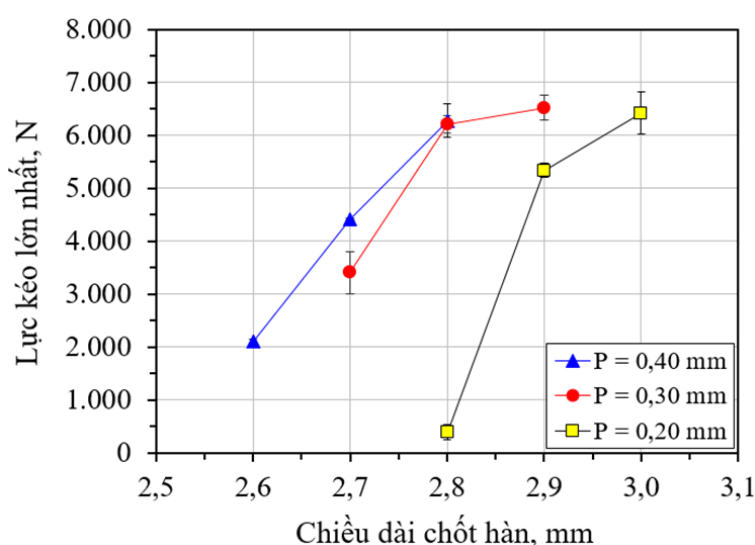
Chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn không ảnh hưởng lớn đến độ cứng của tấm AA6061-T6 trên chiều dày mối hàn. Độ cứng tấm AA6061-T6 tăng nhanh khi tăng chiều dài chốt hàn, đồng thời độ cứng tấm SUS316 giảm mạnh trên mặt cắt ngang mối hàn. Hiện tượng này cho thấy, với chiều sâu ép chốt nhỏ nên nhiệt đầu vào mối hàn thấp, kích thước hạt vùng hàn SZ lớn. Như thể hiện trong Hình 4.6, độ cứng lớn nhất đạt giá trị 250 HV tại mặt cắt ngang mối hàn và 271 HV tại chiều dày mối hàn với chiều sâu ép chốt 0,30 mm và chiều dài chốt hàn 2,9 mm.



Hình 4.6. Ảnh hưởng chiều dài chốt hàn và chiều sâu ép chốt đến độ cứng tế vi (a) mặt cắt ngang, (b) chiều dày mối hàn AA6061-T6/SUS316

4.3.5. Lực kéo và cơ chế phá hủy mối hàn

Như Hình 4.7, độ bền kéo mối hàn thấp tại chiều sâu ép chốt 0,20 mm, chiều dài chốt hàn 2,8 mm. Lực kéo mối hàn tăng khi tăng chiều sâu ép chốt. Chiều dài chốt hàn quyết định đến cơ tính mối hàn hơn chiều sâu ép chốt. Lực kéo cao nhất mối hàn đạt giá trị xấp xỉ 6.425 N khi chiều dài chốt hàn tăng đến 3,0 mm, trong khi đó chiều sâu ép chốt nhỏ 0,20 mm. Khi chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn tăng đồng thời, lực kéo mối hàn tăng nhanh. Lực kéo mối hàn lớn nhất xấp xỉ 6.526 N tại chiều sâu ép chốt 0,30 mm và chiều dài chốt hàn 2,9 mm.



Hình 4.7. Ảnh hưởng chiều sâu ép, chiều dài chốt hàn đến lực kéo mối hàn

Diện tích liên kết nhỏ nhất khoảng 24 mm² khi chiều dài chốt hàn 2,7 mm. Diện tích liên kết có giá trị lớn nhất xấp xỉ 60 mm² tại chiều dài chốt hàn 2,9 mm. Mối hàn bị đứt tại vùng HAZ bên nhôm AA6061-T6. Kết quả cho thấy liên kết giữa AA6061-T6 và SUS316 tăng khi tăng chiều dài chốt hàn nên độ bền kéo mối hàn tăng. Nhiệt đầu vào và hoạt động khuấy của chốt hàn sẽ hình thành liên kết giữa hai hợp kim. Mối hàn được chế tạo với chiều sâu ép chốt 0,20 mm và chiều dài chốt hàn 3,0 mm, xuất hiện số lượng lớn các vết lõm liên kết. Có nghĩa là hai hợp kim liên kết tốt nhưng chiều sâu ép chốt tăng lớn có thể tạo ra bề mặt liên kết gồ ghề và giòn.

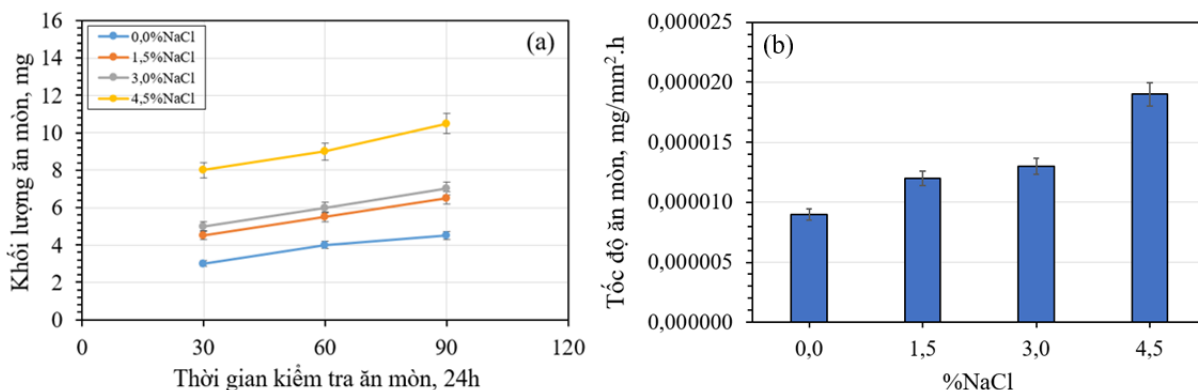
4.4. Tác dụng của dung dịch NaCl đến tốc độ ăn mòn mối hàn

4.4.1. Cấu trúc vị trí phá hủy

Kết quả cho thấy ăn mòn đều trên tất cả bề mặt, tăng dần theo thời gian và %NaCl với thời gian ngâm mẫu là 30 ngày đêm. Thời gian ngâm mẫu dài 90 ngày đêm, hợp chất hydroxit thụ động Al(OH)₃ sẫm màu phủ đầy các vết ăn mòn trên AA6061-T6 và mặt tiếp giáp nên cản trở quá trình ăn mòn mối hàn.

4.4.2. Tốc độ ăn mòn

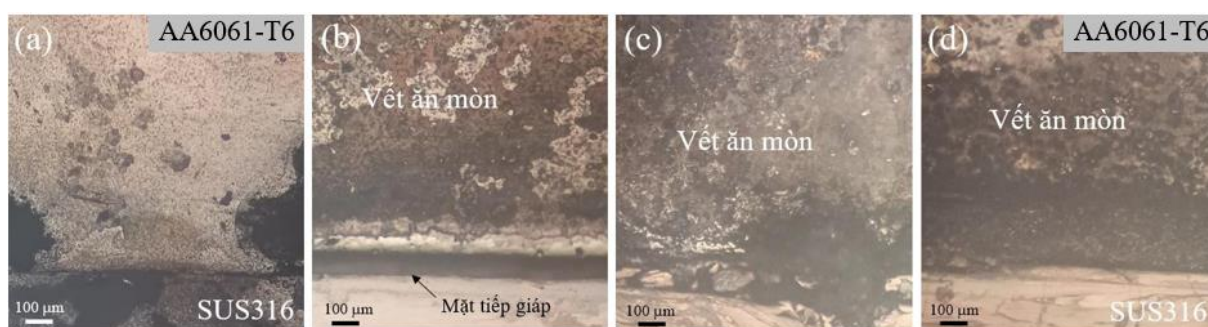
Ăn mòn lớn nhất đạt 8 mg khi ngâm trong dung dịch 4,5 %NaCl sau 30 ngày đêm. Khối lượng ăn mòn lớn trong 30 ngày ngâm đầu tiên, các lần tiếp theo nhỏ, xấp xỉ 1 mg. Tốc độ ăn mòn tăng khi %NaCl tăng như Hình 4.8.



Hình 4.8. Ăn mòn AA6061-T6/SUS316 trong các dung dịch %NaCl khác nhau (a) khối lượng ăn mòn - mg, (b) tốc độ ăn mòn - mg/mm².h

4.4.3. Phân tích cơ chế ăn mòn

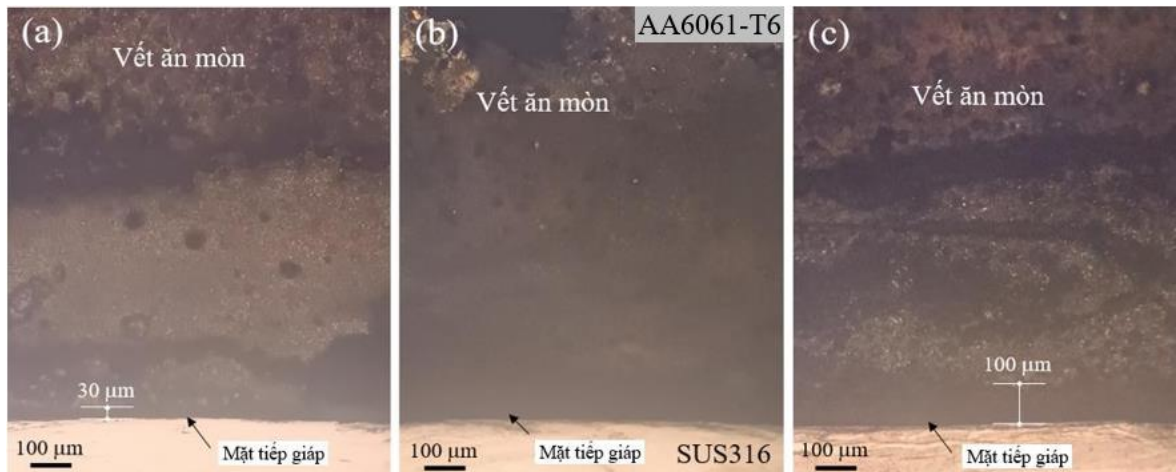
AA6061-T6 phản ứng mạnh với H_2O nên lớp $Al(OH)_3$ được hình thành liên tục trên mặt ăn mòn. Thời gian ngâm mẫu 30 ngày đêm, mỗi hàn ăn mòn trên AA6061-T6, bắt đầu xuất hiện lớp oxit thụ động như Hình 4.9. Lớp $Al(OH)_3$ ít và chiều dày nhỏ nên khả năng chống ăn mòn hạn chế. Thời gian ngâm mẫu 90 ngày đêm, lớp nhôm hydroxit nhiều phủ quanh vết ăn mòn. Màng $Al(OH)_3$ thụ động có tác dụng giảm khả năng ăn mòn của AA6061-T6 như trên Hình 4.10 và Hình 4.11.



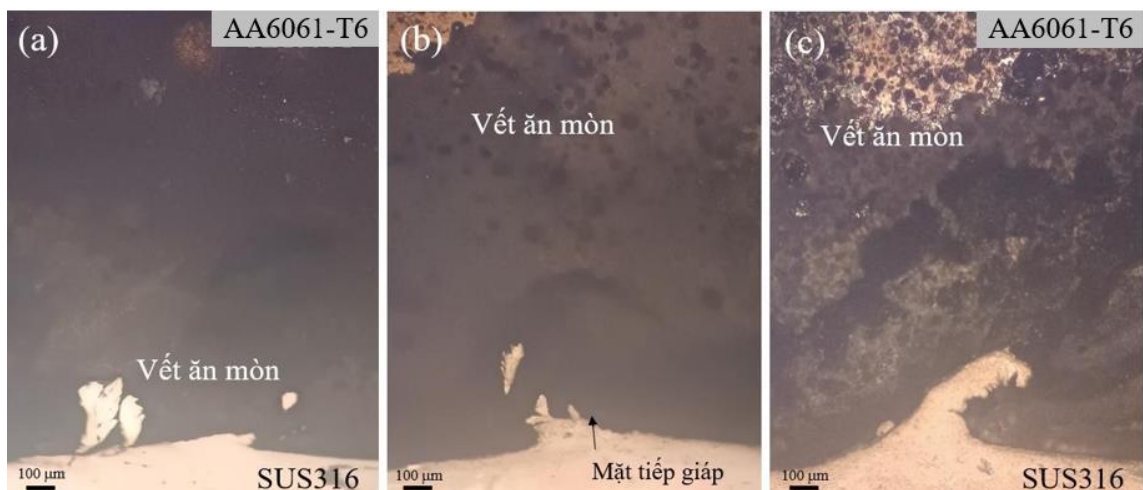
Hình 4.9. Cấu trúc ăn mòn mối hàn vùng SZ sau 30 ngày đêm (a) 0 %NaCl, (b) 1,5 %NaCl, (c) 3,0 %NaCl, (d) 4,5 %NaCl

Dưới tác dụng của ion Cl^- lớp oxit thụ động nhanh bị phá hủy, lớp oxit mới ngay lập tức hình thành. Vì lớp oxit bảo vệ bị hòa tan nên AA6061-T6 cũng hòa tan, do đó tăng khả năng ăn mòn. Chiều rộng ăn mòn tại mặt tiếp giáp tăng từ 30 μm lên 100 μm khi %NaCl tăng từ 0,0 % lên 4,5 % (Hình 4.10). Vì vậy, chiều sâu và kích thước ăn

mòn nhiều hơn AA6061-T6. Hơn nữa, ăn mòn đều tại vùng TMAZ do kích thước hạt thô hơn vùng SZ.



Hình 4.10. Chiều rộng mặt tiếp giáp mối hàn vùng SZ bị ăn mòn sau 90 ngày ngâm (a) 0 %NaCl, (b) 1,5 %NaCl, (c) 4,5 %NaCl

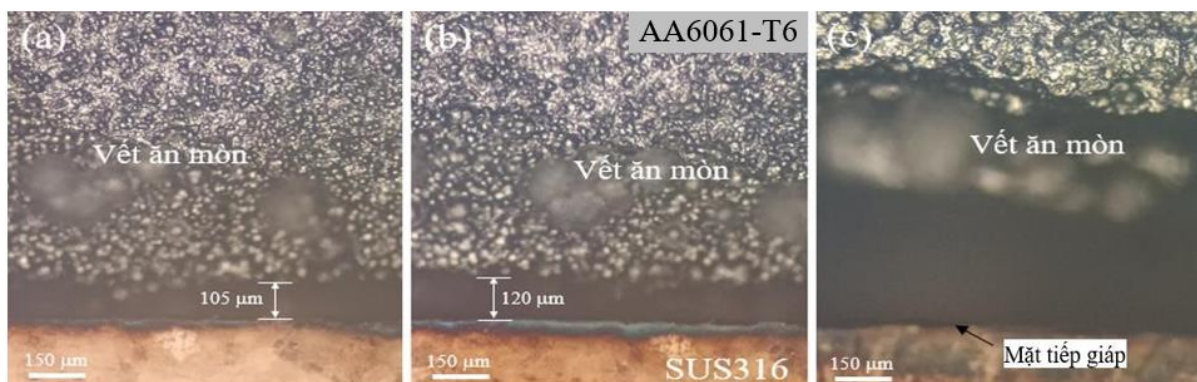


Hình 4.11. Cấu trúc ăn mòn mối hàn vùng TMAZ sau 90 ngày ngâm trong dung dịch NaCl khác nhau (a) 0 %NaCl, (b) 1,5 %NaCl, (c) 4,5 %NaCl

4.5. Tác dụng của hiệu điện thế đến quá trình ăn mòn

4.5.1. Cấu trúc vị trí phá hủy

Mối hàn AA6061-T6/SUS316 ngâm trong dung dịch 3,0 %NaCl dưới tác dụng đồng thời 3 hiệu điện thế 3 V, 4 V, 5 V. Cấu trúc tế vi ăn mòn mối hàn vùng SZ, dưới tác động các hiệu điện thế khác nhau như trên Hình 4.12.



Hình 4.12. Cấu trúc tế vi vùng SZ tại hiệu điện thế khác nhau (a) 3 V, (b) 4 V, (c) 5 V

4.5.2. Tốc độ ăn mòn

Dưới tác động của hiệu điện thế khác nhau nên ăn mòn mỗi hàn khác nhau, đặc biệt tại vị trí tiếp giáp giữa AA6061-T6 và SUS316. Khối lượng ăn mòn mỗi hàn lớn nhất là 49 mg với hiệu điện thế tác dụng 5 V, tương ứng với tốc độ ăn mòn là 0,04 mg/mm².h.

Hiệu điện thế tác dụng	3 V	4 V	5 V
Tốc độ ăn mòn (mg/mm ² .h)	0,0150	0,0217	0,0400

4.5.3. Phân tích cơ chế ăn mòn

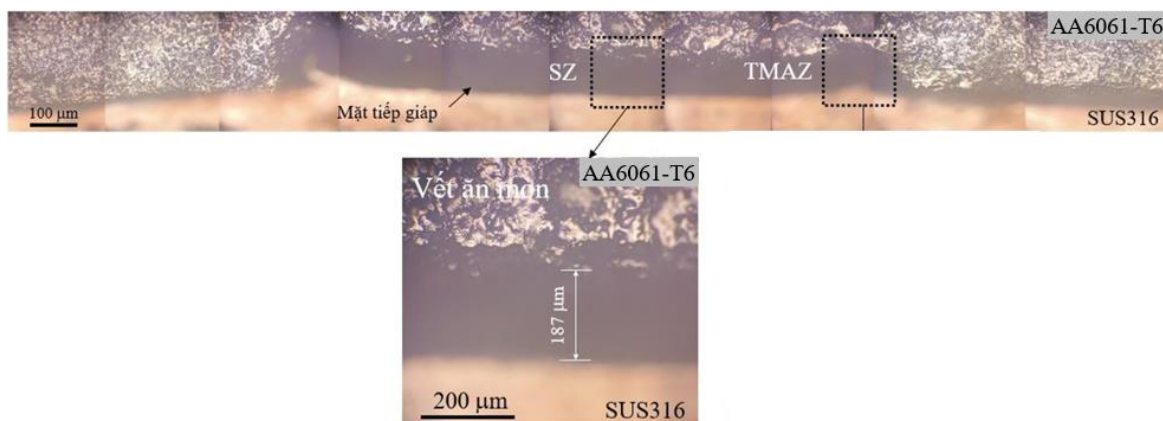
Ăn mòn đều trên bề mặt khi hiệu điện thế là 3 V như trên Hình 4.12(a). Ăn mòn nhiều, tạo thành mảng lớn khi tăng hiệu điện thế thể hiện trong Hình 4.12(b, c). Kích thước ăn mòn trên tấm AA6061-T6 và mặt tiếp giáp mỗi hàn tăng khi tăng hiệu điện thế. Dưới tác dụng của dòng điện, AA6061-T6 bị ăn mòn hình thành các ion Al³⁺ di chuyển từ cực âm sang cực dương theo phản ứng $\text{Al} = \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$. Sau đó $\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$. Khi tăng hiệu điện thế, hình thành các ion Al³⁺ nhiều nên tốc độ ăn mòn của AA6061-T6 tăng. Sự chênh lệch điện thế giữa các hạt liên kết kim loại và nhôm hình thành các phân tử ăn mòn. Vì vậy nhôm hòa tan liên tục trong dung dịch NaCl khi tăng hiệu điện thế.

4.6. Tác dụng của nhiệt độ đến quá trình ăn mòn

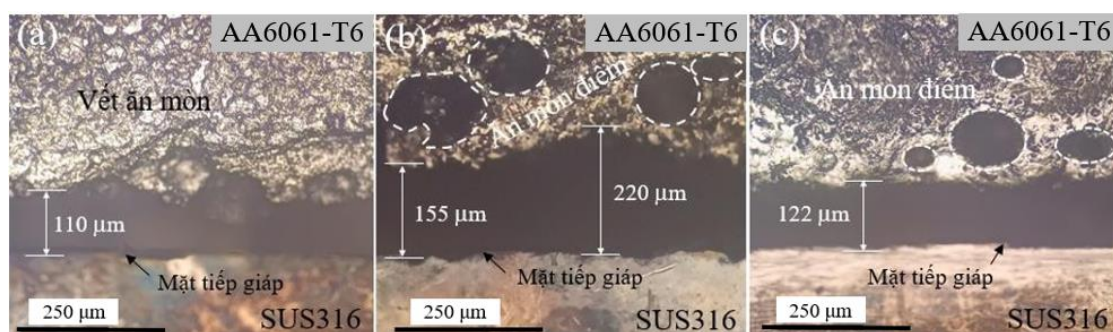
4.6.1. Cấu trúc vị trí phá hủy

Cấu trúc ăn mòn mỗi hàn AA6061-T6/SUS316 ngâm dung dịch 3,0 %NaCl, tác dụng cùng lúc hiệu điện thế 3 V và nhiệt độ 70 °C như trên Hình 4.13.

Ăn mòn mỗi hàn AA6061-T6/SUS316 tại vùng hàn SZ với nhiệt độ tác dụng 50 °C, 80 °C và 100 °C như trên Hình 4.14.



Hình 4.13. Mặt cắt ngang ăn mòn mối hàn AA6061/SUS316 ở nhiệt độ 70 °C



Hình 4.14. Cấu trúc ăn mòn tế vi vùng SZ tại nhiệt độ (a) 50 °C, (b) 80 °C, (c) 100 °C

4.6.2. Tốc độ ăn mòn

Tốc độ ăn mòn mối hàn tăng từ 30 °C đến 60 °C. Ngược lại, nhiệt độ tăng từ 70 °C đến 100 °C, tốc độ ăn mòn mối hàn giảm.

Nhiệt độ (°C)	30	50	60	70	80	100
Tốc độ ăn mòn (mg/mm ² .h)	0,0150	0,0776	0,0922	0,1257	0,0421	0,0346

4.6.3. Phân tích cơ chế ăn mòn

Khi nhiệt độ tăng từ 30 °C đến 70 °C, tốc độ của phản ứng ăn mòn hóa học liên tục tăng (Hình 4.13 và Hình 4.14). Màng $\text{Al}(\text{OH})_3$ thụ động hình thành trên mặt AA6061-T6 tương đối nhỏ và cấu trúc chưa ổn định. Có nghĩa là ăn mòn đều và tốc độ ăn mòn tăng liên tục khi nhiệt độ tăng. Khi nhiệt độ lớn hơn 70 °C, phản ứng ăn mòn hóa học tiếp tục tăng. Tuy nhiên, cấu trúc của màng $\text{Al}(\text{OH})_3$ thụ động đã ổn định và số lượng tăng lên. Lớp oxit có chức năng làm giảm ăn mòn mối hàn. Vì vậy, tốc độ ăn mòn giảm khi nhiệt độ lớn hơn 70 °C. Nhiệt độ tăng đến 80 °C như trên Hình 4.14(b), một số vị trí của màng thụ động chưa hoàn chỉnh đã hấp thụ các ion Cl^- nên kim loại bị hoà tan với tốc độ lớn hình thành các điểm ăn mòn, phát sinh ăn mòn điểm. Kích thước điểm ăn mòn, vết ăn mòn tại mặt liên kết kim loại giảm khi nhiệt độ tăng, đặc biệt là các điểm ăn mòn trên AA6061-T6 (Hình 4.14(c)).

CHƯƠNG 5. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

5.1. Kết luận

Vận tốc hàn ảnh hưởng đáng kể đến đến nhiệt độ hàn. Khi vận tốc hàn tăng, nhiệt độ hàn tại vùng HAZ và vùng SZ giảm. Trong khi đó, chiều sâu ép chót không ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ hàn.

Mảnh SUS316 phân tán được phát hiện trong vùng SZ của AA6061-T6 do chót hàn tiếp xúc với bề mặt SUS316 khi tăng chiều sâu ép chót.

Nhiệt độ hàn ảnh hưởng đến sự hình thành và chiều dày lớp IMC, lớp khuếch tán. Tăng chiều sâu ép chót hoặc giảm vận tốc hàn làm tăng chiều dày lớp IMC và lớp khuếch tán.

Giảm vận tốc hàn và tăng chiều sâu ép chót có lợi cho việc trộn hai hợp kim nhưng dẫn đến kích thước hạt thô hơn và vị trí gãy tại HAZ bên AA6061-T6.

Độ bền mối hàn bị ảnh hưởng bởi cả chiều dày lớp IMC, lớp khuếch tán, đặc tính lớp IMC, hiệu quả khuấy của chót hàn được thể hiện qua cả bề mặt liên kết và diện tích liên kết giữa AA6061-T6 và SUS316.

Nhiệt đầu vào cao sẽ hình thành lớp IMC dày và giòn, diện tích liên kết giữa AA6061-T6 và SUS316 lớn. Khi nhiệt đầu vào thấp dẫn đến diện tích liên kết nhỏ nên làm suy giảm độ bền kéo mối hàn.

Độ cứng giảm khi vận tốc hàn giảm, đặc biệt tại vùng HAZ của AA6061-T6 do cấu trúc hạt thô hơn. Ngoài ra, vận tốc hàn không ảnh hưởng lớn đến độ cứng tấm AA6061-T6 nhưng giá trị độ cứng của SUS316 vùng SZ tăng nhanh chóng.

Ăn mòn xảy ra mạnh nhất ở vùng SZ và TMAZ của mối hàn khi ngâm trong dung dịch NaCl, đặc biệt ở nồng độ cao. Sự không đồng nhất cấu trúc vi mô các vùng hàn là nguyên nhân chính dẫn đến sự ăn mòn này.

Ăn mòn mối hàn tăng khi tăng hiệu điện thế từ 3 V đến 5 V, đặc biệt vùng tiếp giáp giữa AA6061-T6 và SUS316. Hiệu điện thế cao làm tăng cường quá trình di chuyển ion Cl^- nên dễ dàng phá vỡ lớp $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Tốc độ phản ứng ăn mòn tăng khi nhiệt độ tăng, làm giảm khả năng bảo vệ của lớp oxit thụ động $\text{Al}(\text{OH})_3$. Tuy nhiên, ở nhiệt độ cao hơn 70 °C, cấu trúc màng oxit trở nên không ổn định hấp thụ các ion Cl^- hình thành các điểm ăn mòn. Từ đó, mối hàn bị ăn mòn điểm nên giảm tốc độ ăn mòn.

5.2. Khuyến nghị

5.2.1. Những hạn chế của đề tài

Ngoài chiều dày lớp IMC, lớp khuếch tán, đặc tính liên kết giữa AA6061-T6 và SUS316 sẽ ảnh hưởng cơ tính mối hàn. Vì vậy, chưa xác định được các pha của lớp IMC tại mặt tiếp giáp giữa AA6061-T6 với SUS316.

Nhiệt đầu vào cao sẽ hình thành lớp IMC dày và giòn. Tuy nhiên, chưa xác định được các pha của lớp IMC dày. Kết quả dựa vào các tài liệu tham khảo của Newishy M. và cộng sự (2023), Xingbin H. và cộng sự (2024) nên dự đoán lớp IMC dày và giòn.

Đặc tính mặt liên kết, diện tích liên kết giữa AA6061 và SUS316 ảnh hưởng đến độ bền mối hàn nhưng chưa xác định ảnh hưởng của pha nào đến liên kết 2 hợp kim hàn.

Các pha của lớp IMC ảnh hưởng đến ăn mòn điện hóa tại mặt tiếp giáp mối hàn. Chưa đánh giá độ bền mối hàn khi chịu tác động của các môi trường ăn mòn khác nhau.

5.2.2. Khuyến nghị

Nghiên cứu tuổi thọ, cơ chế phá hủy mối hàn AA6061-T6/SUS316 khi chịu tải trọng tuần hoàn lặp đi lặp lại theo thời gian.

Nghiên cứu độ bền mối hàn trong môi trường nhiệt độ cao.

Nghiên cứu ảnh hưởng của môi trường NaCl, NaCl + hiệu điện thế, NaCl + hiệu điện thế + nhiệt độ đến độ bền mối hàn. So sánh độ bền mối hàn AA6061-T6/SUS316 trước và sau ăn mòn.

Chụp quang phổ nhiễu xạ tia X - XRD mặt tiếp giáp giữa AA6061-T6 và SUS316 nhằm xác định các pha của lớp IMC. Từ đó xác định lớp IMC giàu Fe hay giàu Al, pha oxit đã ảnh hưởng như thế nào đến cơ tính mối hàn.

Chụp SEM bề mặt phá hủy mối hàn tại $\omega = 700$ vòng/phút, $\omega = 800$ vòng/phút. Phân tích các pha của lớp IMC tại mặt tiếp giáp giữa AA6061-T6 và SUS316 khi mối hàn được chế tạo với $\omega = 600, 700, 800$ và 900 vòng/phút.

Thay dung dịch NaCl hiện tại bằng môi trường nước biển tự nhiên.

Thay đổi lò nung F48000 bằng thiết bị gia nhiệt khác.

Nghiên cứu ảnh hưởng các pha của lớp IMC đến ăn mòn điện hóa trong các môi trường NaCl, NaCl + hiệu điện thế, NaCl + hiệu điện thế + nhiệt độ.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC

1. **Huy HH.**, Hao DD., Nam QH. and Tra HT. (2024). “Welding speed and pin penetration interaction in mechanical properties of friction stir welded lap-joint AA6061/316 stainless steel”, *Journal of Materials Engineering and Performance*. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09747-2> (SCIE-Q2).
2. **Huy HH.**, Quan MN., Thuyen CP., Hao DD., Tra HT. (2024). “Effect of probe length on tensile strength of dissimilar friction stir welded lap-joint between AA6061 and 316 stainless steel using marine structure”. *Journal of Fisheries Science and Technology*, No.1, pp. 089 - 094. <https://doi.org/10.53818/jfst.01.2024.254>.
3. **Huy Huu Ho** (2024), “Impact of NaCl concentration on the dissimilar friction stir welded lap-joint AA6061/SUS316 corrosion behavior”, *Proceedings of the International Scientific Conferences (ISC) 2024 “Green Values for Sustainable Development”*, pp. 725 - 729.
4. **Huy HH.**, Hao DD., Quan MN., Tra HT. (2023), “Assessment of dissimilar friction stir welded AA6061/SS316 for sustainable industry”, *International Conference MSDI 2023*. IOP Conf. Ser.: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1278 012025. DOI 10.1088/1755-1315/1278/1/012015 (Scopus).
5. **Huy HH.**, Hao DD., Quan MN., Tra HT. (2023), “Mechanical performance of dissimilar friction stir welded lap-joint between aluminum alloy 6061 and 316 stainless steel”, *Welding International*, 37(2), pp.101 - 110. <https://doi.org/10.1080/09507116.2023.2190475> (Scopus).
6. **Huy HH.**, Hao DD., Nam HQ., Thuyen CP., Tra HT. (2022), “Dissimilar Friction Stir Welded lap-joint of Aluminum Alloy 6061 and 316 Stainless Steel”, *6th International Conference GTSD 2022*, pp. 165 - 168.