

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

KHÁNH HÒA - 2025

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

1. PGS.TS. TRẦN HÙNG TRÀ

2. PGS.TS. DƯƠNG ĐÌNH HẢO

Phản biện 1: PGS.TS. Đặng Quốc Khánh

Phản biện 2: PGS.TS. Vũ Công Hòa

KHÁNH HÒA - 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan mọi kết quả của đề tài luận án: “*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*” là công trình nghiên cứu của cá nhân tôi, tuân thủ đúng các quy định về liêm chính học thuật. Đồng thời, các dữ liệu và kết quả nghiên cứu trình bày trong luận án là trung thực và chưa từng được ai khác công bố trong bất cứ công trình khoa học nào cho tới thời điểm hiện nay.

Nha Trang, ngày 27 tháng 03 năm 2025

Nghiên cứu sinh



Hồ Hữu Huy

LỜI CẢM ƠN

Em xin gửi lời cảm ơn chân thành đến giảng viên hướng dẫn khoa học PGS.TS Trần Hưng Trà và PGS.TS Dương Đình Hảo đã hướng dẫn chuyên môn tận tình, giúp em hoàn thành luận án đầy đủ theo quy định. Đồng thời, xin gửi lời cảm ơn đến quý thầy, cô khoa Cơ khí, khoa Xây dựng, xưởng thực hành, phòng đào tạo sau đại học đã giúp đỡ em rất nhiều trong nghiên cứu đề tài này.

Em xin biết ơn sâu sắc đến quý Thầy phản biện, quý Thầy trong Hội đồng đã dành nhiều thời gian đánh giá và góp ý chuyên môn để hoàn thiện luận án hơn. Qua đó, định hướng nghiên cứu và ứng dụng sản phẩm trong các lĩnh vực công nghiệp. Xin gửi lời cảm ơn đến gia đình, bạn bè đã giúp đỡ và động viên trong suốt quá trình nghiên cứu.

Em xin chân thành cảm ơn!

Nha Trang, ngày 27 tháng 03 năm 2025

Nghiên cứu sinh



Hồ Hữu Huy

MỤC LỤC

Lời cam đoan	i
Lời cảm ơn	ii
Mục lục	iii
Danh mục chữ viết tắt.....	vii
Danh mục bảng.....	viii
Danh mục các hình, đồ thị, sơ đồ	ix
MỞ ĐẦU	1
Chương I. TỔNG QUAN	4
1.1. Nhu cầu ứng dụng tấm lưỡng kim nhôm/thép trong công nghiệp.....	4
1.2. Các công trình FSW trong và ngoài nước	5
1.3. Vai trò của hợp kim nhôm và thép không gỉ trong kỹ thuật	7
1.3.1. Hợp kim nhôm.....	7
1.3.2. Thép không gỉ.....	8
1.4. Một số kỹ thuật liên kết giữa hợp kim nhôm với thép không gỉ.....	10
1.5. Ứng dụng mối hàn giữa thép không gỉ với hợp kim nhôm	12
1.5.1. Hàng không vũ trụ.....	12
1.5.2. Công nghiệp ô tô.....	12
1.5.3. Kết cấu hàng hải	12
1.5.4. Kết cấu xây dựng.....	13
1.5.5. Thực phẩm và đồ uống.....	13
1.6. Những thách thức khi hàn giữa thép không gỉ và hợp kim nhôm	13
1.7. Mục tiêu, giới hạn và cấu trúc của luận án.....	15
1.7.1. Mục tiêu luận án	15
1.7.2. Giới hạn luận án.....	15
1.7.3. Cấu trúc luận án.....	16
Chương II. CƠ SỞ LÝ THUYẾT	17
2.1. Tổng quan về kỹ thuật FSW	17

2.1.1. Nguyên lý FSW	17
2.1.2. Ưu, nhược điểm của kỹ thuật FSW	18
2.1.2.1. Ưu điểm	18
2.1.2.2. Nhược điểm	18
2.1.3. Sự phân bố nhiệt độ, dòng chảy vật liệu và cấu trúc vùng hàn.....	19
2.1.3.1. Sự phân bố nhiệt độ và dòng chảy kim loại	19
2.1.3.2. Cấu trúc vùng hàn	19
2.1.4. Dụng cụ FSW	20
2.1.5. Các thông số hàn cơ bản	23
2.1.6. Các khuyết tật trong mối hàn FSW	24
2.2. Đặc tính lớp IMC giữa thép và nhôm	25
2.2.1. Thành phần lớp IMC giữa thép và nhôm	25
2.2.2. Sự hình thành và cơ chế phát triển của lớp IMC	27
2.2.3. Dự đoán chiều dày lớp IMC	31
2.3. Ăn mòn điện hóa của mối hàn 2 hợp kim khác loại AA6061 và SUS316	32
2.3.1. Ăn mòn kim loại	32
2.3.2. Ăn mòn điện hóa mối hàn AA6061/SUS316	33
2.3.2.1. Ăn mòn điện hóa	33
2.3.2.2. Ăn mòn điện hóa mối hàn AA6061/SUS316	33
2.3.3. Công trình nghiên cứu ăn mòn	34
2.3.4. Ảnh hưởng của hợp chất liên kim, cấu trúc mối hàn đến ăn mòn điện hóa..	35
Chương III. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ THÍ NGHIỆM.....	38
3.1. Phương pháp nghiên cứu	38
3.1.1. Nghiên cứu lý thuyết	38
3.1.2. Nghiên cứu thực nghiệm	38
3.2. Vật liệu thí nghiệm	39
3.2.1. Hợp kim AA6061	39
3.2.2. Thép không gỉ SUS316.....	40
3.3. Thí nghiệm chế tạo mối hàn chồng giữa AA6061 và SUS316	41

3.3.1. Thiết bị chế tạo	41
3.3.2. Dụng cụ FSW	42
3.3.3. Quá trình chế tạo.....	42
3.4. Quá trình phân tích.....	43
3.4.1. Đo nhiệt độ vùng hàn.....	43
3.4.2. Phân tích vi cấu trúc trong và xung quanh vùng hàn.....	44
3.4.3. Đặc tính bề mặt liên kết mối hàn	45
3.4.4. Sự phân bố độ cứng tế vi trong và xung quanh vùng hàn.....	46
3.4.5. Độ bền và ứng xử phá hủy của mối hàn	47
3.4.6. Điều kiện môi trường ăn mòn ảnh hưởng đến quá trình phá hủy	48
3.4.6.1 Chuẩn bị mẫu và tính toán tốc độ ăn mòn	48
3.4.6.2 Môi trường NaCl	50
3.4.6.3 Môi trường hiệu điện thế	50
3.4.6.4 Môi trường nhiệt độ	51
Chương IV. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU	52
4.1. Sự tương tác giữa vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt đến đặc tính mối hàn	52
4.1.1. Sự phát triển cấu trúc tế vi mối hàn.....	52
4.1.2. Chiều dày lớp IMC, lớp khuếch tán.....	55
4.1.3. Độ bền kéo và ứng xử phá hủy mối hàn.....	58
4.1.4. Phân bố độ cứng tế vi mối hàn.....	60
4.1.5. Nhiệt độ vùng hàn.....	62
4.2. Sự tương tác giữa vận tốc hàn và tốc độ quay đến đặc tính mối hàn	64
4.2.1. Bề mặt mối hàn.....	65
4.2.2. Mặt cắt ngang mối hàn	65
4.2.3. Nhiệt độ vùng hàn.....	66
4.2.4. Đặc tính bề mặt liên kết mối hàn	67
4.2.5. Độ bền kéo và ứng xử phá hủy mối hàn	74
4.2.6. Phân bố độ cứng tế vi mối hàn	75
4.3. Sự tương tác của chiều sâu ép chốt, chiều dài chốt hàn đến đặc tính mối hàn.....	78

4.3.1. Bề mặt mối hàn.....	78
4.3.2. Sự phát triển cấu trúc tế vi mối hàn.....	79
4.3.3. Đặc tính bề mặt liên kết mối hàn.....	80
4.3.4. Độ bền kéo và ứng xử phá hủy mối hàn.....	83
4.3.5. Phân bố độ cứng tế vi mối hàn.....	86
4.4. Tác dụng của dung dịch NaCl đến tốc độ ăn mòn mối hàn.....	87
4.4.1. Tốc độ ăn mòn.....	87
4.4.2. Phân tích cơ chế ăn mòn.....	88
4.5. Tác dụng của hiệu điện thế đến quá trình ăn mòn.....	90
4.5.1. Tốc độ ăn mòn.....	90
4.5.2. Phân tích cơ chế ăn mòn.....	91
4.6. Tác dụng của nhiệt độ đến quá trình ăn mòn.....	93
4.6.1. Tốc độ ăn mòn.....	93
4.6.2. Phân tích cơ chế ăn mòn.....	93
4.7. Đánh giá tác động của môi trường đến tốc độ ăn mòn mối hàn.....	96
Chương V. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ.....	97
5.1 Kết luận.....	97
5.2. Khuyến nghị.....	98
5.2.1. Những hạn chế của đề tài.....	98
5.2.2. Đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo.....	98
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC	
TÀI LIỆU THAM KHẢO	

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Từ đầy đủ	Ý nghĩa
AA6061	aluminum alloy 6061-T6	hợp kim nhôm 6061-T6
AS	advancing side	bên tiến
ASTM	American Society for testing and materials	hiệp hội vật liệu và thử nghiệm Hoa Kỳ
BM	base metal	vật liệu nền
EDS	energy dispersive X-ray spectroscopy	phổ tán xạ năng lượng tia X
FCW	friction crush welding	hàn ma sát áp lực
FSW	friction stir welding	hàn ma sát khuấy
HAZ	heat affected zone	vùng ảnh hưởng nhiệt
IMC	intermetallic compounds	hợp chất liên kim
JIS	Japanese industrial standards	Tiêu chuẩn công nghiệp Nhật Bản
MIG	metal inert gas	hàn hồ quang trong môi trường khí bảo vệ
NTU	Nha Trang University	Trường ĐH Nha Trang
RS	retreating side	bên lùi
SEM	scanning electron microscope	kính hiển vi điện tử quét
SUS316	stainless steel 316	thép không gỉ 316
SZ	stirred zone	vùng khuấy
TMAZ	thermo mechanically affected zone	vùng ảnh hưởng cơ nhiệt
TWI	The Welding Institute	viện hàn Vương Quốc Anh

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1. Ứng suất kéo lớn nhất tương ứng các kỹ thuật hàn	11
Bảng 1.2. Sự khác nhau tính chất hóa học, vật lý giữa Al và Fe	14
Bảng 2.1. Các khuyết tật mối hàn và nguyên nhân gây ra khuyết tật	25
Bảng 2.2. Cấu trúc mạng tinh thể và nhiệt độ nóng chảy của các hợp chất trung gian khác nhau trong hệ Fe - Al có trong lớp IMC	27
Bảng 2.3. Thế điện cực tiêu chuẩn các nguyên tố Al, Fe	34
Bảng 3.1. Các thông số công nghệ chế tạo mối FSW AA6061/SUS316	38
Bảng 3.2. Kích thước tấm AA6061 để FSW	39
Bảng 3.3. Thành phần hóa học của AA6061 (%)	39
Bảng 3.4. Tính chất cơ học của AA6061	40
Bảng 3.5. Kích thước tấm SUS316 để FSW	40
Bảng 3.6. Thành phần hóa học của SUS316 (%)	40
Bảng 3.7. Tính chất cơ học của SUS316	40
Bảng 3.8. Các tính năng kỹ thuật máy hàn FSW phòng thí nghiệm NTU	41
Bảng 3.9. Thành phần hóa học thép SKD11	42
Bảng 4.1. Các thông số khác nhau để chế tạo mối hàn AA6061/SUS316 nhằm khảo sát ảnh hưởng của vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt đến đặc tính mối hàn	52
Bảng 4.2. Ảnh hưởng chiều sâu ép chốt và vận tốc hàn đến độ bền kéo mối hàn	59
Bảng 4.3. Các thông số khác nhau để chế tạo mối hàn AA6061/SUS316 nhằm khảo sát ảnh hưởng của vận tốc hàn và tốc độ quay đến đặc tính mối hàn	65
Bảng 4.4. Các thông số khác nhau để chế tạo mối hàn AA6061/SUS316 nhằm khảo sát ảnh hưởng của chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt đến đặc tính mối hàn	78
Bảng 4.5. Ảnh hưởng chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn đến độ bền kéo	84
Bảng 4.6. Khối lượng ăn mòn mối hàn ngâm trong dung dịch NaCl	87
Bảng 4.7. Tốc độ ăn mòn mối hàn dưới tác dụng hiệu điện thế khác nhau	90
Bảng 4.8. Tốc độ ăn mòn mối hàn dưới tác dụng của nhiệt độ khác nhau	93
Bảng 4.9. Tốc độ ăn mòn mối hàn ngâm 3,0 %NaCl và hiệu điện thế khác nhau	96
Bảng 4.10. Tốc độ ăn mòn mẫu ngâm 3,0 %NaCl và các môi trường ăn mòn khác	96

DANH MỤC CÁC HÌNH, ĐỒ THỊ, SƠ ĐỒ

Hình 1.1. Mục tiêu tiết kiệm nhiên liệu ô tô giai đoạn 2015 - 2025	4
Hình 1.2. Sơ đồ phân loại hợp kim nhôm	7
Hình 1.3. Khả năng hàn của hợp kim nhôm	8
Hình 1.4. Thép không gỉ ferritic chế tạo các thiết bị gia đình (a) máy nước nóng, (b) thùng giặt máy lồng đứng	8
Hình 1.5. Thép không gỉ austenitic và duplex là những vật liệu phổ biến cho các ứng dụng khác nhau trên giàn khoan dầu	9
Hình 1.6. (a) Cầu đi bộ Celtic Gateway, (b) giá đỡ pin năng lượng mặt trời phòng thương mại Luxembourg.....	9
Hình 1.7. Mặt liên kết mối hàn chằng bằng hàn MIG được chế tạo dưới các nguồn nhiệt đầu vào khác nhau (a) 0,709 kJ/cm, (b) 0,834 kJ/cm, (c) 0,990 kJ/cm.....	10
Hình 1.8. Biến dạng tấm nhôm và định tán với chiều sâu ép khác nhau (a) $s = 0,0$ mm, (b) $s = 1,65$ mm, (c) $s = 3,3$ mm, (d) $s = 5,0$ mm	10
Hình 1.9. Mặt ngoài mối hàn giữa AA6061 với AISI304 bằng phương pháp hàn ma sát áp lực “friction crush welding”	11
Hình 1.10. Ứng dụng của cấu trúc hỗn hợp nhôm/thép trong các ngành công nghiệp (a) hàng không vũ trụ, (b) ô tô, (c) đóng tàu.....	13
Hình 1.11. Mặt tiếp giáp mối hàn (a) AA6181 - T4/DP600 và (b) AA3003 - H18/thép cacbon thấp	14
Hình 1.12. Mặt liên kết mối hàn chằng AA6061/SUS304 bằng hàn MIG dưới tác dụng các hiệu điện thế khác nhau (a) 17 V, (b) 18 V, (c) 19 V	15
Hình 2.1. Sơ đồ mô tả quy trình FSW	17
Hình 2.2. Các loại mối FSW	18
Hình 2.3. Lỗ thoát chót trên đường hàn	19
Hình 2.4. Tổ chức kim loại mối hàn	20
Hình 2.5. Dụng cụ FSW.....	21
Hình 2.6. Hình dạng vai dụng cụ hàn.....	21
Hình 2.7. Hình dạng vai dụng cụ hàn khác nhau	21
Hình 2.8. Hình dạng chót hàn cơ bản	22

Hình 2.9. Hình dạng chốt hàn thực tế	22
Hình 2.10. Chốt hàn dạng ren	22
Hình 2.11. Các lực tác dụng trong quá trình hàn FSW	23
Hình 2.12. Khuyết tật không liền, gò ghề và trôi vật liệu bề mặt hàn	24
Hình 2.13. Khuyết tật lỗ rỗng bên trong mặt cắt ngang mối hàn	24
Hình 2.14. Khuyết tật AA5083/DH36 (a) lỗ chốt hàn, (b) vết nứt, trôi vật liệu	25
Hình 2.15. Sơ đồ pha Fe - Al theo nhiệt độ hàn	28
Hình 2.16. Cơ chế hình thành IMC ở các giai đoạn khác nhau	28
Hình 2.17. Sơ đồ minh họa sự phát triển cấu trúc vi mô lớp IMC.....	29
Hình 2.18. Cấu trúc tế vi AA6061 vùng HAZ tại vận tốc hàn 31,5 mm/phút (a) 900 vòng/phút, (b) 1800 vòng/phút.....	29
Hình 2.19. Mặt tiếp giáp mối hàn tại vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt khác nhau (a) 63 mm/phút (0,20), (b) 63 mm/phút (0,30), (c) 125 mm/phút (0,30)	30
Hình 2.20. Sơ đồ ăn mòn điện hóa mối hàn AA6061/SUS316	34
Hình 2.21. Ảnh vi mô bề mặt ăn mòn của mối hàn AA7449-T7951 khi ngâm 20 ngày trong dung dịch NaCl (a) Vùng TMAZ, (b) Vùng HAZ, (c) Vùng SZ.....	36
Hình 2.22. Ảnh vi mô ăn mòn vùng nứt của mối hàn AA2024-T351 ngâm trong dung dịch NaCl (a) 20 ngày, (b) 05 ngày	37
Hình 2.23. Ăn mòn trên mặt cắt ngang mối hàn chồng FSW AA2024-T351 với tốc độ quay và vận tốc hàn khác nhau	37
Hình 3.1. Quy trình thực nghiệm chế tạo và kiểm tra cơ tính mối hàn	39
Hình 3.2. Máy FSW phòng thí nghiệm NTU	41
Hình 3.3. Kích thước dụng cụ FSW, mm	42
Hình 3.4. Minh họa vị trí gá đặt vật liệu trong quá trình hàn chồng FSW giữa AA6061 và SUS316.....	43
Hình 3.5. Vị trí góc nghiêng của dụng cụ θ so với phương đứng	43
Hình 3.6. Mối hàn được chế tạo trên thiết bị hàn.....	43
Hình 3.7. Vị trí và quy trình đo nhiệt độ mối hàn FSW	44
Hình 3.8. Mẫu AA6061/SUS316 kiểm tra cấu trúc tế vi	44

Hình 3.9. (a) Máy cắt mẫu và đánh bóng, (b) kính hiển vi Olympus.....	45
Hình 3.10. Kính hiển vi điện tử quét (SEM), phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS).....	46
Hình 3.11. Vị trí khảo sát độ cứng mỗi hàn AA6061/SUS316	46
Hình 3.12. Máy đo độ cứng MMT-X1 và quy trình thử nghiệm	47
Hình 3.13. (a) Kích thước mẫu hàn thử kéo, mm và (b, c) thử nghiệm kéo mỗi hàn	48
Hình 3.14. (a) Kích thước mẫu thử nghiệm, mm và (b) mẫu sau đánh bóng.....	48
Hình 3.15. (a) Máy làm sạch Lofans CS - 602, (b) cân tiêu ly TN – Series.....	49
Hình 3.16. Mẫu AA6061/SUS316 ngâm trong dung dịch NaCl.....	50
Hình 3.17. Mẫu ngâm dung dịch 3,0 %NaCl và tác dụng hiệu điện thế khác nhau.....	50
Hình 3.18. Mẫu ngâm 3,0 %NaCl, U = 3V và nhiệt độ khác nhau.....	51
Hình 4.1. (a) Cấu trúc vĩ mô và (b, c, d) cấu trúc vi mô của mỗi hàn AA6061/SUS316 tại vận tốc hàn 100 mm/phút, chiều sâu ép chót 0,35 mm	52
Hình 4.2. Biểu đồ phân bố nguyên tố vùng tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 của mỗi hàn chế tạo ở vận tốc hàn 100 mm/phút và chiều sâu ép chót 0,35 mm.....	53
Hình 4.3. Các dạng phá hủy mỗi hàn AA6061/SUS316 được FSW với vận tốc hàn và chiều sâu ép chót khác nhau	54
Hình 4.4. Diện tích liên kết tại mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 tương ứng với vận tốc hàn và chiều sâu ép chót khác nhau	54
Hình 4.5. Hình SEM bề mặt phá hủy mỗi hàn được chế tạo bởi (a) 150 mm/phút (0,30 mm), (b) 150 mm/phút (0,35 mm) và (c) 250 mm/phút (0,35 mm).....	55
Hình 4.6. Hình SEM của mặt liên kết giữa AA6061 và SUS316 tại chiều sâu ép chót (mm) và vận tốc hàn (mm/phút) khác nhau.....	56
Hình 4.7. Ảnh hưởng vận tốc hàn và chiều sâu ép chót đến chiều dày lớp khuếch tán.....	58
Hình 4.8. Ảnh hưởng vận tốc hàn, chiều sâu ép chót đến đường cong chuyển vị.....	59
Hình 4.9. Ảnh hưởng vận tốc hàn, chiều sâu ép chót đến độ bền mỗi hàn	60
Hình 4.10. Độ cứng tế vi mỗi hàn AA6061/SUS316 dọc theo (a) mặt cắt ngang và (b) mặt cắt dọc tại vận tốc hàn và chiều sâu ép chót hàn khác nhau	61
Hình 4.11. Ảnh hưởng vận tốc hàn, chiều sâu ép chót đến nhiệt độ hàn	62
Hình 4.12. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến độ bền mỗi hàn tại vận tốc 100 mm/phút	63

Hình 4.13. Cấu trúc vi mô theo mặt cắt ngang của mẫu tại vận tốc hàn 100 mm/phút và chiều sâu ép chốt 0,35 mm: (a) SZ, (b) TMAZ, (c) HAZ và (d) BM AA6061	64
Hình 4.14. Kích thước hạt khác nhau tại chiều sâu ép chốt 0,35 mm và vận tốc hàn (a) 100 mm/phút, (b) 150 mm/phút, (c) 200 mm/phút và (d) 250 mm/phút.....	64
Hình 4.15. Bề mặt đại diện mối hàn AA6061/SUS316 được chế tạo ra bởi vận tốc hàn khác nhau (a) 200 mm/phút và (b) 50 mm/phút.....	65
Hình 4.16. Mặt cắt tổng quan mối hàn được chế tạo bởi vận tốc hàn 50 mm/phút và cấu trúc vi mô các vùng hàn (b) HAZ, (c) SZ, (d) TMAZ, và (e) BM AA6061	66
Hình 4.17. Nhiệt độ hàn tại SZ được chế tạo bởi các vận tốc hàn khác nhau	66
Hình 4.18. Nhiệt độ hàn cao nhất tại SZ và HAZ được chế tạo bởi các vận tốc hàn khác nhau	67
Hình 4.19. Ảnh SEM của liên kết giữa AA6061 và SUS316 được chế tạo bởi các vận tốc hàn khác nhau (a) 50 mm/phút, (b) 100 mm/phút và (c) 200 mm/phút	68
Hình 4.20. Biểu đồ phân bố nguyên tố phân tích chiều dày lớp khuếch tán được chế tạo tại vận tốc hàn (a) 75 mm/phút và (b) 200 mm/phút.....	68
Hình 4.21. Chiều dày lớp khuếch tán, lớp IMC bị ảnh hưởng bởi vận tốc hàn.....	69
Hình 4.22. Hình ảnh kính hiển vi bề mặt tiếp giáp tại tốc độ quay (a) 600 vòng/phút, (b) 800 vòng/phút và (c) 900 vòng/phút	69
Hình 4.23. (a) Hình SEM mặt liên kết mối hàn và (b) biểu đồ phân bố nguyên tố phân tích độ dày lớp khuếch tán mối hàn được tạo ra ở tốc độ quay 800 vòng/phút	70
Hình 4.24. Độ bền kéo lớn nhất của mối hàn tại tốc độ quay khác nhau.....	71
Hình 4.25. Vị trí đứt và bề mặt phá hủy tại vận tốc hàn, tốc độ quay và chiều sâu ép chốt khác nhau.....	71
Hình 4.26. Diện tích liên kết tại mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 tại (a) vận tốc hàn và (b) tốc độ quay khác nhau	72
Hình 4.27. Hình SEM bề mặt phá hủy mối hàn AA6061/SUS316 tại vận tốc hàn khác nhau (a, b) 75 mm/phút và (c, d) 150 mm/phút.....	73
Hình 4.28. Hình SEM bề mặt phá hủy được tạo ra bởi tốc độ quay khác nhau (a, c) 600 vòng/phút và (b, d) 900 vòng/phút	74
Hình 4.29. Đường cong ứng suất - biến dạng mối hàn tại vận tốc hàn khác nhau.....	74

Hình 4.30. Độ bền kéo lớn nhất của mối hàn tại vận tốc hàn khác nhau	75
Hình 4.31. Độ cứng tế vi mặt cắt ngang mối hàn tại vận tốc hàn khác nhau.....	76
Hình 4.32. Độ cứng tế vi chiều dày mối hàn tại vận tốc hàn khác nhau	77
Hình 4.33. Độ cứng tế vi theo chiều dày mối hàn tại tốc độ quay khác nhau	77
Hình 4.34. Độ cứng tế vi mặt cắt ngang mối hàn tại tốc độ quay khác nhau	78
Hình 4.35. Bề mặt mối hàn AA6061/SUS316 được chế tạo tại chiều dài chốt hàn khác nhau (a) $L = 2,7$ (mm), (b) $L = 2,8$ (mm), (c) $L = 2,9$ (mm).....	78
Hình 4.36. (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 và chiều sâu ép chốt 0,30 mm	79
Hình 4.37. Cấu trúc tế vi AA6061 vùng SZ tại chiều dài chốt hàn khác nhau (a) $L = 2,7$ mm, (b) $L = 2,8$ (mm), (c) $L = 2,9$ mm.....	79
Hình 4.38. Hình SEM mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 tại chiều dài chốt hàn khác nhau (a) $L = 2,7$ (mm), (b) $L = 2,8$ (mm), (c) $L = 2,9$ (mm).....	80
Hình 4.39. Hình SEM mặt tiếp giáp tại chiều sâu ép và dài chốt hàn khác nhau (a) $L = 2,9$ mm (0,20), (b) $L = 2,7$ mm (0,40), (c) $L = 2,7$ mm (0,30)	81
Hình 4.40. Ảnh hưởng chiều dài chốt hàn đến chiều dày lớp khuếch tán chiều dài chốt hàn 2,7 mm, (b) chiều dài chốt hàn 2,9 mm	81
Hình 4.41. (a) Chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn, (b) chiều dài chốt hàn ảnh hưởng đến chiều dày lớp khuếch tán.....	82
Hình 4.42. Ảnh hưởng của chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn đến (a) đường cong chuyển vị, (b) độ bền kéo mối hàn AA6061/SUS316.....	83
Hình 4.43. (a, b) mối hàn bị phá hủy tại mặt tiếp giáp (c) mối hàn bị đứt tại HAZ bên AA6061	84
Hình 4.44. Ảnh hưởng của chiều dài chốt hàn đến diện tích liên kết giữa AA6061 và SUS316.....	85
Hình 4.45. Hình SEM bề mặt phá hủy được chế tạo bởi chiều dài chốt hàn (mm) và chiều sâu ép chốt (mm) khác nhau (a) 2,9 - 0,20, (b) 2,8 - 0,30, (c) 3,0 - 0,20	85
Hình 4.46. 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/SUS316	85
Hình 4.47. Ăn mòn mối hàn trong các dung dịch %NaCl khác nhau (a) khối lượng ăn	

mòn - mg, (b) tốc độ ăn mòn - $\text{mg}/\text{mm}^2.\text{h}$	88
Hình 4.48. Cấu trúc ăn mòn mỗi hàn vùng SZ sau 30 ngày đêm (a) 0 %NaCl, (b) 1,5 %NaCl, (c) 3,0 %NaCl, (d) 4,5 %NaCl.....	88
Hình 4.49. Chiều rộng mặt tiếp giáp mỗi hàn vùng SZ bị ăn mòn sau 90 ngày đêm (a) 0 %NaCl, (b) 1,5 %NaCl, (c) 4,5 %NaCl	89
Hình 4.50. Cấu trúc ăn mòn mỗi hàn vùng TMAZ sau 90 ngày đêm ngâm trong dung dịch NaCl khác nhau (a) 0 %NaCl, (b) 1,5 %NaCl, (c) 4,5 %NaCl	89
Hình 4.51. Khối lượng ăn mòn mẫu ngâm trong dung dịch 3,0 %NaCl dưới tác dụng của hiệu điện thế khác nhau	90
Hình 4.52. Tốc độ ăn mòn mẫu ngâm trong dung dịch 3,0 %NaCl dưới tác dụng của hiệu điện thế khác nhau	91
Hình 4.53. Cấu trúc tế vi vùng SZ tại hiệu điện thế khác nhau (a) 3 V, (b) 4 V, (c) 5 V.....	91
Hình 4.54. Mẫu hàn ăn mòn bên cạnh vùng SZ tại $U = 3 \text{ V}$ và $U = 5 \text{ V}$	92
Hình 4.55. Tốc độ ăn mòn mỗi hàn ngâm trong dung dịch 3,0 %NaCl, $U = 3 \text{ V}$ và nhiệt độ khác nhau.....	93
Hình 4.56. Mặt cắt ngang ăn mòn mỗi hàn AA6061/SUS316 ở nhiệt độ 70°C	94
Hình 4.57. Cấu trúc ăn mòn tế vi vùng SZ tại nhiệt độ (a) 50°C , (b) 80°C , (c) 100°C	95
Hình 4.58. Mẫu hàn ăn mòn bên cạnh vùng SZ tại nhiệt độ 30°C và 80°C	95
Hình 4.59. Chiều rộng ăn mòn tại mặt tiếp giáp mỗi hàn vùng SZ dưới tác dụng của nhiệt độ khác nhau (a) 30°C , (b) 80°C	96

TÓM TẮT NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

Đề tài luận án: “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: Kỹ thuật cơ khí

Mã số: 9520103

Khóa: 2021

Họ và tên nghiên cứu sinh: Hồ Hữu Huy

Họ và tên người hướng dẫn: 1. PGS.TS. Trần Hưng Trà

2. PGS.TS. Dương Đình Hảo

Cơ sở đào tạo: Trường Đại học Nha Trang

Nội dung:

Mối hàn chồng FSW AA6061/SUS316 đã được chế tạo thành công với các phát hiện chính thu được như sau:

1. Vận tốc ảnh hưởng đến đáng kể đến nhiệt độ vùng hàn hơn so với chiều sâu ép chốt. Nhiệt độ mối hàn tăng lên khi giảm vận tốc hàn hoặc tăng chiều sâu ép chốt.
2. Tăng vận tốc hàn hoặc giảm chiều sâu ép chốt sẽ làm giảm độ dày của lớp IMC và lớp khuếch tán. Tuy nhiên khuyết tật không liên kết dễ hình thành dẫn đến giảm diện tích liên kết hai hợp kim hàn AA6061 và SUS316 trong trường hợp này.
3. Độ bền mối hàn bị ảnh hưởng đáng kể bởi vận tốc, chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt. Độ bền tăng khi vận tốc giảm hoặc tăng chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn.
4. Ở vận tốc hàn thấp, vị trí phá hủy mối hàn nằm ở vùng HAZ bên AA6061, nơi có cấu trúc thô và độ cứng thấp nhất. Khi tăng vận tốc hàn hoặc giảm chiều sâu ép chốt, mối hàn bị phá hủy tại bề mặt liên kết.
5. Tăng nồng độ môi trường NaCl làm tăng quá trình ăn mòn của mối hàn. Vị trí xảy ra phá hủy mạnh nhất được tìm thấy ở vùng SZ và TMAZ. Mối hàn bị ăn mòn đáng trong vùng tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 khi tăng hiệu điện thế.
6. Ăn mòn tăng từ 30 °C đến 70 °C nhưng giảm khi nhiệt độ lớn hơn 70 °C do cấu trúc màng oxit hấp thụ các ion Cl⁻ nên hình thành các điểm ăn mòn của mối hàn.

Người hướng dẫn

Nghiên cứu sinh



PGS.TS. Trần Hưng Trà PGS.TS. Dương Đình Hảo

Hồ Hữu Huy

KEY FINDINGS

Thesis title: “Research on strengths and failure behavior of the dissimilar FSW between aluminum alloy AA6061-T6 and stainless steel SUS316.”

Mayor: Mechanical engineering

Major code: 9520103

Course: 2021

PhD Student: Ho Huu Huy

Supervisor: 1. Assoc. Prof. PhD. Tran Hung Tra
2. Assoc. Prof. PhD. Duong Dinh Hao

Institution: Nha Trang University

Key Findings:

FSW between aluminum alloy AA6061-T6 and stainless steel SUS316 were fabricated successfully with the main findings:

1. The effect of welding speed on peak temperature is more significant than penetration. The heat input increases with decreasing the welding speed or increasing the penetration.
2. Increasing the welding speed or decreasing the penetration would lead to reducing the thickness of the intermetallic compounds and diffusion layers. However, non-bonded are formed easily, leading to a reduction in the bonding area in this case.
3. Strength of the joint is affected significantly by welding speed, penetration and pin length. Tensile strength increases with reducing welding speed or increasing penetration and pin length.
4. At low welding speed, the lap-joint is cracked at the HAZ region of the AA6061, where the coarse microstructure grain size and lowest hardness value are found. In contrast, the lap-joint is destroyed at the welding interface when the welding speed increased or the penetration decreased.
5. Increasing the NaCl concentration might increase the corrosion of the joint. The highest destruction areas are found in the SZ and TMAZ regions. The lap - joint is corroded significantly at the interface when the voltage is increased.
6. Corrosion increases significantly with increasing the temperature from 30 °C to 70 °C but decreases as the temperature is higher than 70 °C. In this case, the oxide film becomes unstable absorbing ions Cl^- forming corrosion spots.

Supervisor(s)



A. Prof. PhD. Tran Hung Tra



A. Prof. PhD. Duong Dinh Hao

PhD Student



Ho Huu Huy

MỞ ĐẦU

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

Tính ứng dụng: AA6061 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: Hợp kim nhôm AA6061 có trọng lượng nhẹ và độ bền cao, trong khi đó thép không gỉ 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 và SUS316 là một thách thức kỹ thuật lớn do sự khác biệt lớn về tính chất vật lý và hóa học. AA6061 có nhiệt độ nóng chảy thấp, dễ oxy hóa. Trong khi đó, thép không gỉ SUS316 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/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

- Chế tạo mối hàn chồng FSW giữa AA6061 và SUS316.
- Xác định ảnh hưởng của tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép chót và chiều dài

chốt hàn đến cấu trúc, độ cứng tế vi và độ bền kéo mối hàn.

- Xác định tốc độ ăn mòn mối hàn AA6061/SUS316 dưới tác động của môi trường làm việc thực tế: %NaCl, %NaCl + hiệu điện thế, %NaCl + hiệu điện thế + nhiệt độ.

3. Đối tượng nghiên cứu

- Độ bền, ứng xử phá hủy mối hàn AA6061/SUS316 và ảnh hưởng của thông số hàn.
- 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 (dày 3,0 mm) và tấm SUS316 (dày 1,0 mm).
- Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số hàn cơ bản gồm: tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn đến cấu trúc tế vi và cơ tính 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 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 IMCs, chiều dày lớp khuếch tán, hình thái bề mặt tiếp giáp giữa AA6061 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 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 FSW giữa AA6061 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/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/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 và SUS316 có thể được áp dụng trong các ngành hàng không, vũ trụ, nơi cần các vật liệu nhẹ nhưng bền cao (bền riêng cao) hoặc trong 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.

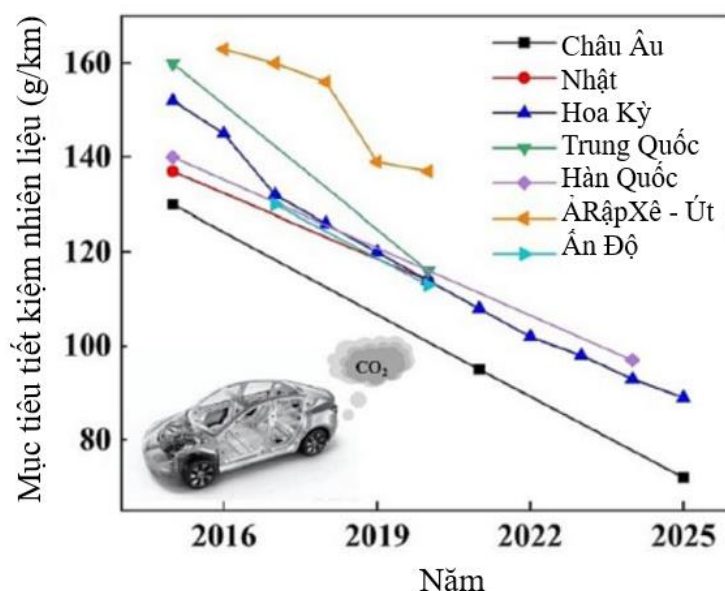
Tiết kiệm nguyên liệu và năng lượng: Kỹ thuật FSW cho phép sử dụng năng lượng thấp, không sử dụng que hàn, khí, thuốc bảo vệ. Kỹ thuật hàn hiệu quả giúp giảm lượng vật liệu bị lãng phí và tiêu thụ năng lượng, từ đó giảm tác động bất lợi đến môi trường và chi phí sản xuất.

Chương I. TỔNG QUAN

1.1. Nhu cầu ứng dụng tấm lưỡng kim nhôm/thép trong công nghiệp

Hàn là công nghệ quan trọng trong các ngành kỹ thuật cơ khí, ô tô, xây dựng, đóng tàu, thiết bị ngoài khơi và hàng không vũ trụ. Hiện nay, có nhiều phương pháp hàn đang được sử dụng để liên kết các hợp kim cùng loại và khác loại với nhau như: hàn hồ quang, hàn điện có khí bảo vệ, hàn điện có lớp thuốc bảo vệ, hàn điện trở và nhiều phương pháp hàn khác.

Năm 2022, chính phủ đã ban hành Nghị định số 06/2022/NĐ-CP quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn áp dụng đối với các tổ chức, cá nhân có liên quan đến hoạt động phát thải khí nhà kính [1]. Trên thế giới, giảm trọng lượng ô tô trở thành hướng nghiên cứu phổ biến nhằm cắt giảm lượng khí thải độc hại ra môi trường [10 - 12] và hướng đến mục tiêu phát thải ròng bằng 0 (net zero). Witik và cộng sự (2011) đã nghiên cứu và đánh giá tuổi thọ của vật liệu nhẹ ứng dụng trong ô tô [13]. Kết quả các thành phần vật liệu cấu tạo xe nhẹ có giá thành sản xuất cao nhưng giảm chi phí người tiêu dùng vì mức tiêu thụ nhiên liệu thấp. Như thể hiện Hình 1.1, các nước trên thế giới đưa ra mục tiêu tiết kiệm năng lượng tiêu thụ của ô tô giai đoạn 2015 - 2025.



Hình 1.1. Mục tiêu tiết kiệm nhiên liệu ô tô giai đoạn 2015 - 2025 [14]

Lượng khí thải CO₂ trung bình của Trung Quốc năm 2020 là 116 g/km, giảm 30 % so với mức được ghi nhận vào năm 2015. Tiết kiệm nhiên liệu ô tô tiêu thụ của các nước giảm dần, khu vực châu Âu giảm cao nhất vào năm 2025.

Nhôm và hợp kim nhôm được sử dụng nhiều trong đời sống, thứ hai sau sắt. Nhôm rất mịn và là kim loại dẻo, mang lại cho nhôm khả năng định dạng và uốn cong cực kỳ tốt. Bên cạnh đó, hợp kim nhôm nhẹ, 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 không chỉ có khả năng chống ăn mòn mà còn có khả năng chống nước biển và ăn mòn hóa học mạnh mẽ. Thép không gỉ sở hữu những đặc tính như chống ăn mòn, chống oxy hóa nên quan trọng cho việc phát triển cơ sở hạ tầng. Thép không gỉ có hàm lượng crom ít nhất 10,5 %, bổ sung thêm niken, là vật liệu chống ăn mòn nên không bị biến màu như các loại thép khác [15, 16]. Ở nhiệt độ thường, thép không gỉ có khả năng chống oxy hóa trong không khí.

Kết cấu tấm lưỡng kim nhôm/thép không gỉ là sự kết hợp các thế mạnh vượt trội của từng vật liệu. Trong đó có thể tận dụng lợi thế của hợp kim nhôm để giảm trọng lượng các bộ phận [12, 17, 18]. Khi hàn hợp kim nhôm với thép không gỉ, chất lượng mối hàn cần đảm bảo độ tin cậy [19]. Tuy nhiên, do sự khác biệt lớn về tính chất vật lý và hóa học nên việc sử dụng các phương pháp hàn nóng chảy để tạo mối liên kết giữa hợp kim nhôm và thép không gỉ gặp rất nhiều thách thức [20 - 23]. Theo kết quả nghiên cứu của Bang và cộng sự (2012) FSW giáp mí giữa AA6061 và thép không gỉ 304, các hợp chất liên kết kim loại giòn như FeAl_2 , FeAl_3 , Fe_2Al_5 ... dễ hình thành tại mặt tiếp giáp, sẽ làm giảm cơ tính mối hàn [24]. Vì vậy, hợp kim nhôm và thép không gỉ rất khó hàn bằng phương pháp hàn nóng chảy truyền thống. Hiện nay, các nhà nghiên cứu đã sử dụng phương pháp FSW để chế tạo mối hàn giữa hợp kim nhôm và thép [25 - 43].

1.2. Các công trình FSW trong và ngoài nước

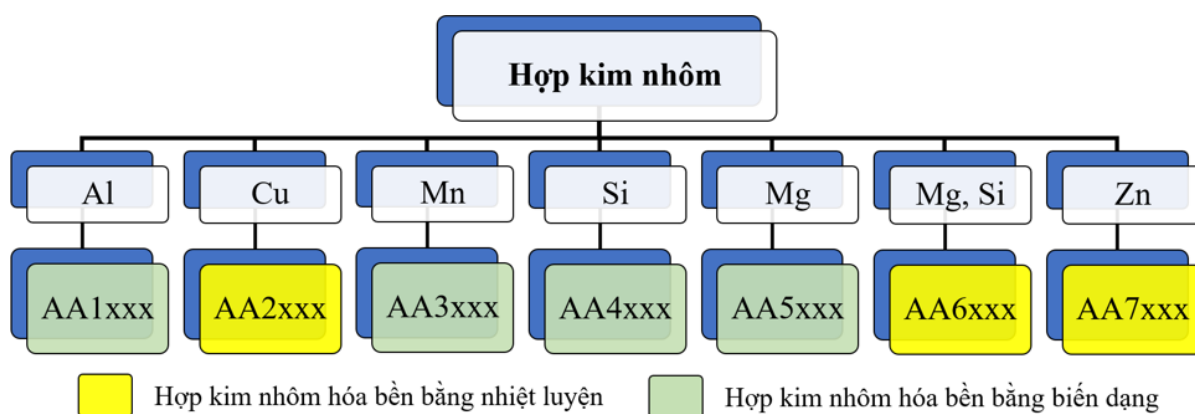
Công nghệ FSW là một trong những kỹ thuật hàn ở trạng thái rắn [44]. Hàn FSW đã và đang nổi lên như một công nghệ vượt trội để hàn hợp kim nhôm và thép với độ bền và tuổi thọ cao [45]. Tương tự như hàn siêu âm, hàn FSW không sử dụng khí hoặc chất trợ dung [44]. Tuy nhiên, giá thành thiết bị hàn FSW cao nên ứng dụng còn hạn chế [44, 45]. Vì vậy, công nghệ này chưa được chú ý nhiều ở trong nước. 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 [2]. 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 [3, 4]. Phan Thanh Nhân và cộng sự (2019) đã chế tạo thành công mối hàn FSW chữ T của AA5083 [5].

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 [26, 27, 30 - 37, 46, 47]. 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 [48 - 50]. 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 đã được công bố [26 - 30, 51]. 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. Jabraeili và cộng sự (2021) cho rằng, độ lệch chốt ảnh hưởng đến việc hình thành lớp IMC, đặc tính liên kết của mối hàn giữa hợp kim nhôm AA2024 với thép không gỉ 304 [52]. Cơ tính của mối hàn tối ưu ở tốc độ quay 750 vòng/phút, vận tốc hàn 65 mm/phút. Ảnh hưởng của các thông số hàn đến nhiệt độ mối hàn trên đơn vị chiều dài và sự hình thành cấu trúc tế vi khi hàn FSW được Kim và cộng sự (2014) công bố [53]. Theo đó, mối hàn đạt cơ tính tốt nhất với tốc độ quay 800 vòng/phút và vận tốc hàn 180 mm/phút. Liu và cộng sự (2023) sử dụng rung động siêu âm để điều chỉnh sự tương phản các hợp chất kim loại, do đó lớp IMC tại tâm mặt liên kết thay đổi từ FeAl_3 giòn sang FeAl có độ dẻo cao hơn [54]. Geng và cộng sự (2022) nhận thấy rằng, chiều dày lớp IMC vượt quá 1,5 μm làm giảm độ bền của mối hàn [55]. Do đó, việc kiểm soát lớp IMC hợp lý là yếu tố quan trọng để cải thiện tính chất cơ học của mối hàn giữa các hợp kim nhôm và thép [56]. Bổ sung vật liệu trung gian cho mặt tiếp xúc giữa hợp kim nhôm và thép là phương pháp hiệu quả để tăng chất lượng mối hàn [57]. Zheng và cộng sự (2016) cho rằng tấm Zn như một lớp xen kẽ có lợi cho cơ tính mối hàn FSW giữa AA6061 và SUS316 [25]. Tấm Zn có thể hạn chế hiệu quả sự hình thành lớp IMC. Mặt khác, các nghiên cứu xử lý nhiệt sau hàn cho các mối hàn FSW đã được thực hiện. Moradi và cộng sự (2017) nhận thấy rằng phương pháp xử lý nhiệt trước và sau hàn có thể đạt được độ bền kéo 92 % so với AA6061 nên vì đã giảm SiC trong AA6061 [58]. Xu và cộng sự (2021) đã sử dụng phương pháp xử lý nhiệt độ thấp và ủ để cải thiện tính chất cơ học của mối hàn giáp mí hợp kim Ti-6,5Al-1Mo-1V-2Zr bằng phương pháp FSW [59]. Kết quả cho thấy rằng, xử lý nhiệt là một phương pháp khả thi để cải thiện tính chất của mối hàn. Baghdadi và cộng sự (2019) cho rằng quá trình xử lý nhiệt sau hàn FSW của AA6061 có thể thúc đẩy sự phân bố đồng đều các hạt Mg_2Si , ngăn chặn sự phát triển của hạt và cải thiện cơ tính của mối hàn [60].

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

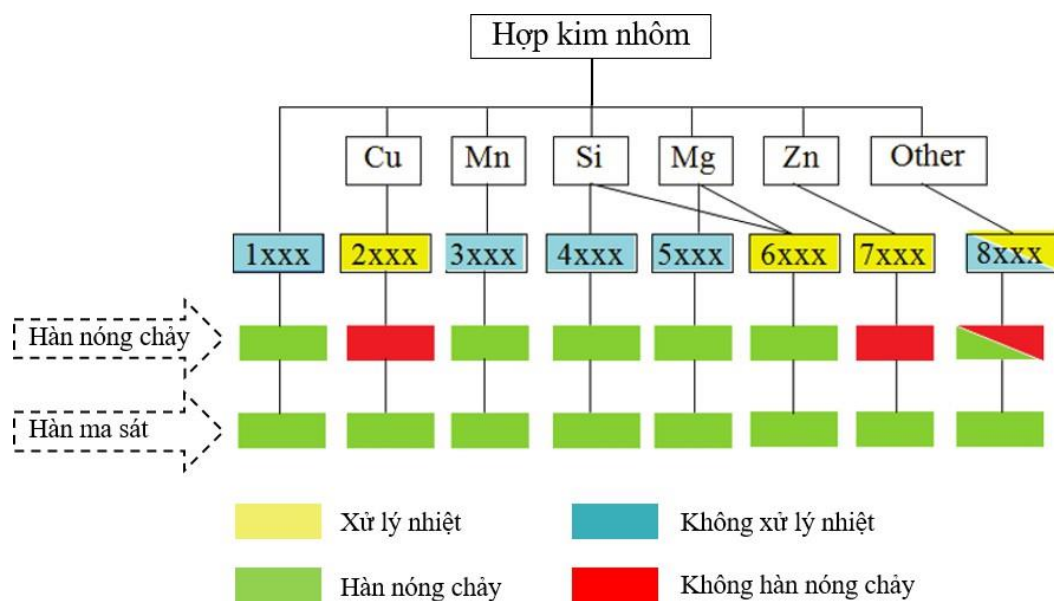
1.3.1. Hợp kim nhôm

Trong nền kinh tế nhôm có một vị trí nhất định không thể thay thế. Độ bền kéo của nhôm nguyên chất thấp nên phạm vi sử dụng còn hạn chế. Nhôm nguyên chất được dùng để chế tạo các sản phẩm chịu tải nhẹ như bao bì, khung cửa và sử dụng trong ngành công nghiệp điện... Hợp kim nhôm là hợp kim của nhôm với các nguyên tố khác như: đồng, magie, kẽm, mangan, silic,... (Hình 1.2). Hợp kim nhôm nhóm 2xxx gồm các nguyên tố Al - Cu có thêm mangan, magiê và chì, được ứng dụng trong các kết cấu vận tải, cánh quạt và phụ kiện. AA2014 và AA2024 được ứng dụng trong ngành hàng không, giao thông vận tải và dụng cụ thể thao. Hợp kim nhôm nhóm 5xxx là hợp kim của nhôm và < 6 % Mg. Đây 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 ngành hàng không khác. Hợp kim nhôm hóa bền bằng nhiệt luyện nhóm 2xxx, nhóm 7xxx được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực hàng không vũ trụ [22, 23, 45, 61].



Hình 1.2. Sơ đồ phân loại hợp kim nhôm

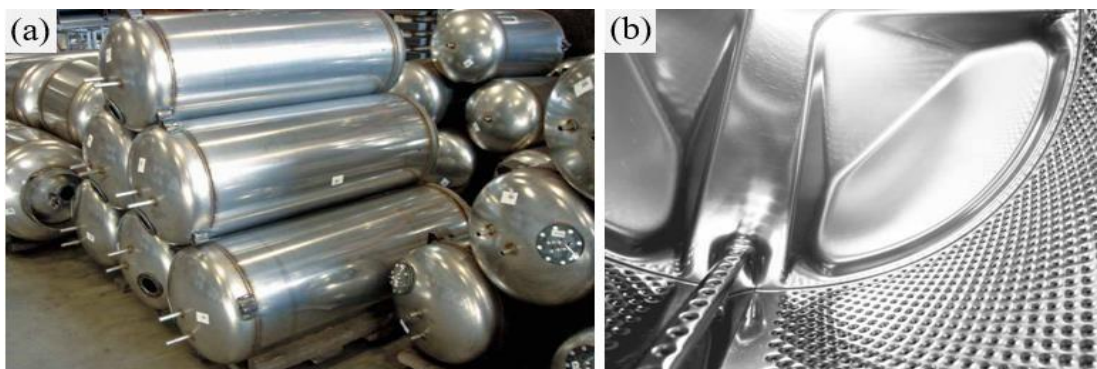
Hầu hết hợp kim nhôm đều khó liên kết bằng phương pháp hàn (nhóm vật liệu nhạy nhiệt), đặc biệt các hợp kim nhôm nhóm 2xxx và nhóm 7xxx. Hiện nay, phương pháp hàn ma sát được xem là giải pháp hữu hiệu để hàn tất cả các hợp kim nhôm, kể cả hợp kim nhôm khó hàn thuộc các nhóm 2xxx và nhóm 7xxx (xem Hình 1.3).



Hình 1.3. Khả năng hàn của hợp kim nhôm [44]

1.3.2. Thép không gỉ

Kể từ giữa thế kỷ 20, thép không gỉ tiêu thụ trên thế giới tăng khoảng 6 % mỗi năm [15]. Trong đời sống, chúng được sử dụng để sản xuất các đồ gia dụng như xoong, nồi, chén, đĩa, bồn rửa chén, vòi nước... Ngoài ra, bu lông, đinh tán chế tạo từ thép không gỉ được sử dụng để lắp ghép các sản phẩm hoạt động trong môi trường ăn mòn và các môi trường bất lợi khác. Khi lắp ghép, xuất hiện lớp oxit tại vị trí liên kết, phát hiện bằng mắt thường khi tháo rời. Thép không gỉ ferritic thường được sử dụng trong kiến trúc, dụng cụ sinh hoạt gia đình [15] được thể hiện Hình 1.4.



Hình 1.4. Thép không gỉ ferritic chế tạo các thiết bị gia đình

(a) máy nước nóng, (b) thùng giặt máy lồng đứng [15]

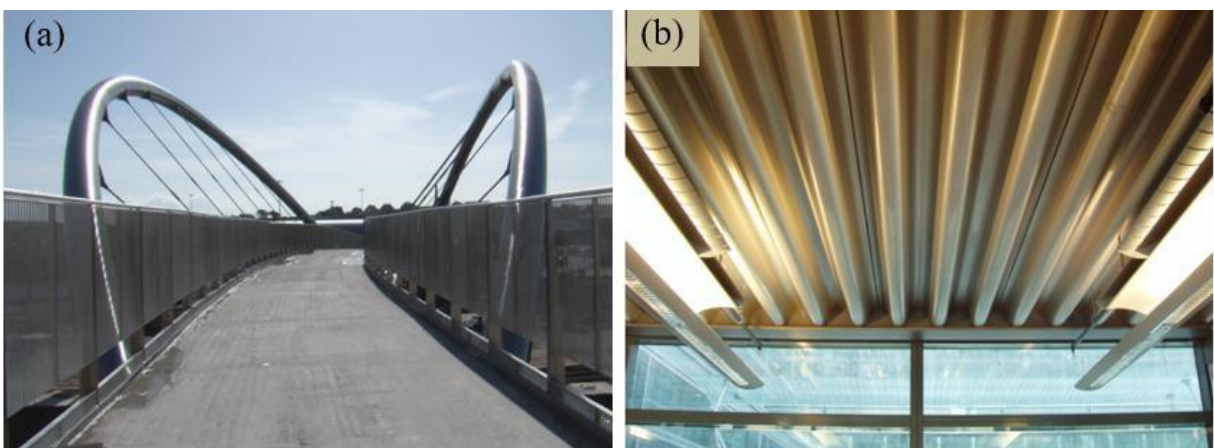
Thép không gỉ chịu được axit và không co giãn ở nhiệt độ lên đến 1100 °C, là vật liệu phổ biến cho các ứng dụng khác nhau trên giàn khoan dầu [15]. Ngoài ra, đặc tính quan trọng nhất là độ dẻo dai tốt ở nhiệt độ thấp nên thép không gỉ chế tạo thiết bị vận

tải và bảo quản khí thiên nhiên hóa lỏng, chịu nhiệt độ $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16]. Khi sử dụng thép không gỉ 304 và 316, chúng ta đang sử dụng lớp austenitic. Thép không gỉ austenitic và duplex thường dùng để sản xuất các kết cấu hàng hải, giàn khoan trên biển (Hình 1.5).



Hình 1.5. Thép không gỉ austenitic và duplex là những vật liệu phổ biến cho các ứng dụng khác nhau trên giàn khoan dầu [15]

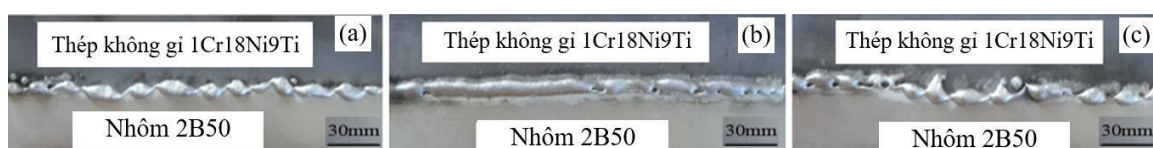
Thép không gỉ được sử dụng cho kết cấu chính các cây cầu như: thép không gỉ duplex 1.4462 được gia công cho cầu đi bộ Celtic Gateway ở Holyhead, Vương quốc Anh [60] (Hình 1.6(a)). Năng lượng mặt trời được khai thác để tạo ra điện thông qua pin năng lượng mặt trời. Như Hình 1.6(b), thép không gỉ làm khung nền cho hệ thống pin năng lượng mặt trời gắn vào tòa nhà [62].



Hình 1.6. (a) Cầu đi bộ Celtic Gateway, (b) giá đỡ pin năng lượng mặt trời phòng thương mại Luxembourg [62]

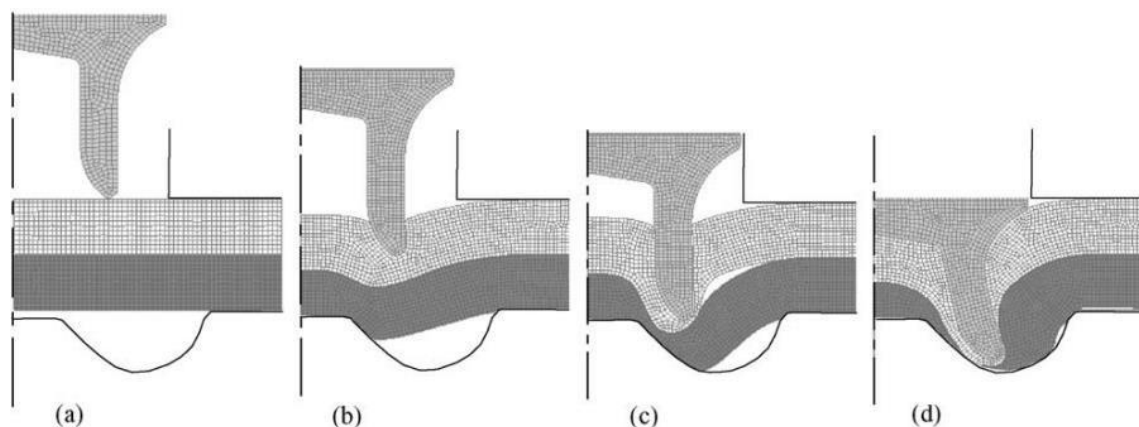
1.4. Một số kỹ thuật liên kết giữa hợp kim nhôm với thép không gỉ

Các phương pháp liên kết giữa nhôm và thép đang được áp dụng hiện nay gồm: hàn laser [20, 63, 64], hàn điện trở [65 - 67], đinh tán [68 - 70] và FSW [21, 44, 71 - 73]. Nhiệt độ nóng chảy và hệ số giãn nở nhiệt của nhôm và thép là một thách thức lớn để hàn với nhau. Bằng phương pháp hàn MIG, mối hàn chồng giữa nhôm và thép không gỉ bị nhiều khuyết tật như rỗ, không liên kết đều [22] trên Hình 1.7. Khi hàn chồng giữa nhôm AA6061 và SUS304 bằng kỹ thuật hàn MIG, cần chọn hiệu điện thế hàn và vật liệu phụ trợ phù hợp thì mối hàn đạt được độ bền tốt nhất có thể [22, 23].



Hình 1.7. Mặt liên kết mối hàn chồng bằng hàn MIG được chế tạo dưới các nguồn nhiệt đầu vào khác nhau (a) 0,709 kJ/cm, (b) 0,834 kJ/cm, (c) 0,990 kJ/cm [22]

Để tránh sự hình thành lớp hợp chất liên kim giòn, nhôm được liên kết với thép bằng đinh tán [68 - 70] được thể hiện Hình 1.8.



Hình 1.8. Biến dạng tấm nhôm và đinh tán với chiều sâu ép khác nhau (a) $s = 0,0$ mm, (b) $s = 1,65$ mm, (c) $s = 3,3$ mm, (d) $s = 5,0$ mm [69]

Tuy nhiên, liên kết bằng đinh tán có độ bền mỏi thấp do ứng suất tập trung tại các lỗ. Abe và cộng sự (2006) nghiên cứu liên kết hợp kim nhôm và thép cacbon thấp bằng phương pháp đinh tán [69]. Chiều sâu ép đinh tán khác nhau, biến dạng của tấm nổi và đinh tán khác nhau. Vị trí liên kết bị biến dạng và không hình thành liên kết kim loại nên chất lượng mối nối không tốt hơn các phương pháp liên kết khác.

Nhược điểm của phương pháp hàn điểm điện trở giữa nhôm và thép là năng lượng tiêu thụ, ứng suất dư và độ mài mòn điện cực lớn nên khó kiểm soát chất lượng mối hàn.

Sử dụng dòng điện hàn cao có thể làm giảm tuổi thọ điện cực, do đó cần máy hàn điểm công suất lớn [72]. 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. Meco và cộng sự (2015) nghiên cứu mối hàn FSW chữ T giữa thép XF350, dày 2 mm và nhôm AA5083 - H22 dày 6 mm, chiều dày lớp IMC thay đổi khoảng 4 μm - 22 μm [64]. Hàn siêu âm bị hạn chế ở tấm rất mỏng và hình dạng cụ thể [26, 73].

Prem Singh và cộng sự (2020) đã nghiên cứu hàn chồng ma sát áp lực giữa AA6061 và AISI304 thành công [61]. Kết quả cho thấy, mặt ngoài của mối hàn không thẳng, nhiều xỉ và ít thẩm mỹ (Hình 1.9). Tuy nhiên, mối hàn đạt chất lượng hơn so với mối hàn được chế tạo bằng phương pháp hàn MIG. Độ bền kéo mối hàn bằng phương pháp hàn MIG thấp do kim loại hàn ít trộn lẫn vào nhau. Trong khi đó, FSW và FCW thể hiện sự pha trộn tốt hơn dẫn đến độ bền kéo cao hơn. Độ bền kéo mối hàn theo các phương pháp hàn nêu trên thể hiện trong Bảng 1.1.



Hình 1.9. Mặt ngoài mối hàn giữa AA6061 với AISI304 bằng phương pháp hàn ma sát áp lực “friction crush welding” [61]

Bảng 1.1. Ứng suất kéo lớn nhất tương ứng các kỹ thuật hàn [61]

MIG	FSW	FCW
104,4 MPa	182 Mpa	190 MPa

Ngoài ra, độ bền mối hàn FSW cao hơn nhiều so với mối hàn laser [35, 44].

Hiện nay các công trình nghiên cứu hàn giữa hợp kim nhôm và thép không gỉ còn nhiều hạn chế, đặc biệt là FSW giữa AA6061 và SUS316, cụ thể:

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

- Nước ngoài: Zhang H. và cộng sự (2011), Shah L.H. và cộng sự (2013) đã nghiên cứu hàn chồng hợp kim nhôm và thép không gỉ bằng phương pháp hàn MIG. Kết quả, mối

hàn gồ ghề, ít ngẫu, độ bền mối hàn đạt 20 % độ bền hợp kim nhôm ban đầu [22, 23]. Mối hàn đạt độ bền cao hơn, xấp xỉ 50 % hợp kim nhôm bằng phương pháp FCW nhưng mối hàn không thẳng và nhiều xỉ [61]. Mahto R.P. và cộng sự (2016) nghiên cứu cấu trúc vi mô mối hàn AA6061/AISI304, xuất hiện hợp chất Fe_2Al_5 , $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ [26] của lớp IMC. Newishy M. và cộng sự (2023) nghiên cứu cấu trúc vi mô mối hàn AA6061/SUS316, lớp IMC xuất hiện hợp chất FeAl_3 và FeAl_6 . Kích thước hạt thép trong AA6061 lớn, đạt 6 μm [32]. 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 [25]. Xingbin H. và cộng sự (2024) ủ nhiệt SUS316 đến 800 °C. Kết quả độ bền mối hàn chồng FSW AA6061/SUS316 tăng xấp xỉ 14,5 % vì chiều dày lớp IMC nhỏ với hợp chất FeAl_3 giòn [33].

Số lượng các công trình nghiên cứu FSW giữa AA6061 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 với SUS316”.

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

1.5.1. Hàng không vũ trụ

Khung và vỏ máy bay: Sự kết hợp giữa hợp kim nhôm (khối lượng nhẹ, độ bền cao) và thép không gỉ (chịu nhiệt, khả năng chống ăn mòn) giúp tối ưu hóa cấu trúc khung và vỏ máy bay, giảm trọng lượng tổng thể và tăng cường độ bền [71, 74 - 78].

Các bộ phận kết cấu: Nhằm đảm bảo tính ổn định, độ bền cao khi hoạt động trong môi trường khắc nghiệt, các bộ phận và kết cấu chịu lực, chịu nhiệt được liên kết giữa thép không gỉ với hợp kim nhôm [71, 74 - 78].

1.5.2. Công nghiệp ô tô

Khung gầm và hệ thống ống xả: Sự kết hợp giữa hợp kim nhôm và thép không gỉ giúp giảm trọng lượng xe, tăng hiệu suất nhiên liệu. Tấm lợp kim nhôm/thép không gỉ đạt độ bền tối ưu và có khả năng chống ăn mòn tốt [71, 74, 76 - 79].

1.5.3. Kết cấu hàng hải

Kết cấu tàu: Hợp kim nhôm được sử dụng cùng với thép không gỉ trong thân tàu và các bộ phận khác để cải thiện khả năng chống ăn mòn từ nước biển và giảm trọng lượng thân tàu [71, 74, 76 - 78].

Thiết bị hàng hải: Các thiết bị như hệ thống neo, cầu thang và bộ phận chịu lực khác sử dụng tấm lưỡng kim nhôm/thép để đảm bảo độ bền và tuổi thọ. Hình 1.10 mô tả các ứng dụng của cấu trúc hỗn hợp nhôm/thép trong các ngành hàng không vũ trụ, ô tô và đóng tàu.



Hình 1.10. Ứng dụng của cấu trúc hỗn hợp nhôm/thép trong các ngành công nghiệp (a) hàng không vũ trụ, (b) ô tô, (c) đóng tàu [57]

1.5.4. Kết cấu xây dựng

Kết cấu chịu lực: Hợp kim nhôm và thép không gỉ được sử dụng trong các kết cấu chịu lực của tòa nhà và cầu để đảm bảo độ bền cao, không bị ăn mòn và giảm trọng lượng tổng thể của thiết bị, kết cấu [77].

Trang trí nội thất: 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 để mang lại tính thẩm mỹ, độ bền và giá thành chi tiết, sản phẩm [77].

1.5.5. Thực phẩm và đồ uống

Thiết bị chế biến thực phẩm: Các bồn chứa, ống dẫn và thiết bị chế biến thực phẩm sử dụng tấm lưỡng kim nhôm/thép không gỉ để đảm bảo tính vệ sinh, chống ăn mòn và độ bền cho máy và thiết bị [77].

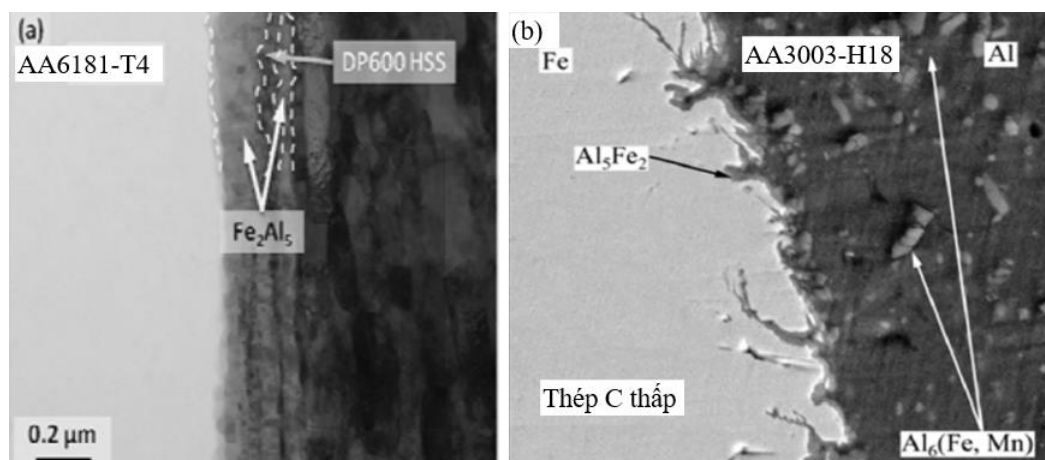
Đồ gia dụng: Thiết bị gia dụng như nồi, chảo và các dụng cụ nhà bếp khác sử dụng sự kết hợp giữa hợp kim nhôm và thép không gỉ mục đích đảm bảo độ bền, khả năng chống ăn mòn, dễ dàng vệ sinh và giảm giá thành sản phẩm [77].

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

Nhiệt độ nóng chảy của hợp kim nhôm và thép chênh lệch khá lớn nên hệ số giãn nở nhiệt khác nhau. Cấu trúc mạng tinh thể của 2 kim loại đa dạng nên khó liên kết ổn định với nhau bằng phương pháp hàn nóng chảy thông thường [21, 32, 80]. Những khó khăn chính như sau:

Tại nhiệt độ thường, độ hòa tan của sắt trong nhôm rất thấp, gần như bằng không. Giới hạn tan của sắt trong nhôm là 0,01 % - 0,022 % ở nhiệt độ từ 225 °C đến 600 °C

[53]. Bên cạnh đó, vùng tiếp giáp của mối hàn nhôm với thép không gỉ dễ sinh ra các hợp chất liên kim giòn như FeAl_2 , FeAl_3 , Fe_2Al_5 (Hình 1.11)... dẫn đến hình thành vết nứt mối hàn [21, 24, 32, 33].



Hình 1.11. Mặt tiếp giáp mối hàn (a) AA6181 - T4/DP600 và (b) AA3003 - H18/thép cacbon thấp [21].

Như thể hiện trong Bảng 1.2, sự khác biệt về tính chất hóa - lý, nhiệt độ nóng chảy của nhôm và thép... có thể dẫn đến ứng suất dư sau khi hàn nóng chảy [20, 21].

Bảng 1.2. Sự khác nhau tính chất hóa học, vật lý giữa Al và Fe [20]

Tính chất hóa học, vật lý	Al	Fe
Nhiệt dung riêng (J/kg.K)	1080	795
Nhiệt độ nóng chảy ($^{\circ}\text{C}$)	660	1536
Độ dẫn nhiệt (W/m.K)	237	80
Hệ số giãn nở nhiệt (10^{-6} K^{-1})	24	11
Khối lượng riêng (kg/m^3)	2385	7015
Môđun đàn hồi (GPa)	70	210
Điện trở suất ($\mu\Omega.\text{m}$)	0,2425	1,386

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 [21, 81].

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 [21].

Mối hàn nhiều khuyết tật như: rỗ xỉ, nứt nóng, nứt nguội, vùng hàn bị giòn, ứng suất dư và biến dạng khá lớn (Hình 1.12)... 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 [6, 7].



Hình 1.12. Mặt liên kết mối hàn chồng AA6061/SUS304 bằng hàn MIG dưới tác dụng các hiệu điện thế khác nhau (a) 17 V, (b) 18 V, (c) 19 V [23]

1.7. Mục tiêu, giới hạn và cấu trúc của luận án

1.7.1. Mục tiêu luận án

Mục tiêu chính của nghiên cứu này nhằm tập trung vào một số nội dung sau:

- Phân tích ảnh hưởng của tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn đến sự hình thành nhiệt độ, quá trình biến đổi cấu trúc vật liệu và đặc tính lớp liên kết kim loại vùng hàn.

- Phân tích cấu trúc mặt liên kết, chiều dày lớp IMC, lớp khuếch tán, diện tích liên kết giữa AA6061 và SUS316 đến độ bền mối hàn. Đồng thời, phân tích ứng xử phá hủy của mối hàn.

- Phân tích quá trình ăn mòn của mối hàn dưới tác dụng của các môi trường khác nghiệt khác nhau như môi trường NaCl, môi trường điện cực và môi trường nhiệt.

1.7.2. Giới hạn luận án

Đề tài nghiên cứu ảnh hưởng các thông số đến cơ tính mối hàn thông qua cấu trúc mặt liên kết, lớp IMC, lớp khuếch tán và diện tích liên kết hai hợp kim hàn. Bên cạnh đó, đề tài còn phân tích ăn mòn mối hàn trong các môi trường ăn mòn khác nhau khi mối hàn đạt độ bền cao nhất được chế tạo với các thông số công nghệ cụ thể. Vì vậy, hàn chồng FSW giữa AA6061 và SUS316 và thử nghiệm ăn mòn với các nội dung sau:

- Chiều dày tấm kim loại hàn AA6061, SUS316 tương ứng là 3,0 mm và 1,0 mm.
- Nghiên cứu ảnh hưởng các thông số công nghệ như vận tốc hàn, tốc độ quay, chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn đến cơ tính mối hàn.
- Nghiên cứu đặc tính liên kết, độ bền và ứng xử phá hủy của mối hàn.
- Nghiên cứu ăn mòn mối hàn trong các môi trường ăn mòn khác nhau: dung dịch NaCl, dung dịch NaCl + hiệu điện thế, dung dịch NaCl + hiệu điện thế + nhiệt độ.

1.7.3. Cấu trúc luận án

Luận án được trình bày theo cấu trúc sau:

Chương I. TỔNG QUAN

Trình bày tổng quan về các vấn đề nghiên cứu liên quan đến đề tài như đặc tính của hợp kim nhôm, thép không gỉ và những thách thức khi hàn. Các nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến đề tài được tổng hợp, tìm ra khoảng trống để nghiên cứu và làm sáng tỏ. Mục tiêu của luận án cũng được làm rõ trong chương này.

Chương II. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trình bày nguyên lý, thông số hàn, ưu nhược điểm và các ứng dụng hiện nay của kỹ thuật FSW. Sự hình thành các lớp IMC giữa hợp kim nhôm và thép khi hàn cũng được thông qua. Cơ sở lý thuyết về phá hủy ăn mòn mối hàn cũng được đề cập trong chương này.

Chương III. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ THÍ NGHIỆM

Một số đặc tính và kích thước vật liệu sử dụng cho thí nghiệm được trình bày trong chương này. Quá trình chế tạo mối hàn và phương pháp lắp đặt thí nghiệm được mô tả chi tiết. Bên cạnh đó, các thiết bị được sử dụng để khảo sát, phân tích cũng được chỉ rõ cụ thể và chi tiết.

Chương IV. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Kết quả phân tích các biến đổi nhiệt độ, cấu trúc, độ bền và sự phá hủy của mối hàn dưới tác động của các yếu tố như tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép chót và chiều dài chót hàn sẽ được trình bày trong chương này.

Trình bày quá trình ăn mòn mối hàn AA6061/SUS316 trong các điều kiện môi trường ăn mòn khác nhau gồm: dung dịch NaCl, dung dịch NaCl + hiệu điện thế, dung dịch NaCl + hiệu điện thế + nhiệt độ.

Chương V. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Một số kết luận nổi bật trong nghiên cứu này và những đề xuất các phương án nghiên cứu tiếp theo trong tương lai sẽ được trình bày chi tiết ở phần cuối của luận án.

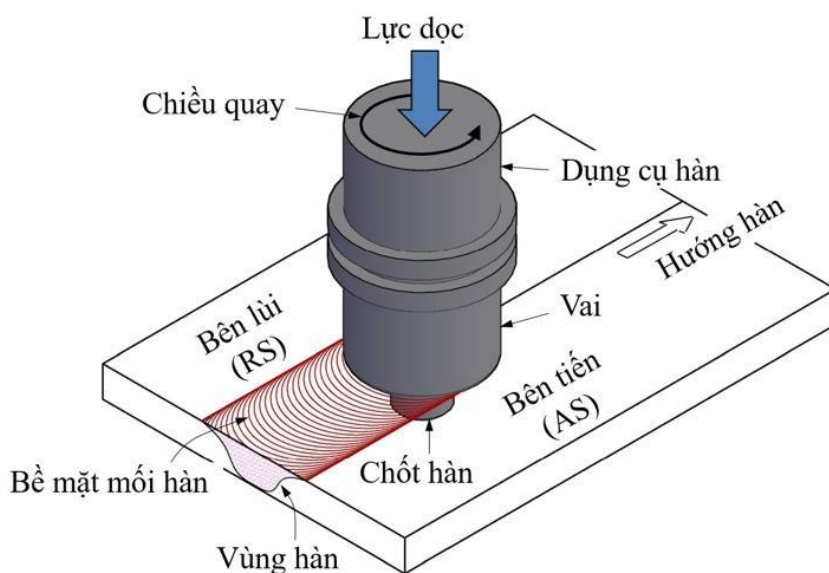
Chương II. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Tổng quan về kỹ thuật FSW

2.1.1. Nguyên lý FSW

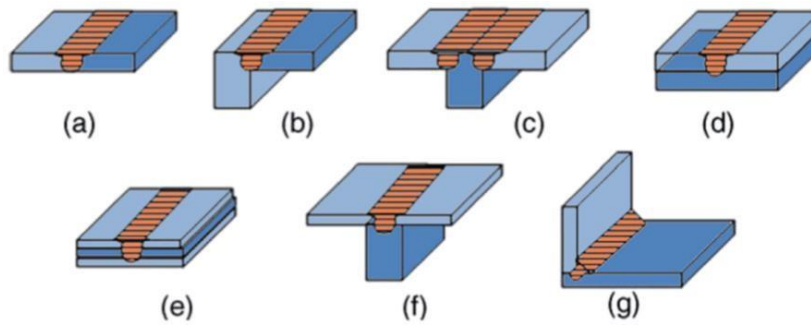
Viện hàn TWI ở Vương quốc Anh đã sáng chế FSW, một trong những kỹ thuật hàn ở trạng thái rắn [44]. FSW với nguyên lý cơ bản: dụng cụ hàn xoay, chịu lực hướng trục nên từ từ tiếp xúc và thâm nhập vào phôi để hình thành nhiệt ma sát. Dụng cụ hàn xuyên vào phôi làm thay đổi cấu trúc mối hàn do vật liệu biến dạng dẻo mạnh ở vùng khuấy. Vật liệu hàn di chuyển dọc theo hướng hàn của dụng cụ sẽ hình thành mối hàn.

Trong Hình 2.1, dụng cụ hàn đi vào phôi từ từ ngược theo chiều kim đồng hồ. Do hướng xoay của dụng cụ cùng hướng với hướng hàn nên được gọi là bên tiến (advancing side - AS). Ngược lại, là bên lùi (retreating side - RS). Dụng cụ hàn không chỉ tạo nhiệt cho phôi, mà còn di chuyển và ép vật liệu để hình thành mối hàn. Ma sát của đầu khuấy và vai dụng cụ với phôi cũng như biến dạng dẻo vật liệu khu vực khuấy sinh ra nhiệt trong phôi. Vật liệu được làm mềm cục bộ di chuyển theo chiều quay từ phía trước ra phía sau đầu khuấy và lấp đầy khoảng trống của dụng cụ hàn. Vai dụng cụ hàn giúp ngăn kim loại tràn ra khỏi mối hàn, hình thành mối hàn giống như bề mặt phôi ban đầu.



Hình 2.1. Sơ đồ mô tả quy trình FSW

Hàn ma sát khuấy có thể được sử dụng để hàn nhiều loại mối hàn khác nhau, chẳng hạn như hàn giáp mí, hàn chồng và hàn chữ T... như Hình 2.2 [44].



Hình 2.2. Các loại mối FSW

2.1.2. Ưu, nhược điểm của kỹ thuật FSW

2.1.2.1. Ưu điểm

- Nhiệt độ duy trì dưới điểm nóng chảy của vật liệu hàn, không cần vật liệu phụ trợ, không cần khí hay thuốc bảo vệ. FSW tiết kiệm năng lượng, không tạo ra khói, tán xạ và tia hồ quang [21, 32, 44, 45].

- Trong FSW, đầu vào năng lượng và biến dạng thấp hơn đáng kể so với kỹ thuật hàn nóng chảy truyền thống, do đó cải thiện tính chất hàn. Kết quả là các mối hàn ít biến dạng, ít ứng suất dư và ít khuyết tật [44, 45].

- Hàn tốt các vật liệu khác nhau với độ dày khác nhau. Nhiệt đầu vào thấp nên chiều dày lớp IMC tại mặt tiếp giáp giữa nhôm và thép nhỏ hơn so với hàn nóng chảy truyền thống [44, 72].

- Cho phép hàn được hầu hết các hợp kim khác nhau cho kết quả độ bền và tuổi thọ vượt trội [82 - 86].

- FSW được sử dụng phổ biến trong các lĩnh vực yêu cầu độ bền riêng cao như hàn không, vũ trụ [78, 87 - 89].

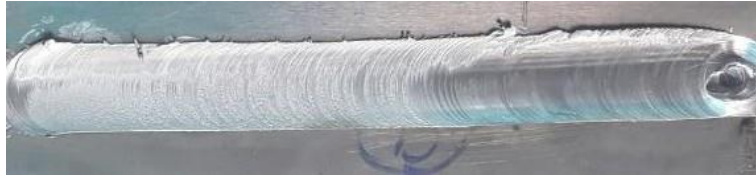
- Ngày nay, FSW được sử dụng trong các loại vật liệu khác như nhựa, polymer, hợp chất giữa kim loại và phi kim... FSW không gây ô nhiễm môi trường, được xem như là công nghệ xanh [44].

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 [72].

- Giá thành thiết bị FSW cao nên ứng dụng trong các lĩnh vực công nghiệp còn nhiều hạn chế [72].

- Điểm cuối của đường hàn là lỗ chốt như Hình 2.3 [21, 44, 80].



Hình 2.3. Lỗ thoát chót trên 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 gồm 3 hiện tượng: gia nhiệt, biến dạng dẻo và quá trình nguội [90]. Vật liệu biến dạng dẻo mạnh ở nhiệt độ cao, dẫn đến việc tạo ra các hạt mịn và kết tinh lại tạo ra mối hàn có tính chất cơ học tốt. Nhiệt truyền vào dụng cụ hàn ảnh hưởng lớn đến tuổi thọ và khả năng hàn. Nhiệt ma sát truyền vào dụng cụ hàn khoảng 5 %, vào phôi 95 % [91]. Nhiệt ma sát sinh ra do ứng suất cắt giữa dụng cụ và phôi hàn. 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 [44]. Tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép và chiều dài chót hàn quyết định đến nhiệt độ đầu vào. Tốc độ quay cao hay vận tốc hàn thấp sẽ hình thành nhiệt cao. Bên cạnh đó, biên dạng dụng cụ hàn cũng ảnh hưởng đến quá trình sinh nhiệt [21, 44, 80]. Biên dạng dụng cụ điều khiển quá trình hình thành nhiệt phụ thuộc vào mặt tiếp xúc giữa vai dụng cụ và phôi hàn. Nhiệt độ hàn cao dẫn đến chiều dày lớp IMC dày và giòn nên cơ tính mối hàn giảm [27]. Ở nhiệt độ hàn thấp, lỗ rỗng bên trong mối hàn thường xuất hiện. Vì vậy, hàn ở nhiệt độ thấp hay cao đều ảnh hưởng không tốt đến cơ tính mối hàn.

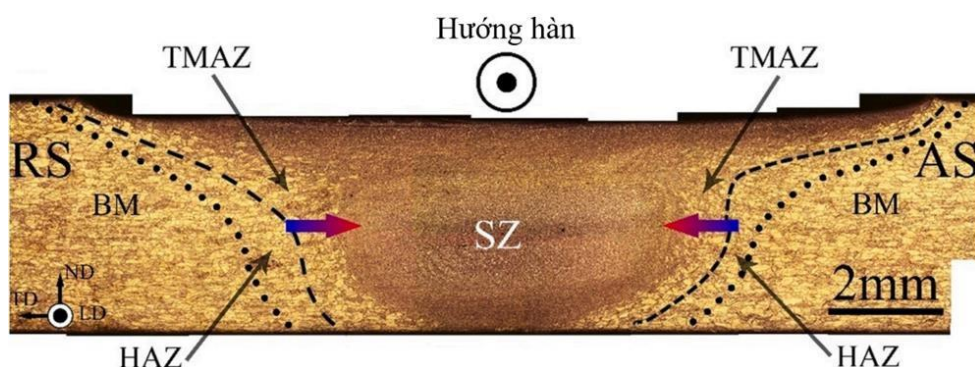
2.1.3.2. Cấu trúc vùng hàn

Vùng hàn ở gần vai rộng hơn ở đáy do vai dụng cụ hàn tạo nhiệt lớn hơn. Như thể hiện trong Hình 2.4, cấu trúc mối hàn gồm 03 vùng riêng biệt:

Vùng ảnh hưởng nhiệt (heat affected zone - HAZ): Vùng ảnh hưởng nhiệt nằm xa tâm mối hàn. Cấu trúc mạng tinh thể và đặc tính cơ học của vật liệu đã bị thay đổi. Kim loại trong khu vực này chưa bị biến dạng dẻo mà chủ yếu thay đổi cấu trúc do ảnh hưởng của nhiệt độ hàn.

Vùng ảnh hưởng cơ nhiệt (thermo mechanically affected zone - TMAZ): Kim loại hàn bị biến dạng dẻo nhưng chưa nhiều, cấu trúc kim loại bị thay đổi.

Vùng khuấy (stirred zone - SZ): Kim loại kết tinh lại hoàn toàn, hạt có cấu trúc mịn và đẳng hướng do ma sát giữa vai dụng cụ và bề mặt phôi.



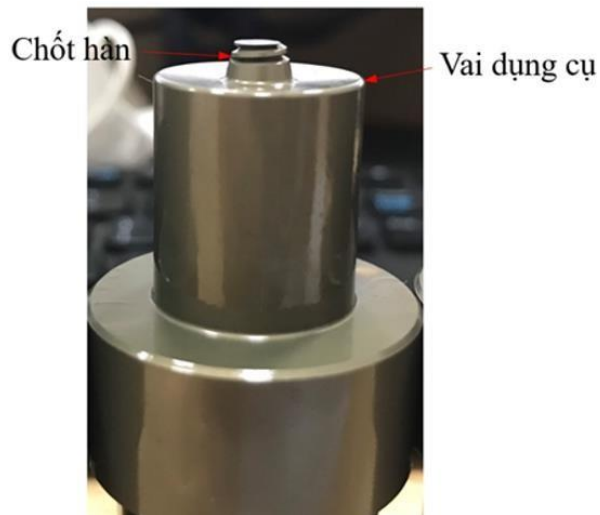
Hình 2.4. Tổ chức kim loại mối hàn [92]

Vật liệu bên tiến được khuấy mạnh hơn vật liệu ở bên lùi. Trong cấu hình mối hàn giáp mí, tấm có nhiệt độ nóng chảy cao hơn thường được đặt ở bên tiến. Khi hàn chồng thường đặt tấm có nhiệt độ nóng chảy thấp lên trên nhằm tránh mài mòn dụng cụ. Dụng cụ hàn được dịch chuyển về phía vật liệu có nhiệt độ nóng chảy thấp hơn để tránh làm nóng quá mức vật liệu chế tạo dụng cụ hàn. Vùng khuấy đánh dấu khu vực có vật liệu biến dạng lớn nhất. Vùng này tỏa nhiệt lớn nên mức độ tái kết tinh cao nhất. Vùng ảnh hưởng cơ nhiệt nằm ngay hai bên của vùng khuấy nên nhiệt độ ở vùng này thấp hơn, dẫn đến mức độ kết tinh lại thấp hơn. Vùng ảnh hưởng nhiệt, nhiệt độ thấp hơn vùng khuấy và vùng ảnh hưởng cơ nhiệt.

2.1.4. Dụng cụ FSW

Chi phí và độ mài mòn của dụng cụ hàn ma sát khuấy là những cân nhắc quan trọng trong việc lựa chọn vật liệu và thông số hình học. Thiết kế dụng cụ hàn giúp mối nối không có bất kỳ khuyết tật nào như lỗ rỗng, vết nứt...

Dụng cụ hàn cơ bản như Hình 2.5, bao gồm vai và chốt hàn liền khối với chuôi hàn hình trụ tròn, gắn vào trục quay tạo moment cho dụng cụ hàn. Thiết kế chốt hàn phức tạp hơn nhiều so với vai. Dụng cụ hàn chủ yếu có 3 chức năng: làm nóng vật liệu gia công, khuấy trộn vật liệu và ngăn chặn kim loại nóng bên dưới vai dụng cụ tràn ra ngoài mối hàn.

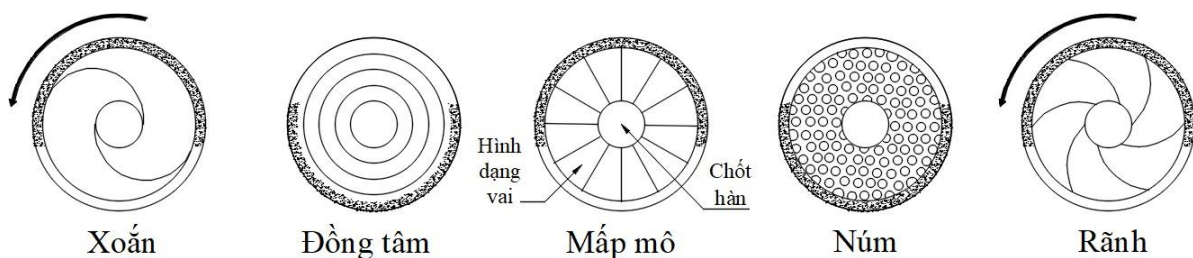


Hình 2.5. Dụng cụ FSW

Trong dụng cụ hàn, vai dụng cụ được thiết kế để tạo ra nhiệt thông qua ma sát và biến dạng vật liệu lên bề mặt của chi tiết gia công. Đường kính vai phụ thuộc vào kích thước chốt hàn [93]. Vai lõm, lồi, phẳng nên được sử dụng để nối các vật liệu khác nhau [80, 94]. Ngoài ra, vai dụng cụ hàn còn có một số hình dạng khác như: vai hình xoắn, rãnh, núm mấp mô hay vòng tròn đồng tâm (Hình 2.6 và Hình 2.7).

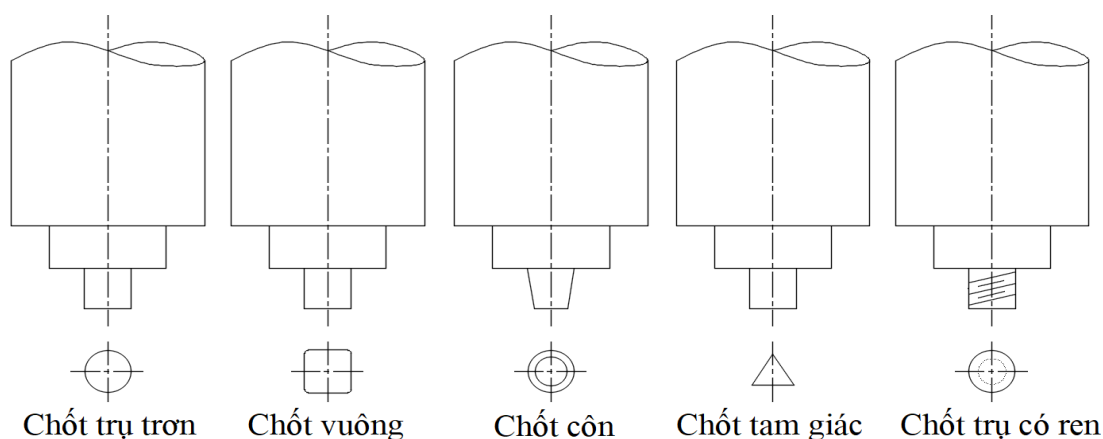


Hình 2.6. Hình dạng vai dụng cụ hàn

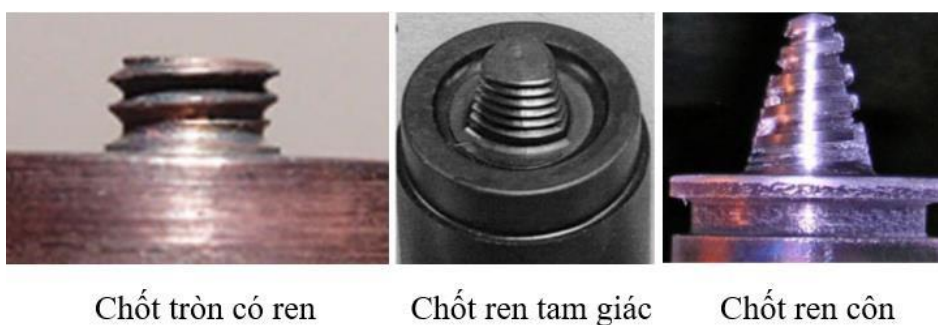


Hình 2.7. Hình dạng vai dụng cụ hàn khác nhau [25]

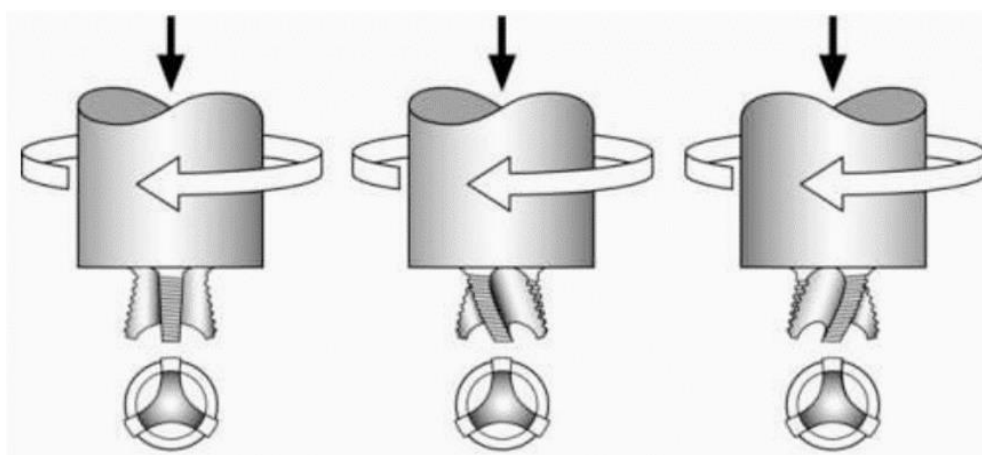
Chốt hàn được thiết kế để phá vỡ bề mặt của chi tiết gia công. Nhìn chung, chốt hàn có ren đã được sử dụng rộng rãi để kiểm soát dòng vật liệu, trộn cơ học vật liệu tốt hơn [94]. Sau đây là biên dạng chốt hàn thường được sử dụng (Hình 2.8, 2.9, 2.10).



Hình 2.8. Hình dạng chốt hàn cơ bản [95]



Hình 2.9. Hình dạng chốt hàn thực tế [95]



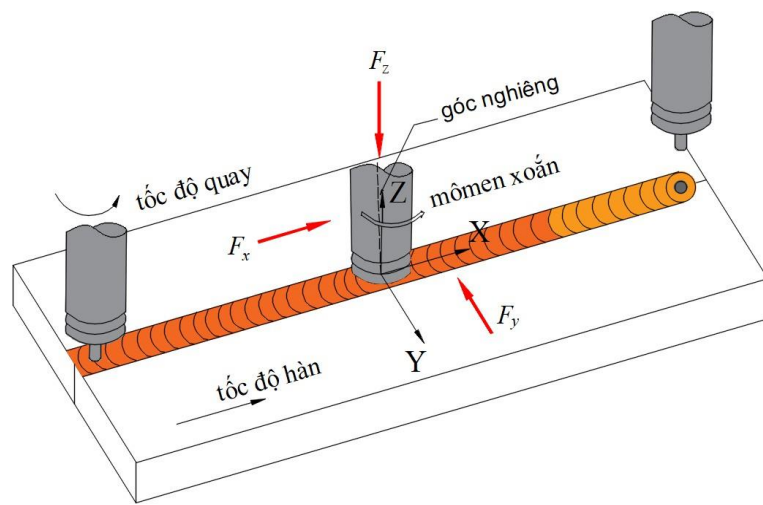
Hình 2.10. Chốt hàn dạng ren [44, 96]

Thép dụng cụ thường được sử dụng để chế tạo dụng cụ hàn cho các mối hàn là hợp kim nhôm, hay một số mối hàn không đồng chất giữa hợp kim nhôm với thép, hợp kim nhôm với hợp kim titan [80, 95]. Cacbua vonfram và rheni vonfram được sử dụng để hàn các hợp kim với nhiệt độ nóng chảy từ thấp đến cao [97]. Hợp kim niken, vonfram cacbua coban hoặc nitrua bo đa tinh thể (PCBN) được sử dụng chế tạo dụng cụ hàn cho các hợp kim có độ nóng chảy cao [95].

2.1.5. Các thông số hàn cơ bản

Các thông số cơ bản khi hàn ma sát khuấy như Hình 2.11, gồm:

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. Đây là một thông số quan trọng để vai và dụng cụ hàn ép chặt vào phôi. Áp lực P này luôn phụ thuộc vào biên dạng dụng cụ (chủ yếu là đường kính vai) và vật liệu của phôi. Phạm vi chính xác của các giá trị cho tham số này cung cấp vùng vật liệu dẻo vừa đủ để dòng chảy kim loại không nhanh quá mức, tránh để lại khuyết tật. Chiều sâu ép chốt vào vật liệu hàn chính là lực dọc trục. Chiều sâu ép chốt hàn lớn thì lực dọc trục tăng và ngược lại.



Hình 2.11. Các lực tác dụng trong quá trình hàn FSW

Tốc độ quay ω : tốc độ quay dụng cụ hàn sẽ tạo ra nhiệt ma sát, làm mềm vật liệu xung quanh dụng cụ hàn. Nhiệt đầu vào tăng khi tốc độ quay tăng do chốt khuấy trộn mạnh vật liệu hàn. Tuy nhiên, khi tăng tốc độ quay trục chính dễ hình thành khuyết tật bavia do vật liệu bị đẩy ra khỏi dụng cụ hàn.

Vận tốc hàn v : vận tốc hàn phụ thuộc vào nhiều yếu tố như chiều dày hợp kim hàn, tốc độ quay, chiều sâu ép chốt hàn... 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. Khi vận tốc hàn tăng, thể tích vật liệu cần gia nhiệt sẽ tăng, do đó nhiệt đầu vào trên đơn vị thể tích giảm. Ngược lại, khi vận tốc hàn giảm, nhiệt độ mối hàn tăng.

Góc nghiêng dụng cụ hàn θ : là thông số quan trọng, bên cạnh vận tốc hàn v và tốc độ quay ω . Góc nghiêng phù hợp giúp vai dụng cụ hàn giữ được vật liệu không trôi ra ngoài vùng hàn. Ngoài ra, góc nghiêng dụng cụ hàn còn giảm tác dụng giữa dụng cụ hàn

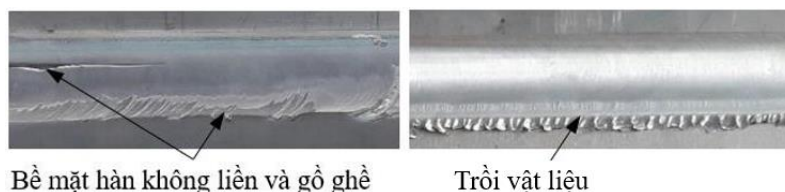
và phôi nên đảm bảo độ bền cho dụng cụ và thiết bị.

Chiều dài chốt 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. Ngoài ra, chiều dài chốt hàn còn ảnh hưởng đến chiều sâu ép chốt nên việc hình thành nhiệt độ đầu vào mối hàn khác nhau tương ứng với từng chiều dài chốt hàn riêng biệt.

2.1.6. Các khuyết tật trong mối hàn FSW

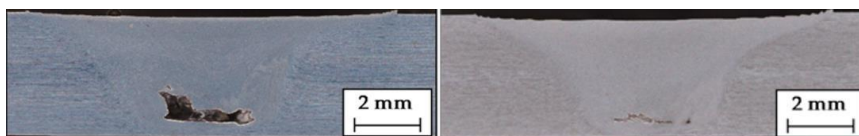
Những sai hỏng được kiểm tra bằng mắt thường, không qua các thiết bị, máy móc được gọi là khuyết tật. Các khoảng hở, vết nứt, lỗ rỗng là khuyết tật thể tích của mối hàn. Một số khuyết tật ảnh hưởng đến cơ tính mối nối mà chi tiết hàn không sử dụng được gọi là khuyết tật phế phẩm.

Vết hàn không liền và bị gồ ghề do sự phân bố nhiệt trên chiều dày phôi hàn chưa đều, xuất hiện các nguyên tố oxit dẫn đến liên kết yếu. Hiện tượng trôi vật liệu được hình thành do nhiệt đầu vào lớn dẫn đến kim loại bị trào ra khỏi vùng hàn. Khuyết tật trôi vật liệu, lỗ rỗng gây ra bởi sự thay đổi nhiệt độ bất thường trong quá trình khuấy [97].



Hình 2.12. Khuyết tật không liền, gồ ghề và trôi vật liệu bề mặt hàn

Roman Hartl và cộng sự (2020) đã nghiên cứu hàn giáp mí FSW hợp kim nhôm EN AW-6082-T6 thành công như thể hiện Hình 2.13. Kết quả cho thấy khuyết tật lỗ rỗng bên trong mặt cắt ngang mối hàn được chế tạo với tốc độ quay 500 vòng/phút và 700 vòng/phút [98]. Tốc độ quay nhỏ dẫn đến nhiệt đầu vào của mối hàn nhỏ nên liên kết giữa hợp kim nhôm yếu và gây ra khuyết tật.



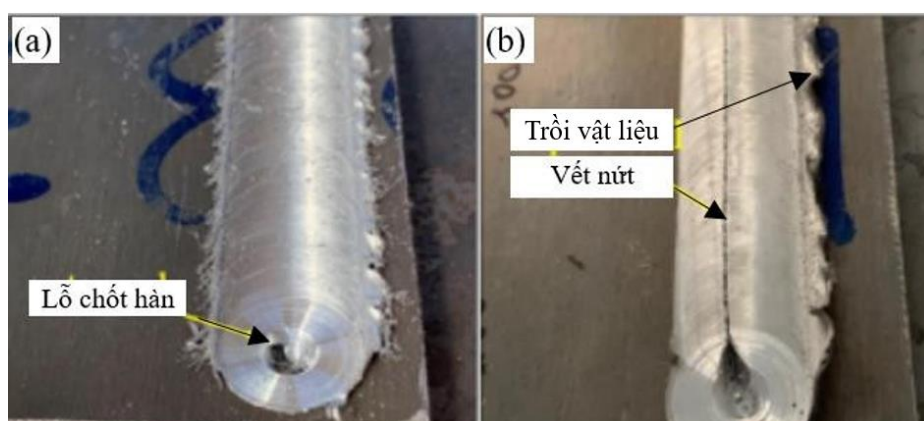
Hình 2.13. Khuyết tật lỗ rỗng bên trong mặt cắt ngang mối hàn [98]

Leonard và Lockyer (2003) thống kê những khuyết tật, vị trí và nguyên nhân hình thành khuyết tật khi FSW trong Bảng 2.1 [99]. Khuyết tật chính của mối hàn là lỗ rỗng và trôi vật liệu. Campanella D. và cộng sự (2021) đã chế tạo thành công mối hàn chồng

FSW giữa AA5083 và DH36. Kết quả, mối hàn mối hàn bị nhiều khuyết tật như: vết nứt, trôi vật liệu như Hình 2.14. Các khuyết tật như rỗ khí, xỉ, nứt, biến dạng... thường xuất hiện khi hàn nóng chảy thì không xuất hiện khi FSW.

Bảng 2.1. Các khuyết tật mối hàn và nguyên nhân gây ra khuyết tật [99]

Loại khuyết tật	Vị trí	Nguyên nhân
Khuyết tật trên đường hàn	Tâm hàn, từ chân mối hàn đến vị trí tiếp giáp vật liệu hàn	Chưa làm sạch oxit trên bề mặt phôi hàn, phá vỡ và phân tán oxit không đầy đủ, tăng tốc độ hàn, tăng đường kính vai.
Chân đường hàn	Tâm hàn, từ chân mối hàn đến mặt đáy của phôi	Chốt hàn quá ngắn, chiều sâu ép chốt hàn không phù hợp, vị trí hàn chưa phù hợp với đường hàn.
Lỗ rỗng	Bên tiến tại biên tâm hàn	Lực ép dọc trục F_z giảm, tốc độ hàn quá cao, tấm hàn không kẹp sát nhau, khe hở rộng.
Lỗ rỗng	Bên trong mối hàn	Tốc độ hàn quá cao.



Hình 2.14. Khuyết tật AA5083/DH36 (a) lỗ chốt hàn, (b) vết nứt, trôi vật liệu [38]

2.2. Đặc tính lớp IMC giữa thép và nhôm

2.2.1. Thành phần lớp IMC giữa thép và nhôm

Việc hàn nhôm với thép gặp nhiều khó khăn vì chênh lệch về các tính chất hóa học và vật lý, chẳng hạn như sự khác biệt lớn về điểm nóng chảy, độ hòa tan của sắt trong nhôm thấp, sự khác biệt về giá trị giãn nở nhiệt của nhôm và sắt. Khi hàn nóng chảy, dễ hình thành các hợp chất liên kim dày, giòn tại mặt tiếp giáp, dẫn đến hình thành các vết nứt, sinh ra ứng suất dư mối hàn [21 - 23, 26, 32, 33, 51]. Các nhà nghiên cứu đã báo cáo một số hợp chất liên kim giữa nhôm và thép, phụ thuộc vào nhiệt đầu vào mối hàn. Ngoài ra, các nhà khoa học đã nghiên cứu tính khả thi để hàn nhôm và thép bằng phương pháp FSW [26, 30 - 34, 38, 78, 80]. Trong quá trình FSW dụng cụ hàn ma sát với phôi

hình thành nhiệt độ mối hàn. Cấu trúc vi mô mặt tiếp giáp hai hợp kim không mịn do các hạt α - Fe (ferit) và lớp IMC rất mỏng Fe_xAl_y được hình thành bởi các phản ứng hóa học, khuếch tán giữa các nguyên tố Al và Fe [80, 97, 100].

FSW gây ra biến dạng dẻo của vật liệu quanh dụng cụ hàn, làm tăng nhiệt độ trong và xung quanh vùng khuấy. Do nhiệt độ phân bố ở các vùng hàn khác nhau ảnh hưởng trực tiếp đến cấu trúc vi mô của mối hàn. Ngoài ra, điều quan trọng nhất là làm thế nào để kiểm soát lớp IMC và lớp khuếch tán giữa hợp kim nhôm với thép. Chiều dày của lớp IMC, lớp khuếch tán là điều kiện cơ bản quyết định chất lượng mối hàn. Bên cạnh chiều dày, tính chất lớp IMC ảnh hưởng đáng kể đến cơ tính mối hàn. Được biết, lớp hợp chất liên kim giàu Fe như FeAl và Fe_3Al ít giòn hơn lớp hợp chất liên kim giàu Al như FeAl_3 . Lớp IMC nhiều Fe như FeAl, Fe_3Al tạo thành mối hàn có độ bền tốt hơn lớp IMC nhiều Al như FeAl_3 , Fe_2Al_5 [101, 102]. Vùng tiếp giáp của mối hàn giữa nhôm và thép dễ tạo ra các hợp chất liên kết kim loại giòn như FeAl_2 , FeAl_3 , Fe_2Al_5 ,... dẫn đến sự hình thành vết nứt, gây ra ứng suất dư khi hàn [21].

Các pha FeAl, Fe_2Al_5 , AlFe_2Cr được quan sát thấy ở mặt cắt ngang của mối hàn AA6061/AISI304 [26]. Lớp IMCs giàu Fe giữa nhôm và thép như AlCrFe_2 , AlFe , $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ của mối hàn chồng ma sát khuấy AA6061/AISI304 [34]. Newishy và đồng nghiệp (2023) hàn giáp mí giữa AA6061 và AISI316 [35]. Các hợp chất liên kết kim loại FeAl_6 , FeAl_3 , Ni_3Al , $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$, FeCr tại mặt tiếp giáp hai hợp kim được hình thành. Trong quá trình hàn FSW giữa nhôm và thép hợp kim, lớp IMC tại mặt tiếp giáp là FeAl, FeAl_2 , FeAl_3 , Fe_2Al_5 và Fe_3Al [97, 103 - 105]. Hợp chất liên kim $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ và Al_5Fe_3 được hình thành trong mối hàn chồng ma sát khuấy giữa nhôm 5083 và thép St12 [39]. $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ của lớp liên kết kim loại được hình thành tại mặt tiếp giáp mối hàn chồng AA5757/DP600 [102] và FeAl, FeAl_3 của mối hàn chồng ma sát khuấy AA5083/SS400 [27]. FeAl và Fe_3Al là các lớp hợp chất liên kim được hình thành tại các bề mặt tiếp xúc mối hàn chồng Al1100/St37 [51]. FeAl và FeAl_3 hình thành trong lớp hợp chất liên kim của mối hàn giáp mí FSW giữa AA6061 và thép TRIP 700/800 [103]. Mối hàn FSW giáp mí AA7075-T6/AISI304L hình thành các hợp chất liên kim Al_3Ni , Al_3Ni_2 , Al_3Ni_5 , NiAl và Ni_3Al do ảnh hưởng nguyên tố khuếch tán Ni-Al [29]. Bảng 2.2 cho thấy tại nhiệt độ hàn khác nhau hình thành các hợp chất liên kết kim loại tương ứng với cấu trúc tinh thể khác nhau [104]. Pha FeAl có thể hình thành do phản ứng khuếch tán lẫn nhau của

nguyên tố Fe và Al. Pan và cộng sự (2022) đã quan sát pha FeAl ở ranh giới của hạt Fe₂Al₅ đối với mối hàn ma sát khuấy nhôm/thép [67].

Bảng 2.2. Cấu trúc mạng tinh thể và nhiệt độ nóng chảy của các hợp chất trung gian khác nhau trong hệ Fe - Al có trong lớp IMC [104]

Thành phần lớp liên kết kim loại	Cấu trúc tinh thể	Nhiệt độ nóng chảy (°C)
Fe ₃ Al	Lập phương (Cubic)	1510
FeAl	Lập phương (Cubic)	1250
FeAl ₂	Ba nghiêng (Triclinic)	1164
Fe ₂ Al ₅	Trực thoi (Orthorhombic)	1171
FeAl ₃	Đơn nghiêng (Monoclinic)	1150
Fe ₄ Al ₁₃	Đơn nghiêng (Monoclinic)	1150

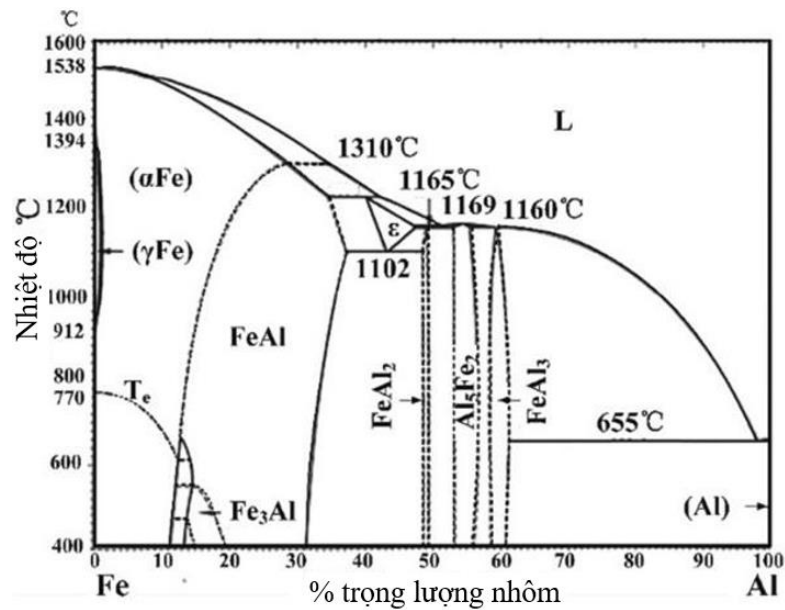
2.2.2. Sự hình thành và cơ chế phát triển của lớp IMC

Dụng cụ hàn ma sát với vật liệu hàn sẽ hình thành nguồn nhiệt. Vật liệu hàn bị biến dạng, phân tán theo chiều quay dụng cụ và hướng hàn. Tốc độ quay dụng cụ, vận tốc hàn, chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn... ảnh hưởng đến sự hình thành nhiệt độ mối hàn. Ngoài ra, biên dạng dụng cụ hàn ảnh hưởng đến cơ chế tạo nhiệt vì liên quan đến hoạt động khuấy của chốt và ma sát giữa vai dụng cụ và phôi hàn. Kim loại bị biến dạng sẽ di chuyển theo chiều quay đầu khuấy, tụ lại và đông đặc sau đầu khuấy. Nhiệt đầu vào mối hàn biến đổi, các nguyên tố của hợp kim nhôm và thép không gỉ phản ứng hóa học, hình thành lớp hợp chất liên kim Fe_xAl_y trong quá trình hàn FSW [80, 97, 100].

Sự hình thành lớp IMC phụ thuộc nhiệt độ đầu vào và vật liệu trong quá trình hàn FSW. Bên cạnh đó, nhôm có hoạt tính cao và dễ hình thành màng oxit Al₂O₃ đậm đặc. Nhiệt độ nóng chảy Al₂O₃ cao, khoảng 2.050 °C có thể giảm cơ tính mối hàn [105]. Trong quá trình hóa rắn, hình thành nhiều loại hợp chất liên kim, cụ thể là Fe₃Al, FeAl₂, FeAl, FeAl₃ và Fe₂Al₅. Lớp IMC giàu Al tạo thành mối hàn ít dẻo và cứng hơn lớp IMC giàu Fe [54, 100, 106]. Trong sơ đồ pha Fe - Al (Hình 2.15) [107], tùy theo nhiệt độ đầu vào mối hàn, hai loại IMC nhìn thấy gồm các pha giàu Fe (Fe₃Al, FeAl) và pha giàu Al (Fe₂Al₅, FeAl₂, FeAl₃). Vì vậy điều cần tránh là hạn chế sự hình thành và phát triển quá mức lớp IMC tại mặt tiếp giáp mối hàn.

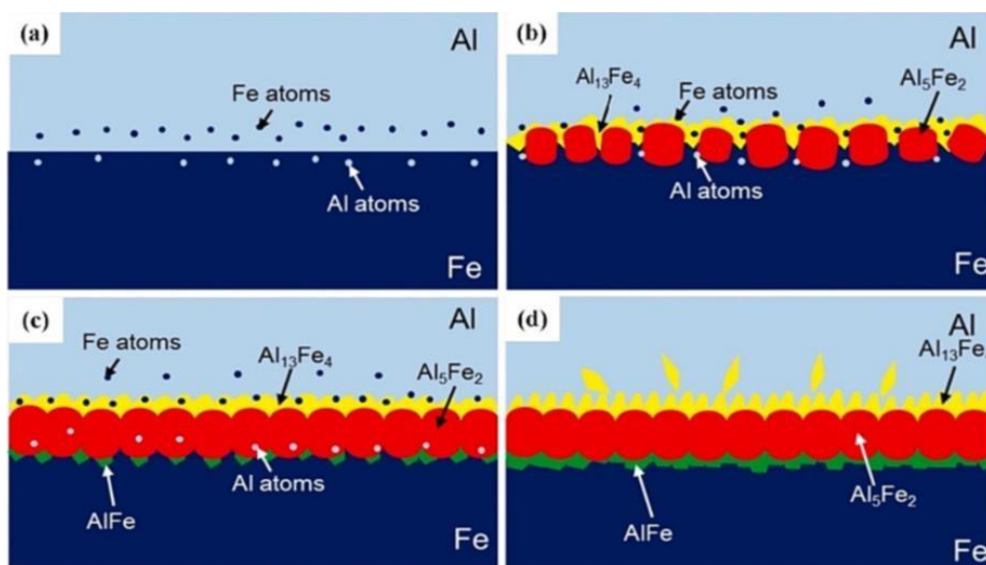
Mạng tinh thể vật liệu hàn phụ thuộc vào nhiệt đầu vào mối hàn. Nhiệt đầu vào càng cao thì các hạt kim loại kết tinh lần 2 nên kích thước hạt càng lớn. Kích thước hạt

nhôm đạt 6 μm tại vùng khuấy với tốc độ quay 500 vòng/phút, giảm còn 4 μm với tốc độ quay 300 vòng/phút [32].



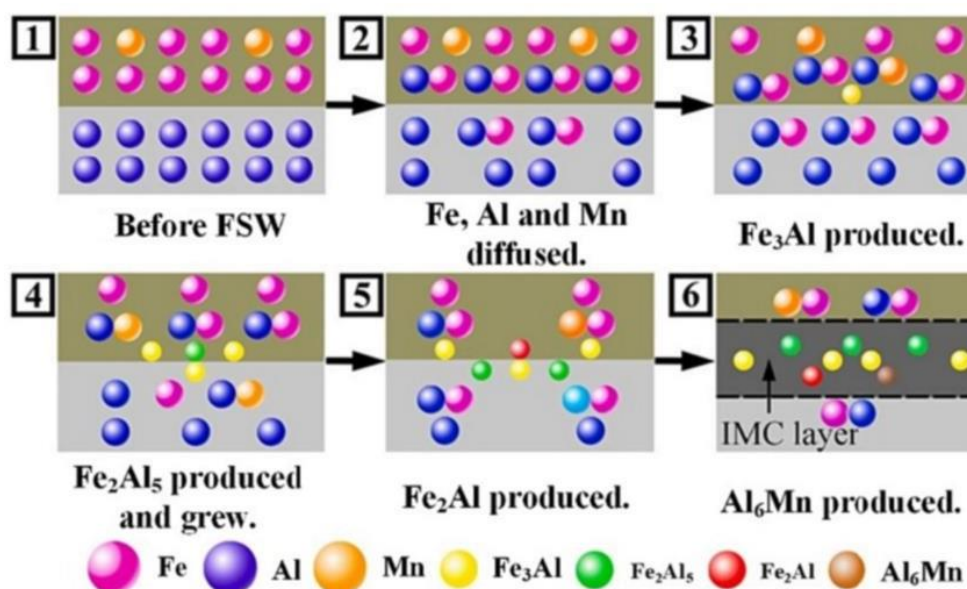
Hình 2.15. Sơ đồ pha Fe - Al theo nhiệt độ hàn [107]

Thời gian khuếch tán và thành phần hóa học của các hợp kim trong quá trình hàn quyết định đến sự hình thành lớp IMC (Hình 2.16). Giai đoạn 1, nguyên tố Al và Fe khuếch tán về mặt tiếp giáp với tốc độ chậm. Giai đoạn 2, nguyên tố Fe tăng tốc khuếch tán trong hợp chất Al. Hợp chất $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ bắt đầu tạo mầm, nhiều hơn Fe_2Al_5 . Nhiệt độ hàn tăng, tinh thể $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ hòa trộn vào các vị trí còn trống của Fe_2Al_5 hình thành liên kết mạng tinh thể trên mặt tiếp giáp như Hình 2.16(c). Cuối quá trình hàn (Hình 2.16(d)), hình thành lớp IMC với $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ và Fe_2Al_5 cạnh nhau khi hóa rắn [67].



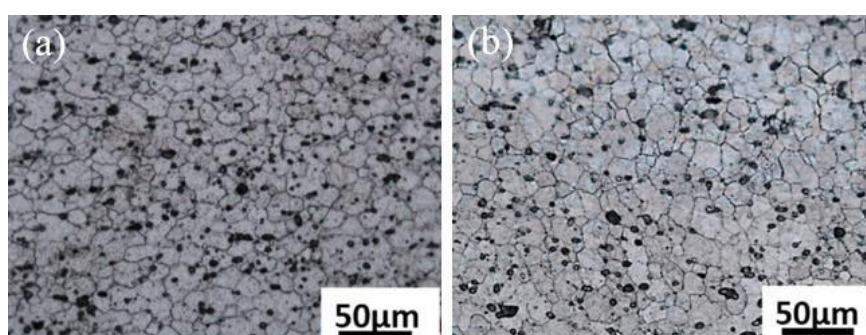
Hình 2.16. Cơ chế hình thành IMC ở các giai đoạn khác nhau [67]

Hàn ma sát khuấy nhôm với thép hình thành lớp IMC tại mặt tiếp giáp hai hợp kim hàn. Thông thường, có 3 lớp gồm lớp gồm: trên cùng là ma trộn các nguyên tố Al và Fe phân tán, lớp giữa thể hiện lớp hỗn hợp cấu trúc Fe - Al trong lớp IMC và lớp dưới cùng, chủ yếu bao gồm Fe. Như Hình 2.17, lớp hợp chất liên kim được quan sát gồm các hợp chất Fe_3Al , Fe_2Al_5 , Fe_2Al và Al_6Mn .



Hình 2.17. Sơ đồ minh họa sự phát triển cấu trúc vi mô lớp IMC [108]

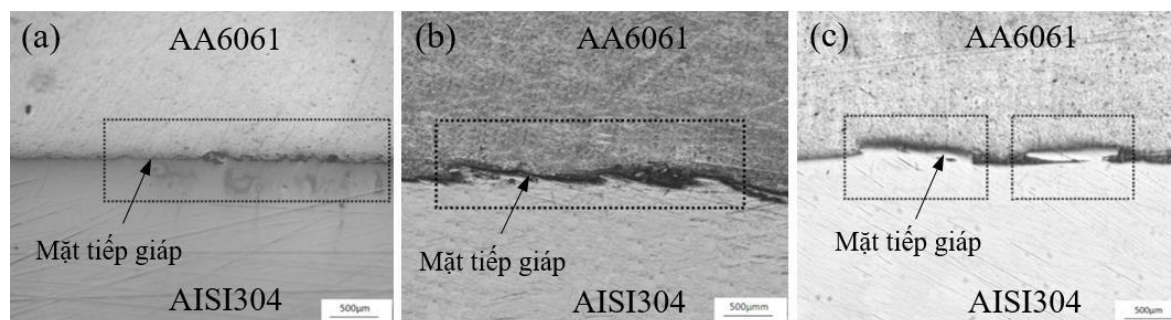
Kích thước hạt vùng HAZ gần với kim loại cơ bản. Kích thước hạt nhôm tại HAZ dao động từ 21 μm - 35 μm . Hạt nhôm nhỏ với tốc độ quay 900 vòng/phút (Hình 2.18).



**Hình 2.18. Cấu trúc tế vi AA6061 vùng HAZ tại vận tốc hàn 31,5 mm/phút
(a) 900 vòng/phút, (b) 1800 vòng/phút [35]**

Thông số hàn như tốc độ quay, vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt rất quan trọng để tạo ra mối hàn không có khuyết tật [44]. Tốc độ quay cao, dưới tác động khuấy của chốt hàn và ma sát dưới vai dụng cụ tăng nên nhiệt độ mối hàn tăng nhanh. Ảnh hưởng quá trình sinh nhiệt của tốc độ quay lớn hơn vận tốc hàn.

Bên cạnh đó, khi xác định mối tương quan giữa tốc độ quay, vận tốc hàn để mối hàn đạt được cơ tính tốt là cần thiết. Với tốc độ quay 900 vòng/phút, độ bền kéo mối hàn lớn nhất khi tăng vận tốc hàn 125 mm/phút [34]. Hai hợp chất FeAl và FeAl_3 của lớp IMC hình thành trong mối hàn FSW giáp mí giữa AA6061 và SUS316. Chiều dày lớp IMC tăng khi tăng nhiệt đầu vào mối hàn. Chiều dày lớp IMC tăng khi tăng tốc độ quay giảm vận tốc hàn [26, 40]. Khi tốc độ quay tăng, vai dụng cụ ma sát với vật liệu hàn nhiều nên nhiệt đầu vào tăng, từ đó hình thành lớp liên kết kim loại dày [64, 109, 110]. Theo Mahto và cộng sự (2016), chiều dày lớp IMC giòn Fe_2Al_5 thấp 2,3 μm khi vận tốc hàn 125 mm/phút, chiều sâu ép chốt 0,30 mm. Mặt tiếp giáp răng cưa giữa AA6061 và AISI304 làm tăng độ bền mối hàn (Hình 2.19). Liên kết cơ học hình thành nhiều biên dạng răng cưa khi tăng chiều sâu ép chốt và vận tốc hàn [26]. Điều này có nghĩa, khi tăng vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt, độ bền mối hàn chồng AA6061/AISI304 đạt giá trị lớn nhất.



**Hình 2.19. Mặt tiếp giáp mối hàn tại vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt khác nhau
(a) 63 mm/phút (0,20), (b) 63 mm/phút (0,30), (c) 125 mm/phút (0,30) [26]**

Kimapong và Watanabe (2005) kết luận rằng khi tăng chiều sâu ép chốt, độ dày của lớp IMC cũng tăng lên, dẫn đến mối hàn không hoàn chỉnh [27]. Việc tăng chiều sâu ép chốt lớn hơn 0,10 mm sẽ hình thành pha FeAl_3 dày nên mặt tiếp giáp hai hợp kim không hoàn chỉnh trực tiếp ảnh hưởng đến cơ tính mối hàn. Độ bền kéo lớn nhất có giá trị 5.591 N tại chiều sâu ép chốt 0,10 mm vì chiều dày lớp IMC với hợp chất FeAl , FeAl_3 nhỏ, khoảng 1,11 μm . Ép chốt hàn vào mặt thép một ít sẽ dẫn đến sự cải thiện đáng kể tính chất cơ học của các mối hàn nhôm với thép vì lớp IMC mỏng [28]. Độ bền kéo mối hàn giáp mí AA6061/SS400 có thể chấp nhận được với vận tốc hàn và tốc độ quay thấp [111]. Các nguyên tố khuếch tán Al - Ni ảnh hưởng đến độ bền của mối hàn giáp mí AA7075-T6/AISI304L [37]. Độ bền kéo tăng khi tốc độ quay thấp. Bên cạnh đó, khi tăng tốc độ quay hình thành lớp IMC giòn nên cơ tính mối hàn giảm [27]. Tuy nhiên, tốc độ quay cao và vận tốc hàn thấp thì độ bền kéo cao do chốt hàn khuấy trộn hiệu quả nên

bề mặt liên kết tốt [51]. Lớp IMC tăng khi tăng nhiệt đầu vào, tức là tăng tốc độ quay và giảm vận tốc hàn [29, 40]. Việc tăng tốc độ quay tạo ra hợp chất FeAl_3 của lớp IMC dày tại mặt tiếp xúc. Khi vận tốc hàn tăng, lớp IMC tại mặt tiếp giáp giảm [30]. Ghosh và cộng sự (2012) hàn ma sát khuấy nhôm tinh khiết và SUS304 [112]. Các nguyên tố khuếch tán Fe, Cr, và Ni đáng kể trong nhôm. Ảnh hưởng của chiều dày lớp IMC đối với độ bền mối hàn AA6061/AISI304 đã được Hatano và cộng sự (2018) nghiên cứu [113]. Họ phát hiện ra rằng mối hàn không được xử lý nhiệt sẽ xuất hiện các vết nứt ở bề mặt do màng oxit. Xử lý nhiệt ảnh hưởng đến chiều dày lớp IMC và cải thiện độ bền của các mối hàn khác nhau. Newishy và cộng sự (2023) nghiên cứu tác động của tốc độ quay đến cấu trúc vi mô và tính chất cơ học của mối hàn giáp mí giữa AISI316 và AA6061 [32]. Tại bề mặt tiếp giáp giữa hai hợp kim, nhiều loại IMC được tìm thấy, bao gồm FeAl_6 , FeAl_3 , Ni_3Al , $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$ và FeCr . Ứng suất kéo cao nhất 160 MPa tại 500 vòng/phút và 200 mm/phút, bằng 56% so với nhôm cơ bản. Các mẫu thử kéo phá hủy tại vùng SZ bên AA6061.

Ngoài các công trình nghiên cứu thông số hàn phù hợp đảm bảo nhiệt độ khi FSW, có công trình nghiên cứu gia nhiệt hợp kim trước khi hàn. Độ bền kéo mối hàn chồng FSW AA6061/SUS316 tăng xấp xỉ 14,5 % khi tấm SUS316 được ủ nhiệt đến 800 °C trong thời gian 1 giờ vì chiều dày lớp IMC chứa hợp chất FeAl_3 nhỏ [33].

2.2.3. Dự đoán chiều dày lớp IMC.

Chiều dày lớp IMC chứa hợp chất FeAl_3 khi tấm SUS316 được ủ nhiệt đến 800 °C có giá trị 110 nm nhỏ hơn 340 nm khi ủ nhiệt đến 1000 °C, tương ứng chiều dày lớp khuếch tán tăng từ 3 μm lên 5 μm . Kết quả cho thấy, khi tăng chiều dày lớp IMC, độ bền kéo mối hàn giảm [33]. Chiều dày lớp IMC chứa hợp chất FeAl_3 tăng khi tăng chiều sâu ép chốt hàn [30]. Hàn chồng ma sát khuấy Al1100/St37, hình thành hợp chất FeAl , Fe_3Al tại mặt tiếp giáp mối hàn. Chiều dày lớp IMC thay đổi từ 25 μm - 85 μm . Độ bền kéo cao nhất mối hàn thấp 1.925 N tại tốc độ quay 400 vòng/phút, vận tốc hàn 50 mm/phút [51]. Theo Malto và cộng sự (2018) nhiệt độ đầu vào mối hàn tăng khi tăng tốc độ quay dụng cụ, đồng thời giảm vận tốc hàn [34]. Chiều dày lớp IMC trung bình 5,5 μm ở tốc độ quay 1800 vòng/phút và vận tốc hàn 31,5 mm/phút. Khi tốc độ quay 900 vòng/phút, chiều dày lớp IMC giảm xuống còn 3 μm . Trong quá trình FSW giáp mí Al6061-T6511/Trip780/800, hình thành hợp chất FeAl và FeAl_3 trong IMC. Độ bền kéo cao nhất của mối hàn khoảng 85 % nhôm 6061-T6511 tại chiều dày lớp IMC xấp xỉ giá trị 1,0 μm [103].

Theo các nghiên cứu được công bố, đặc biệt là hàn FSW giữa AA6061 và thép không gỉ [26, 32 - 34, 40], chiều dày lớp IMC thay đổi từ 0,34 μm đến 5,5 μm . Chiều dày lớp IMC thay đổi theo các thông số tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép và chiều dài chốt hàn nên lớp kim loại khuếch tán cũng thay đổi tương ứng.

Các kết quả nghiên cứu đã được công bố cho thấy khi thay đổi tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn làm thay đổi chiều dày lớp hợp chất liên kim, lớp khuếch tán, lớp oxit và đặc tính lớp hợp chất liên kim của nhôm và thép. Nhìn chung, những nghiên cứu trên nhấn mạnh các đặc tính của lớp IMC được tạo ra bởi sự tương tác phức tạp giữa vật liệu và các thông số hàn, đồng thời đưa ra các giải pháp để tăng độ bền của mối hàn. Mặc dù có nhiều cách tiếp cận đã được các nhà nghiên cứu đưa ra, từ việc điều chỉnh thông số hàn và sử dụng vật liệu phụ để điều chỉnh các đặc tính của IMC. Nhưng để đạt được mối hàn tối ưu có thể cần phải kết hợp các thông số như tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn. Do đó, mục tiêu nghiên cứu của đề tài là làm rõ ảnh hưởng đồng thời của tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn đến đặc điểm cấu trúc, đặc tính của lớp IMC và hình thái mặt tiếp giáp đến cơ tính mối hàn giữa AA6061 với SUS316 bằng phương pháp thực nghiệm, kết hợp kế thừa với kết quả nghiên cứu đã công bố.

2.3. Ăn mòn điện hóa của mối hàn 2 hợp kim khác loại AA6061 và SUS316

2.3.1. Ăn mòn kim loại

Kim loại đã được sử dụng để sản xuất các thiết bị, máy phục vụ trong các lĩnh vực: chế tạo máy, ô tô, tàu thủy, các công trình biển, hàng không vũ trụ và quốc phòng... do tính chất ưu việt của nó. Ăn mòn khi các yếu tố vật lý, hóa học của môi trường ăn mòn phá vỡ các vật liệu kim loại và phi kim. Ăn mòn làm giảm tính chất vật liệu, qua đó giảm độ bền và tuổi thọ, ảnh hưởng đến thời gian hoạt động của các máy và thiết bị. Do đó, gây thiệt hại và ảnh hưởng đáng kể đến nền kinh tế, đặc biệt đối với các quốc gia có nền công nghiệp đang phát triển. Chi phí chế tạo thấp hơn so với phí bảo trì, bảo dưỡng và sửa chữa. Bảo trì chống ăn mòn sẽ kéo dài thời gian sản xuất của các thiết bị, ô tô, tàu biển, công trình hàng hải... nên ảnh hưởng lớn về mặt kinh tế và khoa học. Các loại ăn mòn khác nhau do môi trường gây ra có thể bao gồm ăn mòn đều, ăn mòn cục bộ, ăn mòn tiếp xúc, ăn mòn điểm, ăn mòn do ứng suất, ăn mòn mỏi, ăn mòn mài mòn và ăn mòn do ma sát...

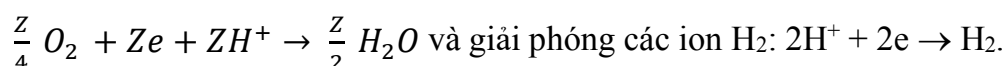
2.3.2. Ăn mòn điện hóa mối hàn AA6061/SUS316

2.3.2.1. Ăn mòn điện hóa

Các thiết bị và kết cấu hoạt động trong môi trường tự nhiên, dưới tác động của khí quyển, vật liệu bị ăn mòn điện hóa. Màng mỏng được tạo ra khi nước ngưng tụ trên bề mặt kim loại. CO₂ hoặc SO₂ hòa tan trong nước, hình thành dung dịch pH thấp khiến kim loại dễ bị ăn mòn [8]. Oxi hòa tan vào màng mỏng nước là chất điện ly góp phần gia tăng ăn mòn kim loại. Môi trường nhiễm bẩn, chứa nhiều tạp chất CO₂, SO₂, ion Cl⁻ sẽ làm tăng tốc độ ăn mòn. Khi thiết bị chôn ngầm trong lòng đất, tốc độ phá hủy kim loại phụ thuộc vào địa hình. Đất ẩm và môi trường axit, kim loại dễ bị ăn mòn. Hơn nữa, vi sinh vật trong lòng đất có tác động lớn đến tốc độ ăn mòn của thiết bị, kết cấu...

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. Giá trị thế điện cực tại vùng anot âm hơn so với thế điện cực vùng catot, xảy ra các phản ứng sau:

- 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 oxy trong dung dịch:



Các ion kim loại vào dung dịch điện ly, chuyển đến cực âm trên mặt kim loại. Hiệu số điện thế ăn mòn của hai kim loại trong dung dịch điện ly quyết định tốc độ ăn mòn. Ngoài ra, tốc độ ăn mòn còn phụ thuộc vào điện trở của dung dịch điện ly, độ pH của dung dịch và nhiệt độ trong môi trường [8, 114]. Dựa trên lớp oxit Al(OH)₃ thụ động bám trên bề mặt, hợp kim nhôm có khả năng chống ăn mòn cao. Tuy nhiên, nhôm hấp thụ các ion Cl⁻ của dung dịch NaCl nên hòa tan với tốc độ cao tạo thành nhiều điểm, dẫn đến ăn mòn điểm [115]. Ăn mòn điểm hình thành các lỗ với kích thước sâu, rộng khác nhau.

2.3.2.2. Ăn mòn điện hóa mối hàn AA6061/SUS316

Mối hàn AA6061/SUS316 tiếp xúc với dung dịch điện ly NaCl nên bị ăn mòn điện hóa. Các phản ứng ăn mòn A của mối hàn được dự đoán như sau (Hình 2.20):

- Cực dương: $2Fe \rightarrow 2Fe^{2+} + 4e$

- Cực âm: khử oxi $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH$ và giải phóng hydro $2H^+ + 2e^- = H_2$



Hình 2.20. Sơ đồ ăn mòn điện hóa mối hàn AA6061/SUS316

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



Màng $Al(OH)_3$ phủ kín trên AA6061 bị ăn mòn, ngăn không cho AA6061 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 $Al(OH)_3$ [115].

Bảng 2.3. Thế điện cực tiêu chuẩn các nguyên tố Al, Fe [8]

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 bị ăn mòn. Bên cạnh đó, những hạt Fe làm giảm khả năng chống ăn mòn cục bộ, tức là AA6061 trải qua quá trình hòa tan ở cực âm [116]. Các hạt liên kết kim loại như Fe có trong nền AA6061 ảnh hưởng đến ăn mòn của AA6061 [117]. Mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 hình thành nhiều pin ăn mòn do các hợp chất Fe_3Al và $FeAl_3$ của lớp IMC [36]. Vì vậy, ăn mòn mối hàn trên tấm AA6061 và tập trung tại hợp chất liên kim.

2.3.3. Công trình nghiên cứu ăn mòn

Một số công trình nghiên cứu ăn mòn mối hàn hợp kim nhôm [118, 119] và các hợp kim khác ngâm trong dung dịch NaCl. Bên cạnh đó, công trình nghiên cứu ăn mòn dưới tác động của NaCl và nhiệt độ [120]. Các công trình nghiên cứu ăn mòn mối hàn FSW trong các môi trường ăn mòn khác nhau, cụ thể như sau:

- Gharavi và cộng sự (2016) đã chứng minh đặc tính ăn mòn của mối hàn chồng FSW AA6061, ngâm trong dung dịch 3,5 %NaCl [121]. Kết quả quan sát thấy rằng vùng SZ và HAZ dễ bị tấn công ăn mòn hơn so với vật liệu cơ bản. Hiện tượng này là do

tính không đồng nhất của cấu trúc vi mô ở các vùng hàn so với vật liệu cơ bản. Jariyaboon và cộng sự (2006) ngâm mẫu hàn giáp mí AA2024/AA7010 trong dung dịch NaCl [122]. Cực dương, âm lần lượt là nhôm AA7010 và nhôm AA2024. Ăn mòn rất ít thay đổi trên tấm nhôm AA7010. Ăn mòn vùng SZ gấp 3 lần so với nền nhôm AA2024. Ratna Sunil và cộng sự (2016) thử nghiệm ăn mòn mẫu hàn giáp mí AZ31BMg/Al6063 trong dung dịch 3,5 %NaCl so với các hợp kim cơ bản AZ31BMg, Al6063 [123]. Trong quá trình FSW, hình thành liên kết Mg-Al nên mối hàn bị ăn mòn bên Al6063. Khối lượng ăn mòn của mối hàn lớn hơn xấp xỉ 35 lần so với AZ31BMg, 90 lần so với Al6063 sau 12 giờ. Khối lượng ăn mòn giảm khi tăng thời gian ngâm. Anaman và cộng sự (2019) đánh giá ăn mòn mối hàn FSW 5052-H32/DP1200 với kim loại cơ bản, mẫu ngâm trong dung dịch 3,5 %NaCl [115]. Ăn mòn chính trong vùng khuấy SZ của nhôm 5052-H32 tại mặt liên kết kim loại vì có các nguyên tố Fe. Ngoài ra, Peng-liang Niu và cộng sự (2022) nghiên cứu ăn mòn mối hàn giáp mí AA2024-T351/AA5083-H112 [124]. Mẫu hàn được ngâm trong dung dịch EXCO (4 mol/L NaCl, 0,5 mol/L KNO₃ và 0,1 mol/L HNO₃). Kết quả cho thấy ăn mòn vùng HAZ bên nhôm AA2024 là nhiều nhất.

- Lewis và cộng sự (2022) nghiên cứu ăn mòn mối hàn điểm ma sát khuấy AA2024/AA7075, ngâm trong dung dịch NaCl tại 100 °C [120]. Tốc độ ăn mòn của mối hàn khác nhau rất ít so với ăn mòn riêng từng hợp kim nhôm AA2024 và nhôm AA7075. Chứng tỏ hàn điểm FSW phù hợp để giảm ăn mòn ở mối hàn hai hợp kim nhôm AA2024 và nhôm AA7075.

Tại thời điểm hiện tại, trong và ngoài nước chưa có nghiên cứu nào được tiến hành để hàn chồng FSW giữa AA6061 và SUS316. Vì vậy, chưa có nghiên cứu ăn mòn mối hàn trong các môi trường khác nhau. Xét thấy nhu cầu thực tiễn, tấm lưỡng kim AA6061/SUS316 được ứng dụng trong các lĩnh vực thực phẩm, y tế, đặc biệt là các kết cấu pin của thiết bị điện nên cần nghiên cứu tốc độ và cơ chế ăn mòn mối hàn trong dung dịch NaCl, tác dụng cùng lúc cả dòng điện và nhiệt độ khác nhau.

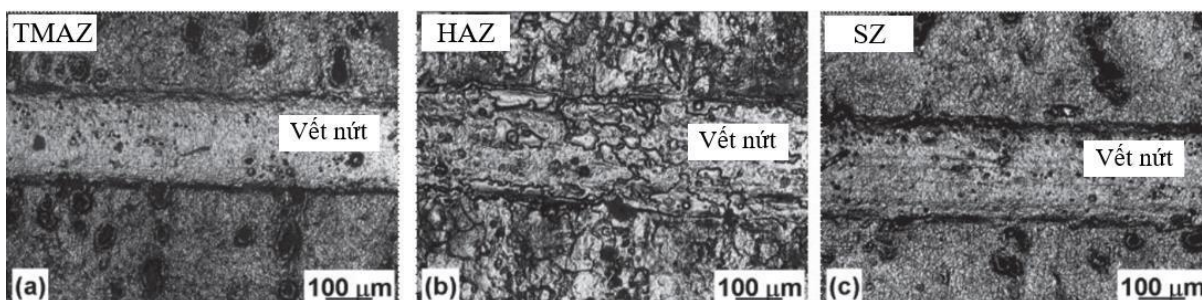
2.3.4. Ảnh hưởng của hợp chất liên kim, cấu trúc mối hàn đến ăn mòn điện hóa

Thép không gỉ có khả năng chịu lực nên độ bền và khả năng chống ăn mòn cao [15, 16, 21, 62]. Tấm lưỡng kim AA6061/SUS316 được sử dụng trong nhiều ngành công nghiệp, chẳng hạn như ô tô, tàu thủy... Ngoài ra, liên kết AA6061/SUS316 được chế tạo các thiết bị với yêu cầu độ bền riêng cao trong các lĩnh vực hàn không, vũ trụ [78, 87 - 89]. AA6061 liên kết với SUS316 hoạt động trong môi trường có độ ẩm, NaCl, dòng

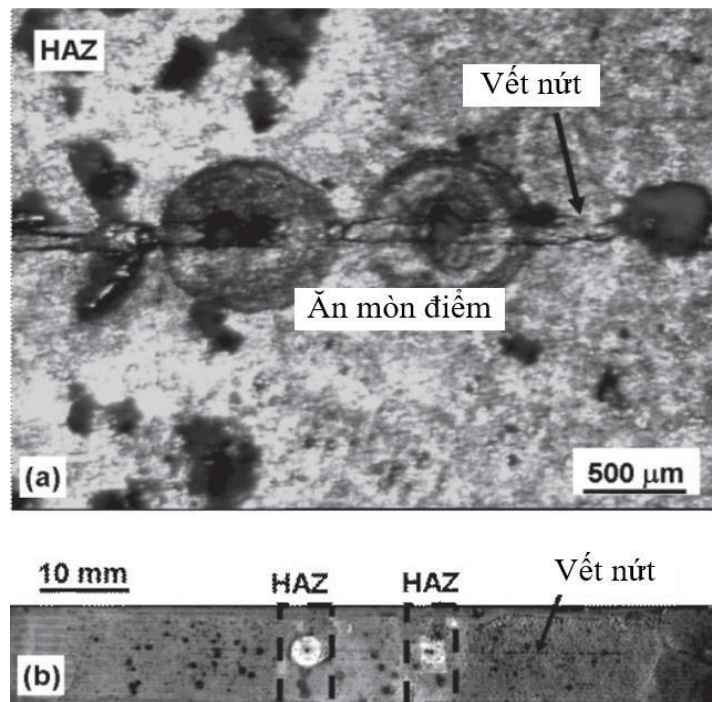
điện và nhiệt độ thì mối hàn bị ăn mòn điện hóa [87, 89, 125]. Kích thước tương đối của cực dương, loại kim loại và môi trường làm việc như nhiệt độ, độ ẩm, độ mặn, dòng điện... ảnh hưởng đến ăn mòn điện hóa [8, 126].

Trong quá trình hàn nóng chảy, hình thành nhiều nguyên tố khác nhau trộn lẫn trong lớp IMC [21 - 23, 26, 32, 33, 51]. Hoạt động cơ nhiệt của quá trình hàn FSW làm thay đổi cấu trúc vi mô, cơ tính và điện hóa của liên kết mối hàn. Ăn mòn cục bộ, chẳng hạn như ăn mòn rỗ và ăn mòn liên vùng hợp kim mối hàn bị ảnh hưởng bởi tác động cơ nhiệt [127]. Ngoài ra, cấu trúc hạt kim loại các vùng hàn khác nhau, hình thành nhiều tế bào ăn mòn điện hóa cục bộ ở cấp độ vi cấu trúc [128].

Như thể hiện trên Hình 2.21, ăn mòn tập trung tại vết hàn của mối hàn FSW giáp mí hợp kim nhôm AA7449-T7951. Mối hàn bị ăn mòn, hình thành các vết ăn mòn lớn, đều và nứt tại vùng HAZ. Vùng SZ, ăn mòn giảm nhưng lớn hơn vùng TMAZ [89]. Trong khi đó, tại vị trí nứt vùng ảnh hưởng nhiệt của mối hàn AA2024-T351, bị ăn mòn điểm với nhiều vết ăn mòn có kích thước lớn được thể hiện Hình 2.22.



Hình 2.21. Ảnh vi mô bề mặt ăn mòn của mối hàn AA7449-T7951 khi ngâm 20 ngày trong dung dịch NaCl (a) Vùng TMAZ, (b) Vùng HAZ, (c) Vùng SZ [89]



Hình 2.22. Ảnh vi mô ăn mòn vùng nứt của mối hàn AA2024-T351 ngâm trong dung dịch NaCl (a) 20 ngày, (b) 05 ngày [89]

Cơ tính của mối hàn bị ảnh hưởng bởi các thông số hàn. Ăn mòn mối hàn AA2024-T351 cũng bị ảnh hưởng bởi cả tốc độ quay dụng cụ và vận tốc hàn. Điều này đã được Jariyaboon và cộng sự (2007) nghiên cứu [129]. Mẫu ngâm 30 phút trong dung dịch 57 g/l NaCl + 10 ml/l H₂O₂. Kết quả, ăn mòn lớn nhất khi mối hàn được chế tạo từ tốc độ quay lớn và vận tốc hàn nhỏ như Hình 2.23.



Hình 2.23. Ăn mòn trên mặt cắt ngang mối hàn chồng FSW AA2024-T351 với tốc độ quay và vận tốc hàn khác nhau [129]

Chương III. 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

Theo các công trình nghiên cứu đã công bố, đặc biệt là công trình FSW giữa nhôm và thép không gỉ [26, 32 - 34, 40], 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 và SUS316.

Bảng 3.1. Các thông số công nghệ chế tạo mối FSW AA6061/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)
N1	800	100, 150, 200, 250	0,20, 0,30, 0,35	2,9
N2	600, 700, 800, 900	50, 75, 100, 150, 200	0,30	2,9
N3	800	200	0,20, 0,30, 0,40	2,6, 2,7, 2,8, 2,9, 3,0

Các bước chế tạo, kiểm tra cấu trúc, lớp IMC, lớp khuếch tán... và cơ tính mối hàn theo quy trình như Hình 3.1, cụ thể như sau:

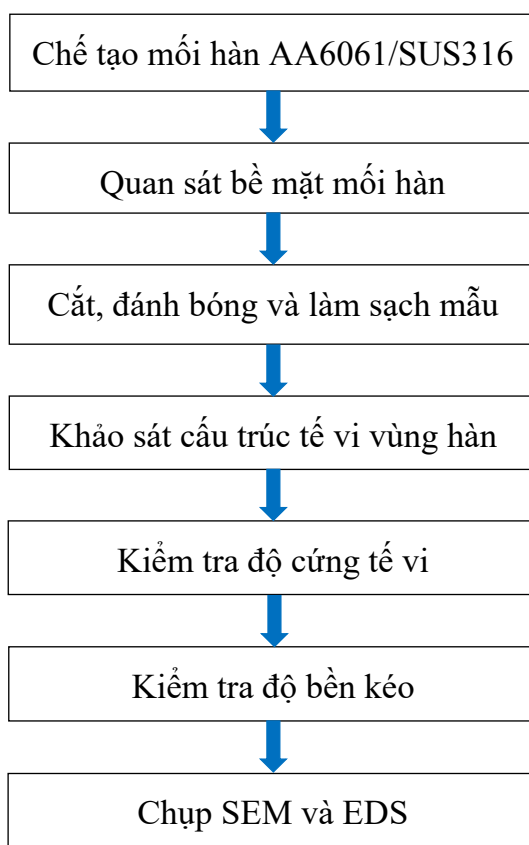
- Chế tạo mẫu theo tiêu chuẩn ASTM phục vụ cho khảo sát cấu trúc, kiểm tra độ cứng tế vi mối hàn FSW AA6061/SUS316.

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

Sau đó, tiến hành các nội dung thử nghiệm ăn mòn mối hàn AA6061/SUS316:

- Chế tạo mẫu ăn mòn theo tiêu chuẩn và phù hợp với các thiết bị thực nghiệm khi đã chế tạo thành công mối hàn 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.



Hình 3.1. Quy trình thực nghiệm chế tạo và kiểm tra cơ tính mối hàn

3.2. Vật liệu thí nghiệm

3.2.1. Hợp kim AA6061

AA6061 là hợp kim nhôm hóa bền bằng nhiệt luyện. AA6061 bao gồm các nguyên tố nhôm, magiê và hợp kim silicon. Silicon giúp hợp kim nhôm cứng, nhiệt độ nóng chảy giảm. Trong khi đó, nguyên tố magiê tăng giúp cơ tính hợp kim nhôm tăng. Khối lượng riêng $2,7 \text{ g/cm}^3$ nên hợp kim nhôm nhẹ, nhiệt độ nóng chảy thấp, xấp xỉ 660°C . Ngoài ra, AA6061 có độ bền cao và tính hàn tốt. AA6061 tầm được sử dụng rộng rãi hiện nay.

Các thông số hóa học và cơ học của AA6061 thể hiện trong Bảng 3.3 và Bảng 3.4. Kích thước tấm AA6061 để hàn ma sát khuấy như Bảng 3.2.

Bảng 3.2. Kích thước tấm AA6061 để FSW

Chiều dài (mm)	Chiều rộng (mm)	Chiều dày (mm)
300	100	3,0

Bảng 3.3. Thành phần hóa học của AA6061 (%) [41]

Fe	Si	Cr	Mg	Ti	Cu	Mn	Zn	Al
0,70	0,60	0,10	0,90	0,15	0,20	0,15	0,25	Còn lại

Bảng 3.4. Tính chất cơ học của AA6061 [9]

Độ bền chảy (MPa)	Độ bền cực đại (MPa)	Độ giãn dài phá hủy (%)
276	311	15

3.2.2. Thép không gỉ SUS316

Thép không gỉ là hợp kim sắt và các chất khác như cacbon, crom, niken,... nhằm bảo vệ vật liệu khỏi sự oxy hóa nên khả năng chống gỉ cao. Khi tôi luyện, hàm lượng crom khoảng 10 % và có thêm 2,0 % - 3,0 % molypden gọi là SUS316. Khối lượng riêng 8,0 g/cm³, nhiệt độ nóng chảy từ 1.375 °C - 1.400 °C, mô đun đàn hồi 193 GPa. Thành phần niken cao giúp SUS316 phù hợp với môi trường biển, chống ăn mòn tốt. Ngoài ra, thép không gỉ có độ cứng, độ dẻo, khả năng chịu nhiệt độ cao và thấp nên chống oxy hóa khi được sử dụng liên tục trong môi trường 870 °C, thậm chí có thể lên đến 925 °C. Thép không gỉ kháng axit, bromua ở nhiệt độ cao, chống lại các loại hóa chất vô cơ, hữu cơ trong ngành chế biến thực phẩm. Hợp kim SUS316 thường dùng để sản xuất các thiết bị trong ngành chế biến, thực phẩm, y tế, bồn chứa hóa chất, kết cấu tàu thủy, máy bay và các phụ kiện nội, ngoại thất...

Kích thước SUS316 cụ thể được thể hiện trong Bảng 3.5. Các thông số hóa học và cơ học của SUS316 thể hiện trong Bảng 3.6 và Bảng 3.7.

Bảng 3.5. Kích thước tấm SUS316 để FSW

Chiều dài (mm)	Chiều rộng (mm)	Chiều dày (mm)
300	100	1,0

Bảng 3.6. Thành phần hóa học của SUS316 (%) [41]

C	Si	Cr	Mo	P	S	Mn	Ni	Fe
0,08	1,0	17	2,0	0,02	0,02	2,0	12	Còn lại

Bảng 3.7. Tính chất cơ học của SUS316 [9]

Độ bền chảy (MPa)	Độ bền cực đại (MPa)	Độ giãn dài phá hủy (%)
207	517	30 %

3.3. Thí nghiệm chế tạo mối hàn chồng giữa AA6061 và SUS316

3.3.1. Thiết bị chế tạo

Mối hàn chồng giữa AA6061 và SUS316 được chế tạo tại phòng thí nghiệm hàn ma sát trường Đại học Nha Trang như Hình 3.2.



Hình 3.2. Máy FSW phòng thí nghiệm NTU

Thông số máy hàn ma sát khuấy trong Bảng 3.8.

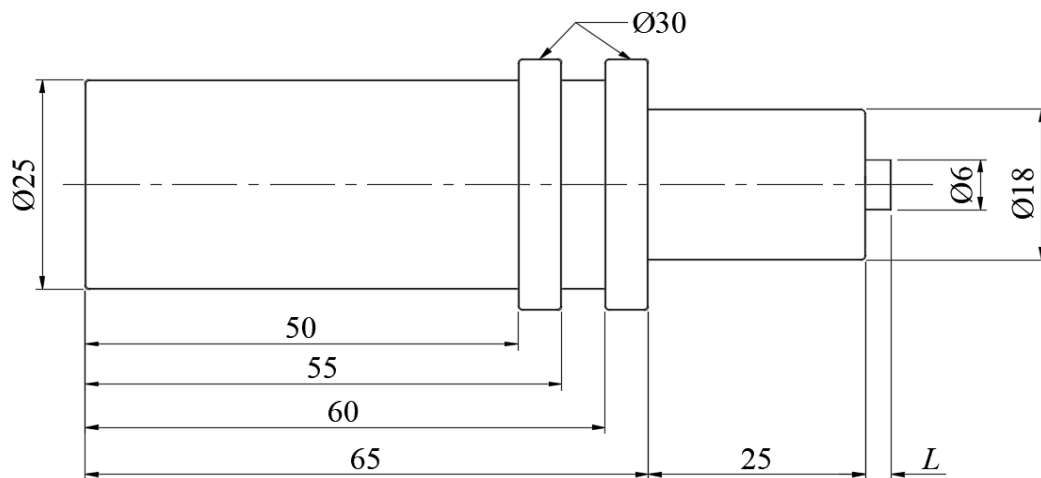
Bảng 3.8. Các tính năng kỹ thuật máy hàn FSW phòng thí nghiệm NTU

Thông số kỹ thuật	Giá trị
Kích thước bàn máy (mm)	550 × 1400
Hành trình theo trục X (mm)	1.050
Hành trình theo trục Z (mm)	550
Khoảng cách từ đầu trục chính đến bàn máy (mm)	200 - 750
Tốc độ hành trình theo trục X	24
Tốc độ hành trình theo trục Z (m/phút)	15
Tốc độ cắt (mm/phút)	1 - 5.000
Tốc độ trục chính (vòng/phút)	25 - 3.500
Motor chính (AC)	7,5 HP
Trọng lượng bản thân (kg)	9.450

3.3.2. Dụng cụ FSW

Dụng cụ hàn có đầu chốt hình trụ không ren [44]. Đường kính của vai và chốt hàn lần lượt 18 mm và 6 mm, chiều dài chốt hàn thay đổi từ 2,6 mm - 3,0 mm (Hình 3.3).

Khi hàn FSW, dụng cụ hàn phải có khả năng chịu nhiệt và chống mài mòn cao. Căn cứ vào các công trình đã công bố [44, 72, 95, 96], yêu cầu dụng cụ làm việc trong môi trường khắc nghiệt nên thép SKD11 theo tiêu chuẩn Nhật Bản JIS được sử dụng để chế tạo dụng cụ hàn. Dụng cụ hàn chế tạo theo kích thước trong bản vẽ. Sau đó, tôi và ram dụng cụ đạt độ cứng 60 HRC. Thành phần hóa học thép SKD11 trong Bảng 3.9.



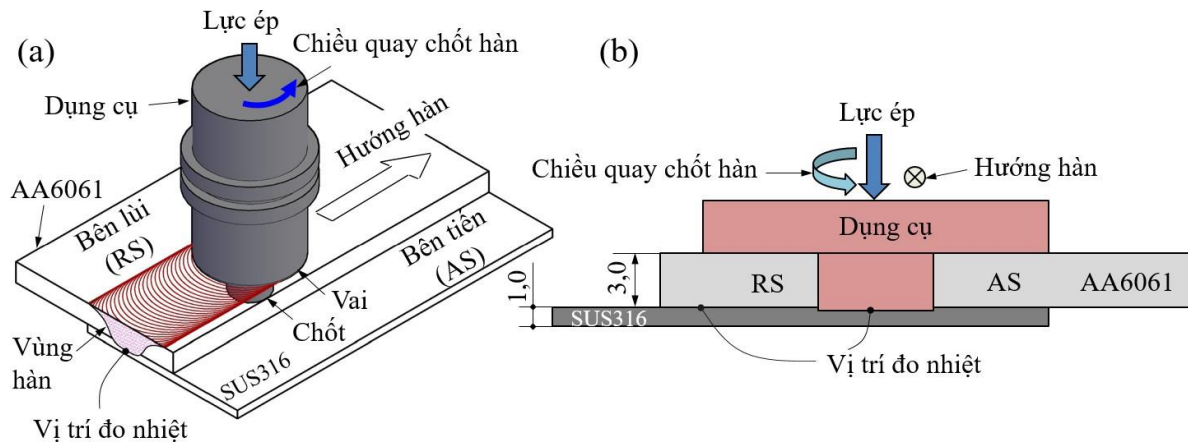
Hình 3.3. Kích thước dụng cụ FSW, mm

Bảng 3.9. Thành phần hóa học thép SKD11 [9]

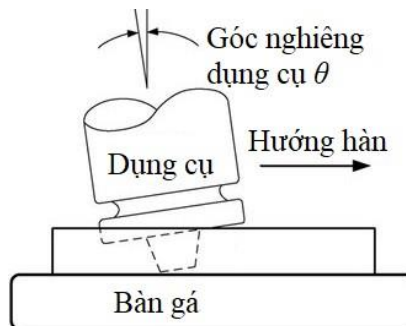
Thành phần hóa học (%)						
C	Si	Mn	Co	Cr	Mo	V
1,4 - 1,6	0,35	0,6	Max 1,0	11 - 13	08 - 1,2	0,2 - 0,5

3.3.3. Quá trình chế tạo

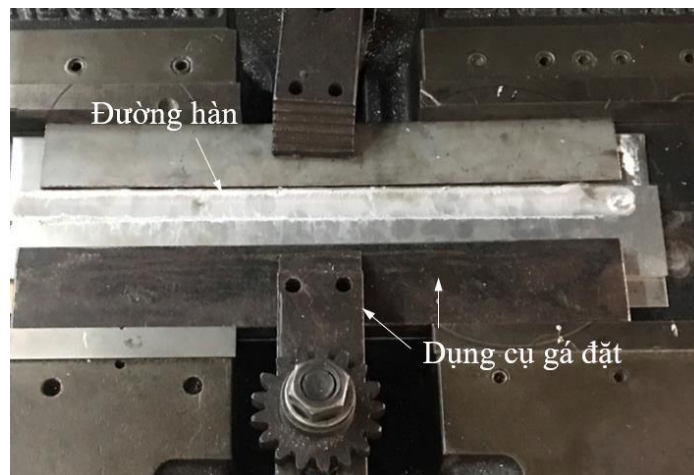
Với các thiết bị chế tạo, dụng cụ hàn và các thông số như trên, tiến hành chế tạo mối hàn chồng giữa AA6061 và SUS316. Vị trí của hai vật liệu được thể hiện trong Hình 3.4. Để giảm lực cản do phôi tạo nên và hạn chế sự trôi vật liệu khi hàn, dụng cụ hàn được đặt nghiêng so với phương vuông góc với mặt phẳng phôi một góc $\theta = 2^\circ$ như Hình 3.5. Việc gá đặt phôi được thể hiện trong Hình 3.6.



Hình 3.4. Minh họa vị trí gá đặt vật liệu trong quá trình hàn chồng FSW giữa AA6061 và SUS316



Hình 3.5. Vị trí góc nghiêng của dụng cụ θ so với phương đứng



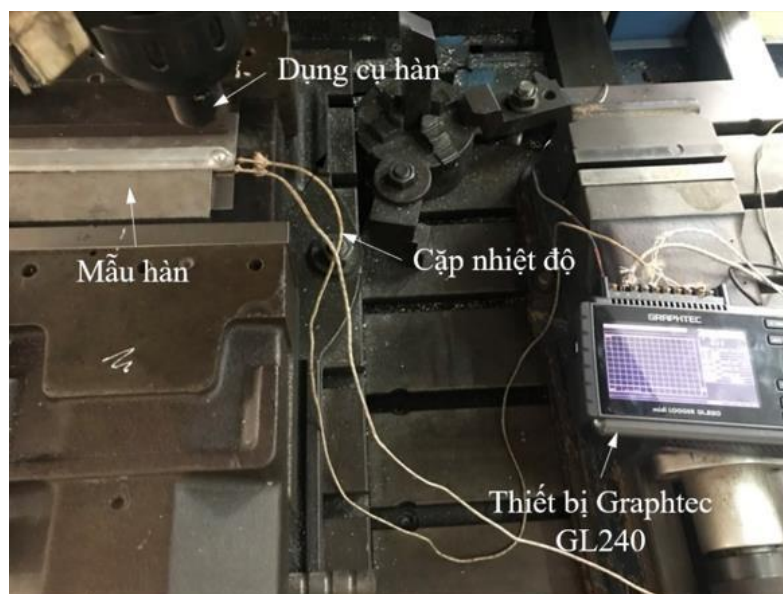
Hình 3.6. Mỗi hàn được chế tạo trên thiết bị hàn

3.4. Quá trình phân tích

3.4.1. Đo nhiệt độ vùng hàn

Trong quá trình FSW, nhiệt đầu vào ảnh hưởng lớn đến sự hình thành cấu trúc vi mô mối hàn. Do đó, 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 và quy trình thí nghiệm được minh họa trong Hình 3.4 và Hình 3.7. Cặp nhiệt kế được kẹp tại vùng khuấy giữa 2 tấm AA6061 và SUS316 với một nhiệt kế kẹp vị trí đầu, một nhiệt kế kẹp cuối đường hàn.



Hình 3.7. Vị trí và quy trình đo nhiệt độ mối hàn FSW

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

Mẫu khảo sát cấu trúc tế vi được cắt vuông góc với đường hàn (Hình 3.8). Mẫu được đánh bóng bằng giấy nhám từ thô đến mịn (giấy nhám Sankyo - Nhật từ 1000 đến 4000) kết hợp với nước trên máy đánh bóng MA - PO250 (Hình 3.9(a)). Sau đó, mẫu được đánh bóng với vải cùng với nhôm oxit Al_2O_3 . Để quan sát được sự thay đổi cấu trúc vùng hàn, mẫu được tẩm thực bằng dung dịch Keller (2,5 ml HNO_3 , 1,5 ml HCl , 1,0 ml HF và 95 ml H_2O) trước khi quan sát bằng kính hiển vi Olympus CK40M (Hình 3.9(b)).



Hình 3.8. Mẫu AA6061/SUS316 kiểm tra cấu trúc tế vi



Hình 3.9. (a) Máy cắt mẫu và đánh bóng, (b) kính hiển vi Olympus

Bên cạnh đó, mặt liên kết hai hợp kim và mặt phá hủy mối hàn sau khi kéo được thể hiện chi tiết qua kính hiển vi điện tử quét (SEM), phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS).

3.4.3. Đặc tính bề mặt liên kết mối hàn

Nhiệt đầu vào mối hàn thay đổi khi thay đổi vận tốc hàn, tốc độ quay dụng cụ, chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn trong quá trình FSW. Khi hàn hai vật liệu khác nhau, đặc tính lớp hợp chất liên kim ảnh hưởng rất lớn đến độ bền của mối hàn. Những đặc tính này được khảo sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM), phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS) tại Đại học Bách Khoa Hà Nội (Hình 3.10). Chiều dày lớp khuếch tán và chiều dày lớp IMC sẽ được phân tích cụ thể.

Kính hiển vi điện tử quét, model: JEOL JSM-IT200 SEM - EDX - EBSD, với thông số kỹ thuật sau:

- Nguồn điện tử: Sợi đốt Vonfram.
- Độ phóng đại trực tiếp: X5 đến X300.000.
- Điều chỉnh độ nghiêng của mẫu để lấy nét. Độ nghiêng từ -10° đến $+90^{\circ}$ phụ thuộc vào kích thước bộ giữ mẫu.
- Camera quan sát trong buồng mẫu.
- Di chuyển mẫu: 5 trục (X, Y, Z, R, T). Điều khiển 2 trục X, Y bằng mô tơ, CPU.
- Bộ giữ mẫu tiêu chuẩn:
 - + Đường kính 32 mm x dày 10 mm.
 - + Bộ gá 4 mẫu: đường kính 10 mm.

- Hệ thống đầu thu:

+ Chân không cao:

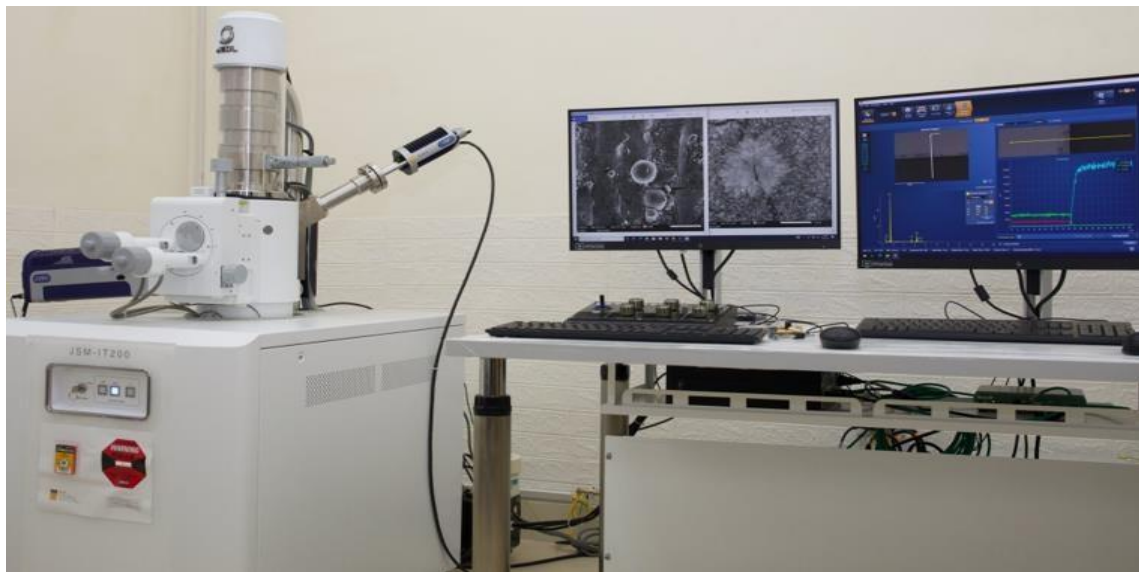
* Đầu thu tín hiệu điện tử thứ cấp (SE).

* Đầu thu tín hiệu điện tử tán xạ ngược (BE).

+ Chân không thấp:

* Đầu thu tín hiệu điện tử tán xạ ngược (BE).

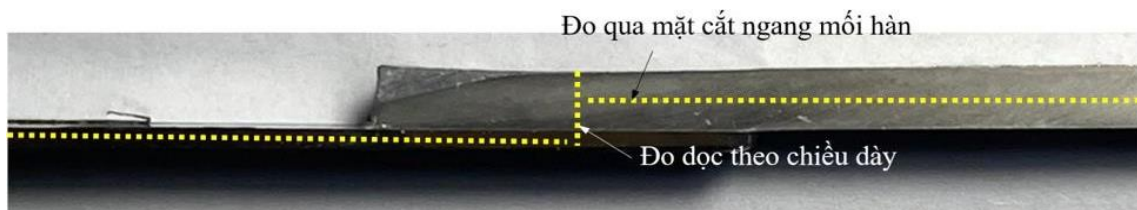
- Tích hợp hệ phân tích phổ tán xạ năng lượng EDS/EDX, Model: Xplore 30.



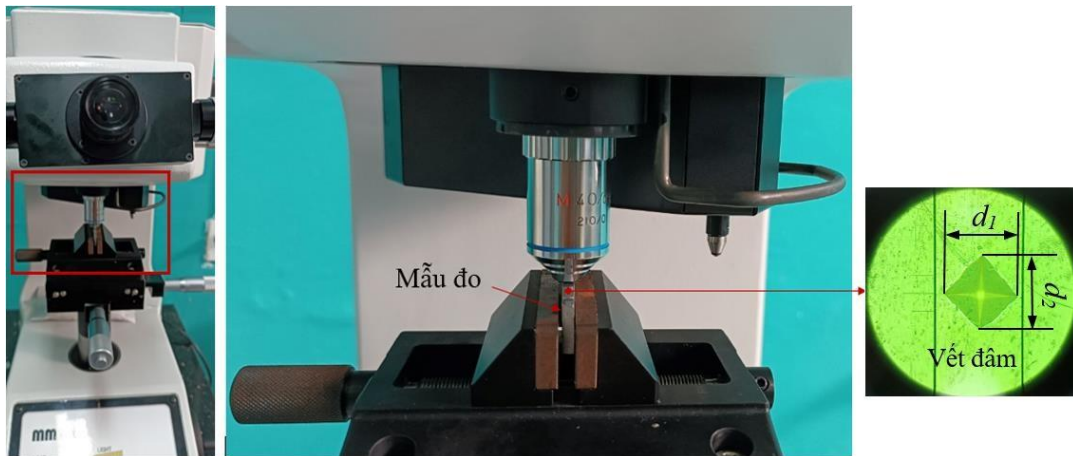
Hình 3.10. Kính hiển vi điện tử quét (SEM), phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS)

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

Khảo sát độ cứng mối hàn dọc theo chiều dày và mặt cắt ngang như Hình 3.11. Độ cứng tế vi được đo bằng thiết bị Vickers MMT-X1, hãng sản xuất Matsuzawa - Nhật Bản, dưới tải trọng đo là 200 gf, thời gian giữ tải 10 giây theo tiêu chuẩn ASTM E92 [125]. Thiết bị và quá trình kiểm tra độ cứng mối hàn được thể hiện Hình 3.12.



Hình 3.11. Vị trí khảo sát độ cứng mối hàn AA6061/SUS316



Hình 3.12. Máy đo độ cứng MMT-X1 và quy trình thử nghiệm

Từ vết đâm khi đo độ cứng mỗi hàn, ta có kích thước d_1 và d_2 như Hình 3.12.

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.1)$$

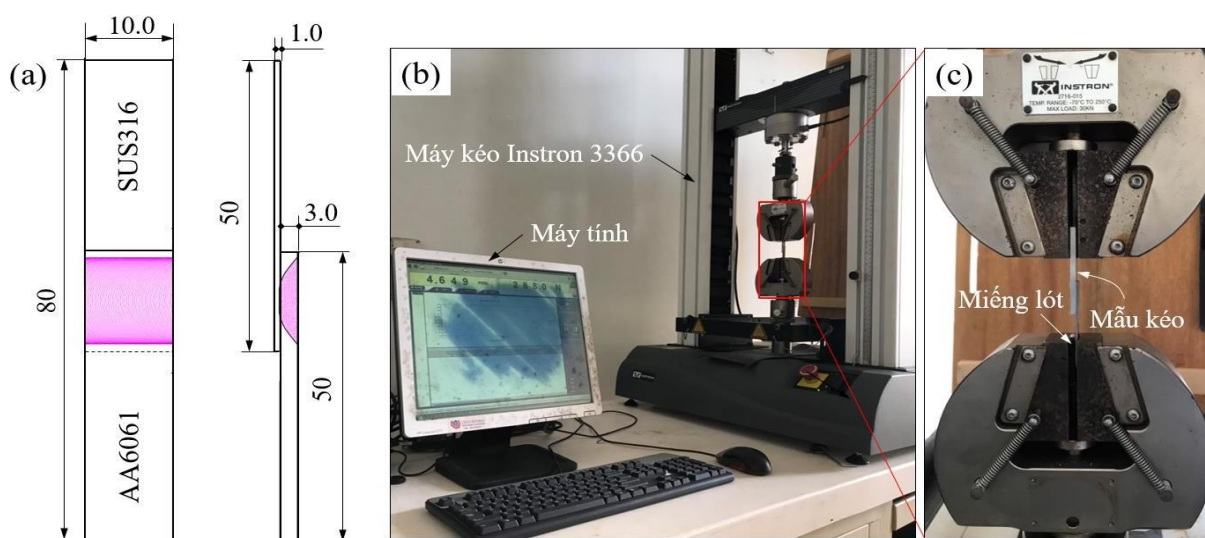
$$\text{Độ cứng từng điểm đo theo công thức sau: } HV = \frac{1,854 \times 200 \times 1000}{d^2} \quad (3.2)$$

Thiết bị đo độ cứng MMT - X1 Type A Matsuzawa - Nhật Bản, tiêu chuẩn JIS B7725 and ASTM E - 384, với thông số kỹ thuật sau:

- Tải tác dụng: 5 - 1000 gf.
- Thời gian tác dụng: 5 - 30 s.
- Cảm biến nhận dạng tải tự động.
- Chuyển đổi độ cứng: tiêu chuẩn SAE (J - 417B), ASTM (E - 140).
- Nguồn điện: 100 V - 220 V, tương ứng 50/60 Hz
- Kích thước: W250 x D520 x H530 mm
- Khối lượng: 35 kg

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

Kích thước của mẫu thử kéo và quy trình thử nghiệm kéo mẫu hàn như Hình 3.13. Quá trình thử nghiệm được thực hiện bằng máy Instron 3366 với tốc độ kéo 2,0 mm/phút theo tiêu chuẩn ASTM E8 [130]. Máy kết nối máy vi tính để xuất ra đồ thị, lực kéo khi mẫu bị phá hủy. Bên cạnh đó, quan sát và tính diện tích liên kết giữa hai hợp kim AA6061 và SUS316 tại tốc độ quay, vận tốc hàn, chiều sâu ép chót và chiều dài chót hàn khác nhau.

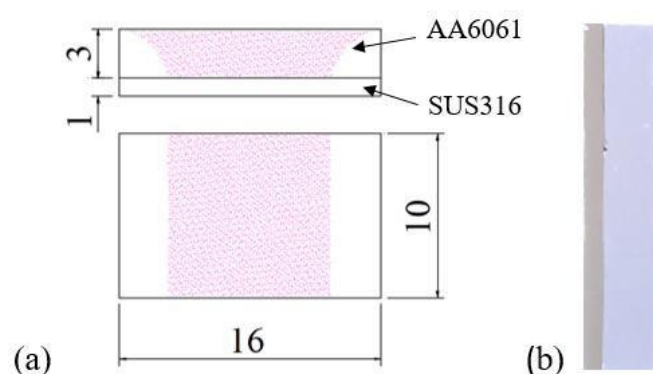


Hình 3.13. (a) Kích thước mẫu hàn thử kéo, mm và (b, c) thử nghiệm kéo mối hàn

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

Mẫu lựa chọn cho nghiên cứu này dựa vào kết quả chất lượng mối hàn đã được chế tạo, nghiên cứu về cơ tính và cấu trúc trong mục 3.3. Kích thước mẫu thí nghiệm ăn mòn điện hóa theo tiêu chuẩn ASTM G71 - 81 và G31 - 72 [131, 132]. Ngoài ra, để phù hợp với các thiết bị thí nghiệm thực tế, mẫu được gia công như Hình 3.14(a), đánh bóng bằng giấy nhám từ thô đến mịn kết hợp với nước như Hình 3.14(b). Sau đó, đánh bóng với vải cùng với nhôm oxit - Al_2O_3 và rửa sạch bằng nước. Để đánh giá và so sánh cấu trúc trước và sau ăn mòn, mẫu trước thí nghiệm được quan sát bằng kính hiển vi Olympus CK40M.



Hình 3.14. (a) Kích thước mẫu thử nghiệm, mm và (b) mẫu sau đánh bóng

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 [133]. Mối hàn sau ăn mòn có nhiều chất bẩn bên trong nên làm sạch thông thường không loại bỏ được hoàn toàn.

Việc sử dụng sóng siêu âm tích hợp trên máy làm sạch là phương pháp vệ sinh hiện đại có hiệu quả làm sạch cao, tạo ra hiệu ứng xâm thực thông qua các rung động tần số cao để loại bỏ bụi bẩn bám trên bề mặt. Làm sạch mẫu trên thiết bị Lofans CS - 602 với hiệu điện thế đầu vào 12 V, tần số siêu âm 47 kHz, dung tích bể làm sạch 500 ml (Hình 3.15(a)). Sau đó, ngâm mẫu trong ethanol trước khi sấy khô mẫu. Xác định khối lượng bị ăn mòn bằng cân tiểu ly TN - Series với sai số cho phép 50 g x 0,001 g (Hình 3.15(b)).



Hình 3.15. (a) Máy làm sạch Lofans CS - 602, (b) cân tiểu ly TN - Series

Trong nghiên cứu này, tốc độ ăn mòn của mối hàn AA6061/SUS316 trong các môi trường ăn mòn khác nhau được xác định bằng phương pháp trọng lượng [131, 132]. Điều đó có nghĩa là tốc độ ăn mòn tương ứng với khối lượng kim loại bị mất đi trên đơn vị thời gian và diện tích mẫu được xác định theo công thức sau:

$$\rho = \frac{m_0 - m_1}{S.t} = \frac{\Delta m}{S.t} \quad (3.3)$$

trong đó: ρ - tốc độ ăn mòn (mg/mm².h).

m_0 - khối lượng mẫu trước khi thí nghiệm (mg).

m_1 - khối lượng mẫu sau khi thí nghiệm (mg).

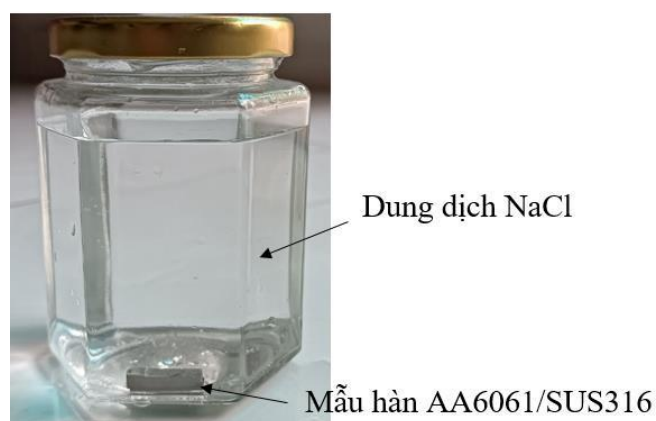
S - diện tích bề mặt ăn mòn (mm²).

t - thời gian thí nghiệm ăn mòn (h).

Thử nghiệm ăn mòn được kế thừa từ các nghiên cứu đã công bố. Bên cạnh đó, tầm lưỡng kim AA6061/SUS316 ứng dụng trong các lĩnh vực thực phẩm, y tế, đặc biệt là pin của các thiết bị điện nên cần nghiên cứu ăn mòn trong các môi trường NaCl, hiệu điện thế và nhiệt độ. Các thông số NaCl, hiệu điện thế, nhiệt độ được quy hoạch thực nghiệm phù hợp với mối hàn và các thiết bị thí nghiệm hiện tại.

3.4.6.2. Môi trường NaCl

Thí nghiệm được tiến hành cho 3 mẫu tương ứng với 4 dung dịch NaCl khác nhau để lấy giá trị trung bình. Mẫu được ngâm trong dung dịch NaCl khác nhau được chứa trong bình thủy tinh có nắp đậy kín suốt trong quá trình thí nghiệm để tránh sự bay hơi của nước như Hình 3.16. Dung dịch NaCl được pha chế từ nước cất và %NaCl nguyên chất dùng trong phòng thí nghiệm với các nồng độ khác nhau: 0 %, 1,5 %, 3,0 % và 4,5 %NaCl. Mẫu được ngâm hoàn toàn trong các dung dịch này. Khối lượng và cấu trúc mỗi hàn sau khi ăn mòn được kiểm tra theo chu kỳ 1 tháng/lần với 3 lần kiểm tra.



Hình 3.16. Mẫu AA6061/SUS316 ngâm trong dung dịch NaCl

3.4.6.3. Môi trường hiệu điện thế

Để đánh giá quá trình ăn mòn mỗi hàn trong các môi trường khắc nghiệt, thí nghiệm này, mẫu hàn AA6061/SUS316 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 mỗi hàn sau khi ăn mòn được kiểm tra theo chu kỳ 30 phút/lần, kiểm tra 5 lần.

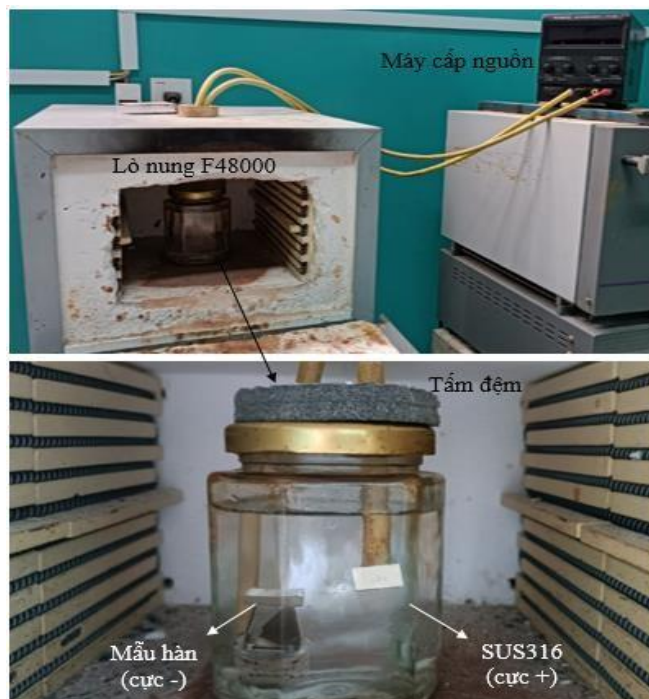


Hình 3.17. Mẫu ngâm dung dịch 3,0 %NaCl và tác dụng hiệu điện thế khác nhau

Thí nghiệm sử dụng máy cấp nguồn DC Power Supply, nhãn hiệu Buen Poder PS - 605 - Trung Quốc. Công suất đầu ra 300 W, điện áp và dòng điện đầu ra tương ứng 0 - 60 V, 0 - 5 A. Kích thước: 255 x 130 x 150 mm, trọng lượng 1,9 kg. Mẫu hàn AA6061/SUS316 được kẹp ở cực âm, cực dương kẹp SUS316, với số lượng 3 mẫu thí nghiệm tương ứng với các hiệu điện thế khác nhau (Hình 3.17).

3.4.6.4. Môi trường nhiệt độ

Trong thí nghiệm này, mẫu bị ăn mòn trong môi trường khắc nghiệt nhất với ảnh hưởng đồng thời của dung dịch NaCl, hiệu điện thế và nhiệt độ môi trường. Trong đó, ảnh hưởng của nhiệt độ được chú trọng đặc biệt. Mẫu hàn được ngâm trong dung dịch 3,0 %NaCl, tác dụng hiệu điện thế 3 V và ở các nhiệt độ thay đổi từ 30 °C đến 100 °C. Ba mẫu thí nghiệm tương ứng cho từng nhiệt độ khác nhau. Khối lượng và cấu trúc mỗi hàn sau khi ăn mòn được kiểm tra theo chu kỳ 30 phút/lần, kiểm tra 5 lần.



Hình 3.18. Mẫu ngâm 3,0 %NaCl, $U = 3V$ và nhiệt độ khác nhau

Để tạo ra môi trường nhiệt độ, mẫu được đặt trong lò nung điện F48000 thể hiện Hình 3.18. Thông số của lò nung như sau:

- Nguồn điện: 220 V/240 V - 50 Hz/60 Hz.
- Nhiệt độ nung: 50 °C - 1200 °C (độ chính xác: ± 1 °C).
- Thời gian gia nhiệt tối đa 40 phút.
- Hiển thị nhiệt độ: màn hình hiển thị số LED, tùy chọn nhiệt độ nung.

Chương IV. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

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

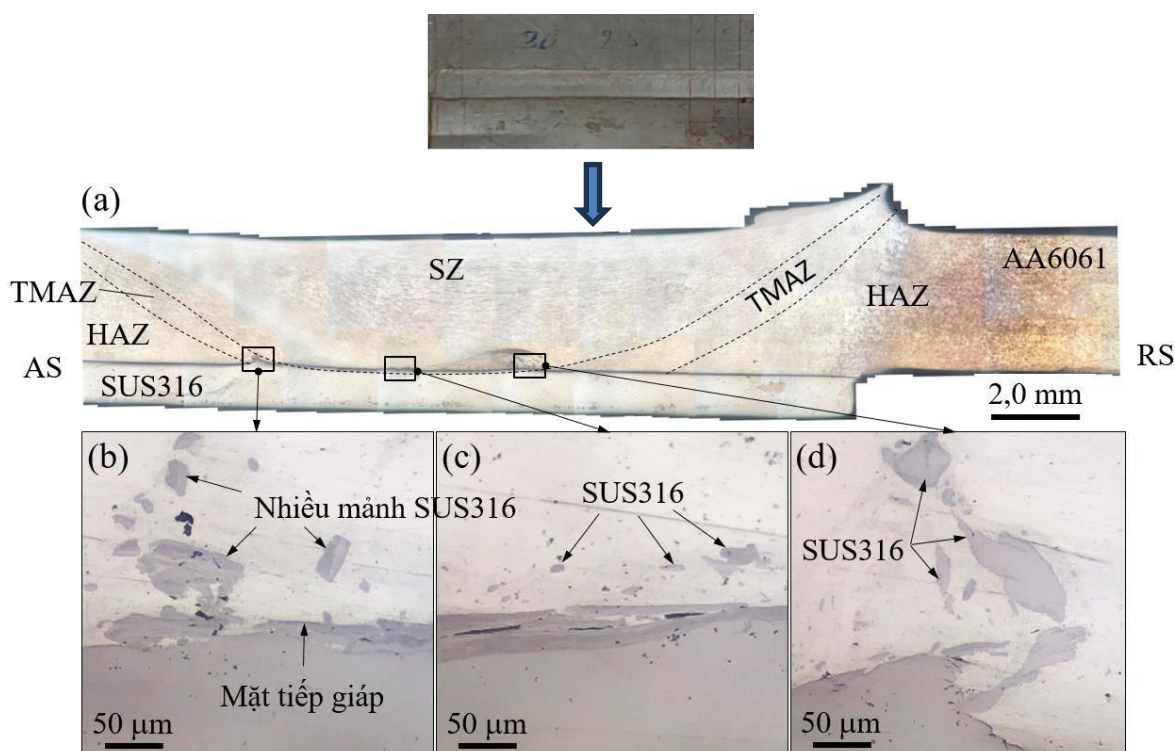
Mối hàn được chế tạo với vận tốc hàn từ 100 mm/phút đến 250 mm/phút, chiều sâu ép chốt thay đổi tương ứng từ 0,20 mm đến 0,35 mm. Tốc độ quay dụng cụ hàn 800 vòng/phút, chiều dài chốt hàn 2,9 mm không đổi trong quá trình hàn FSW.

Bảng 4.1. Các thông số khác nhau để chế tạo mối hàn AA6061/SUS316 nhằm khảo sát ảnh hưởng của vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt đến đặc tính mối 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)
800	100, 150, 200, 250	0,20, 0,30, 0,35	2,9

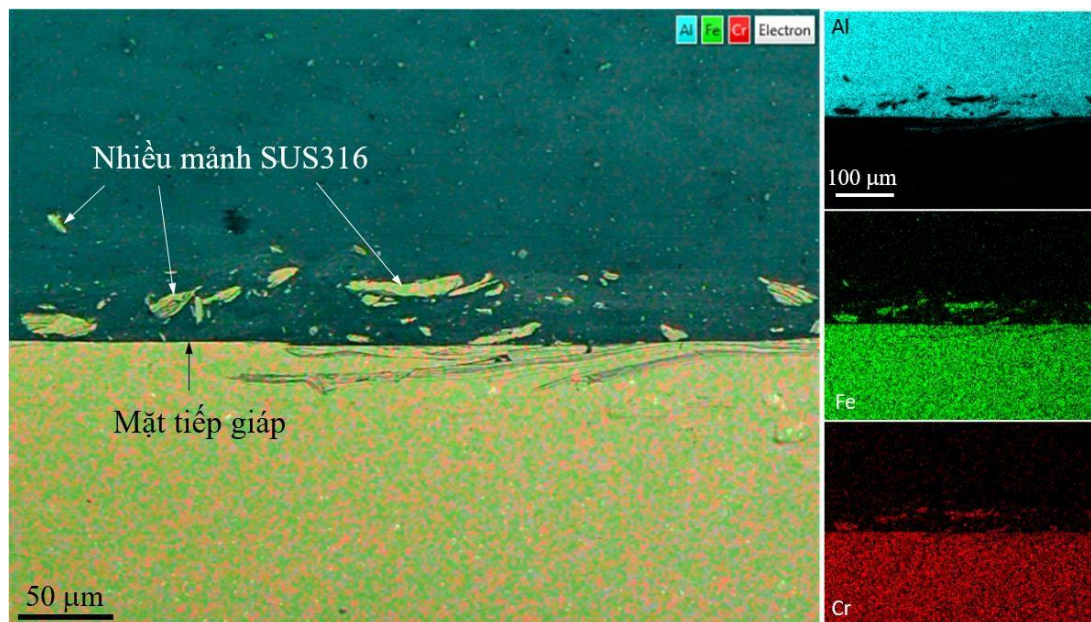
4.1.1. Sự phát triển cấu trúc tế vi mối hàn

Hình 4.1 hiển thị cấu trúc tế vi mối hàn được chế tạo với vận tốc hàn 100 mm/phút và chiều sâu ép chốt là 0,35 mm. Như hiển thị trong Hình 4.1(a), mối hàn không bị khuyết tật như: nứt, rãnh, lỗ rỗng. Một số mảnh thép phân tán được phát hiện trong vùng SZ của AA6061, chúng bị bong ra do chốt hàn tiếp xúc với bề mặt thép và sau đó di chuyển về phía AA6061 mềm như Hình 4.1(b, c, d).



Hình 4.1. (a) Cấu trúc vĩ mô và (b, c, d) cấu trúc vi mô của mối hàn AA6061/SUS316 tại vận tốc hàn 100 mm/phút, chiều sâu ép chốt 0,35 mm

Trong Hình 4.2, biểu đồ phân bố nguyên tố cho thấy rõ ràng các mảnh thép có kích thước khác nhau được hòa trộn vào hợp kim nhôm. Do tác động khuấy của chổi hàn gây ra, dẫn đến sự hòa trộn lẫn nhau giữa thép và nhôm tại bề mặt tiếp giáp. Vì vậy, khi tăng chiều sâu ép chổi có thể dẫn đến hòa trộn lớn của SUS316 vào AA6061.



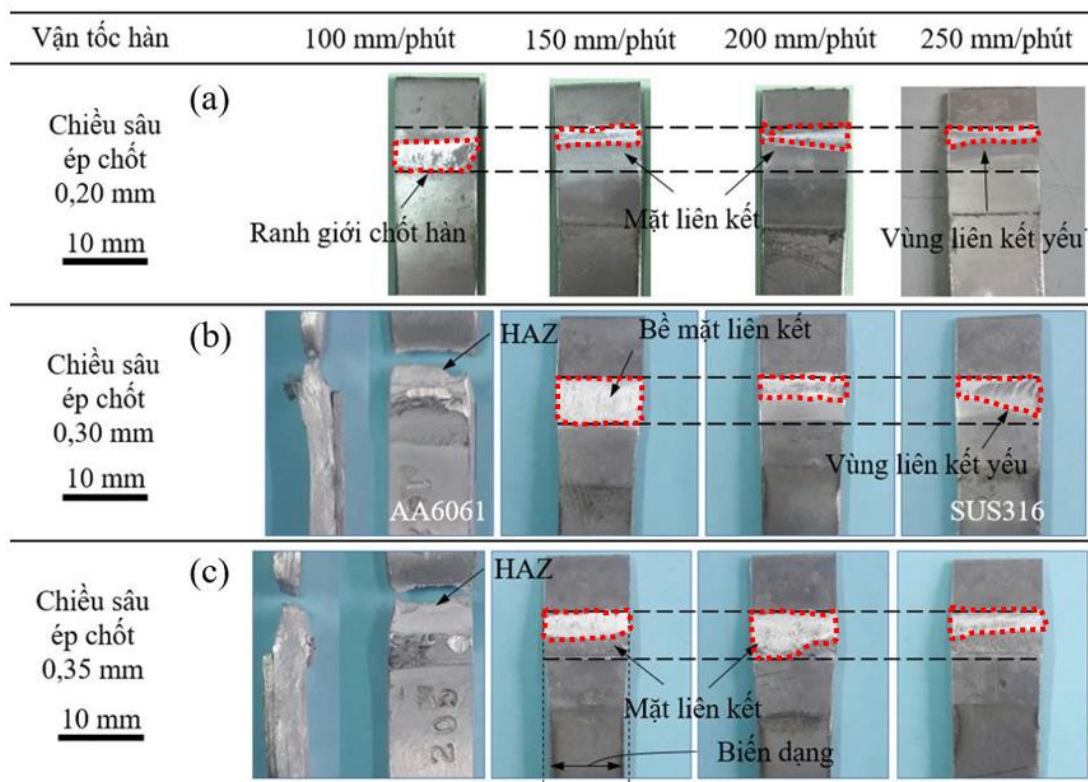
Hình 4.2. Biểu đồ phân bố nguyên tố vùng tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 của mối hàn chế tạo ở vận tốc hàn 100 mm/phút và chiều sâu ép chổi 0,35 mm

Độ bền của mối hàn không chỉ bị ảnh hưởng bởi cấu trúc hạt mà còn cả đặc tính bề mặt liên kết được kiểm soát bởi các thông số hàn. Đại diện mặt liên kết mối hàn trên tấm SUS316 với vận tốc hàn và chiều sâu ép chổi khác nhau được thể hiện Hình 4.3.

Liên kết giữa SUS316 và AA6061 được hình thành do quá trình biến dạng dẻo của hai vật liệu. Sự khuếch tán nguyên tử của hai vật liệu tại ranh giới tiếp xúc tạo nên một liên kết bền chắc. Vùng có hình thành các liên kết này được gọi là diện tích liên kết. Để xác định diện tích liên kết này, tác giả đã sử dụng quan sát trên kính hiển vi điện tử quét SEM kết hợp với phần mềm Autocad để đo diện tích này. Vì vậy, phân tích và áp dụng mối liên kết giữa vận tốc hàn và chiều sâu ép chổi rất quan trọng trong việc cải thiện cơ tính các mối hàn khác nhau.

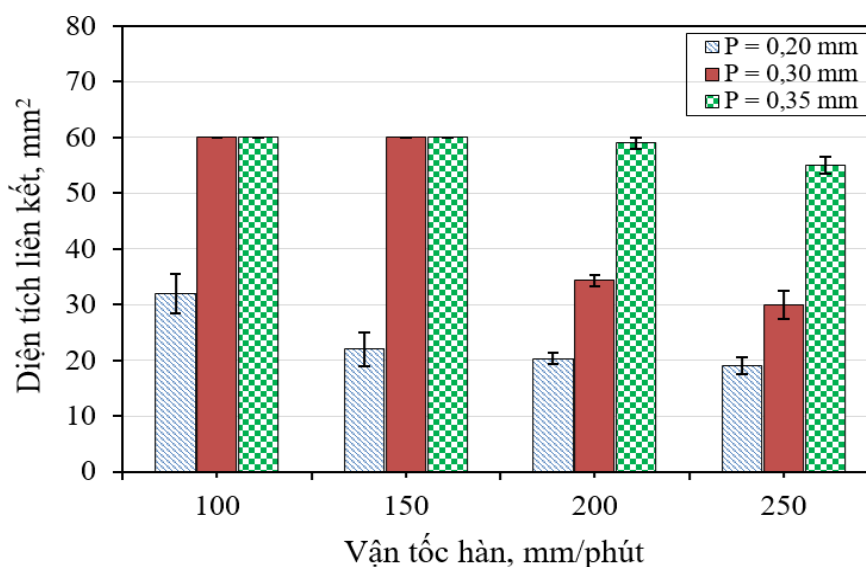
Vùng trong vạch đỏ của Hình 4.3 thể hiện diện tích liên kết giữa hai tấm AA6061 và SUS316. Diện tích liên kết có giá trị là 55 mm^2 tại vận tốc hàn 250 mm/phút và chiều sâu ép chổi 0,35 mm. Diện tích liên kết đạt giá trị 59 mm^2 tại chiều sâu ép chổi 0,35 mm, vận tốc hàn 200 mm/phút. Liên kết giữa hai hợp kim hàn thấp với mọi vận tốc hàn tại chiều sâu ép chổi 0,20 mm. Kết quả cho thấy diện tích liên kết thấp khi tăng vận tốc

hàn trên tất cả chiều sâu ép chốt. Điều đó có nghĩa rằng độ bền kéo mỗi hàn giảm.



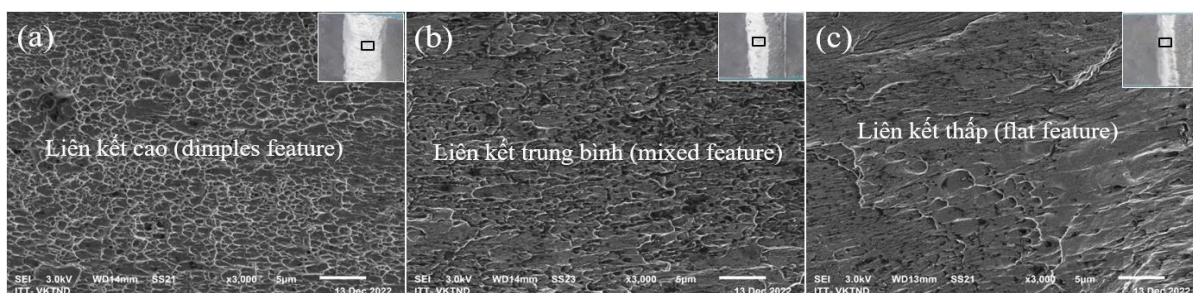
Hình 4.3. Các dạng phá hủy mối hàn AA6061/SUS316 được FSW với vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt khác nhau

Như bằng chứng trong Hình 4.3, diện tích liên kết quan sát được trên bề mặt bị phá hủy của mẫu thử là nhỏ khi tăng vận tốc hàn. Mối hàn bị đứt tại vùng HAZ bên AA6061 khi vận tốc hàn 100 mm/phút. Cả hai chiều sâu ép chốt 0,30 mm và 0,35 mm, diện tích liên kết giữa AA6061 và SUS316 lớn nhất xấp xỉ 60 mm² được thể hiện Hình 4.4.



Hình 4.4. Diện tích liên kết tại mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 tương ứng với vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt khác nhau

Độ bền mối hàn phụ thuộc vào khuyết tật bề mặt, độ dày và tính chất của lớp IMC [42, 134 - 136]. Vì vậy, cần phải khảo sát bề mặt liên kết mối hàn AA6061/SUS316. Hình SEM thể hiện bề mặt phá hủy ở mặt SUS316 như trong Hình 4.5. Khi mối hàn AA6061/SUS316 được chế tạo với chiều sâu ép chốt 0,30 mm và vận tốc hàn 150 mm/phút, xuất hiện số lượng lớn các vết lõm có hình dạng lúm đồng tiền được thể hiện Hình 4.5(a). Điều đó có nghĩa là liên kết kim loại của AA6061 và SUS316 tốt trong quá trình FSW. Chiều sâu ép chốt hàn tăng có thể tạo ra liên kết giòn. Như được thấy trong Hình 4.5(b), vết lõm đã giảm đáng kể, có thể xuất hiện thêm các nguyên tố oxit của mặt tiếp giáp với vận tốc hàn 150 mm/phút và chiều sâu ép chốt 0,35 mm.



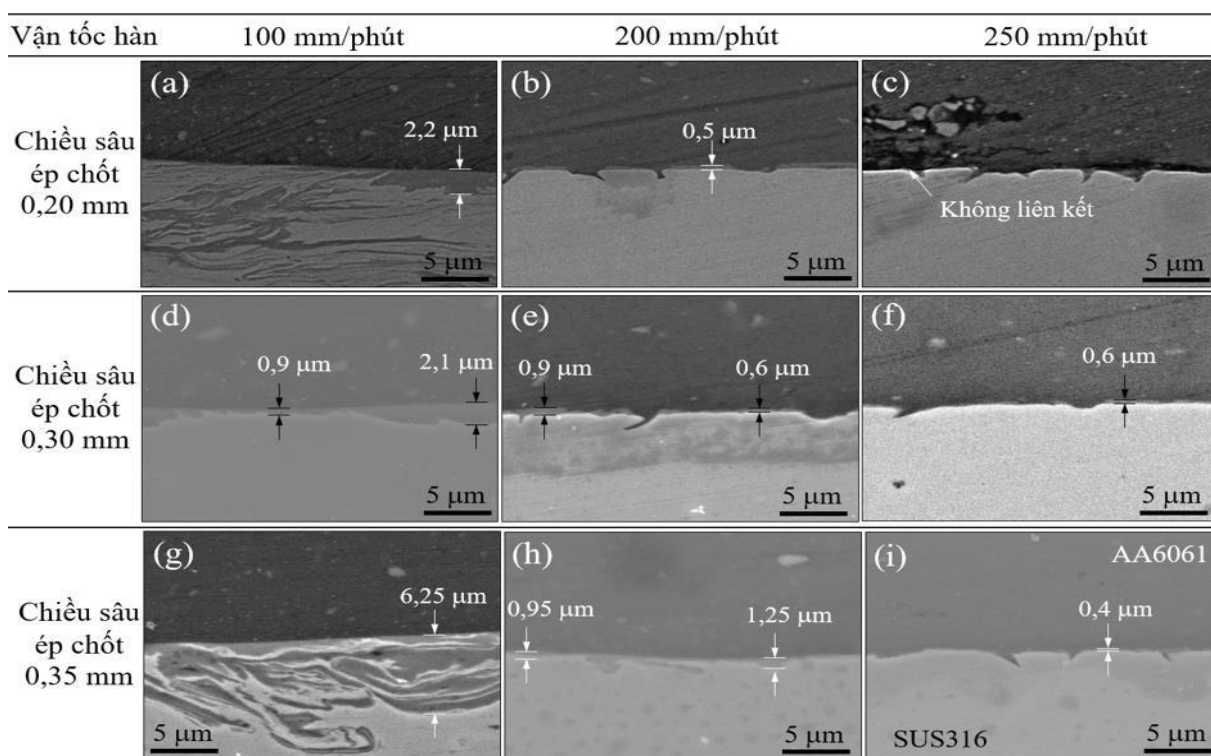
Hình 4.5. Hình SEM bề mặt phá hủy mối hàn được chế tạo bởi (a) 150 mm/phút (0,30 mm), (b) 150 mm/phút (0,35 mm) và (c) 250 mm/phút (0,35 mm)

Theo tài liệu tham khảo [33, 134, 136], các pha giàu Al như FeAl_3 , FeAl_2 và Fe_2Al_5 trong lớp IMC của mối hàn FSW giữa nhôm và thép. Đây là lý do hình thành liên kết giòn. Mối hàn được chế tạo với vận tốc hàn 250 mm/phút và chiều sâu ép chốt là 0,35 mm, bề mặt liên kết rất phẳng và mịn được thể hiện trong Hình 4.5(c). Vì vậy liên kết giữa hợp kim nhôm AA6061 và thép không gỉ SUS316 thấp. Như đã phân tích, nhiệt đầu vào và hoạt động khuấy của chốt hàn thấp dẫn đến AA6061 liên kết thấp với SUS316.

4.1.2. Chiều dày lớp IMC, lớp khuếch tán

Hình SEM thể hiện ảnh hưởng của vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt trên mặt liên kết mối hàn thể hiện trong Hình 4.6. Việc tăng vận tốc hàn dẫn đến giảm chiều dày lớp IMC. Như Hình 4.6(d), xuất hiện 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 được thể hiện trong Hình 4.6(f). 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 như Hình 4.6(g). Lớp IMC không đồng nhất dọc theo mặt tiếp giáp, đã công bố kết quả trong công trình nghiên cứu thiết kế thân xe đa vật liệu [37]. Ngoài ra, như quan sát Hình 4.6(c), khuyết tật không liên kết giữa

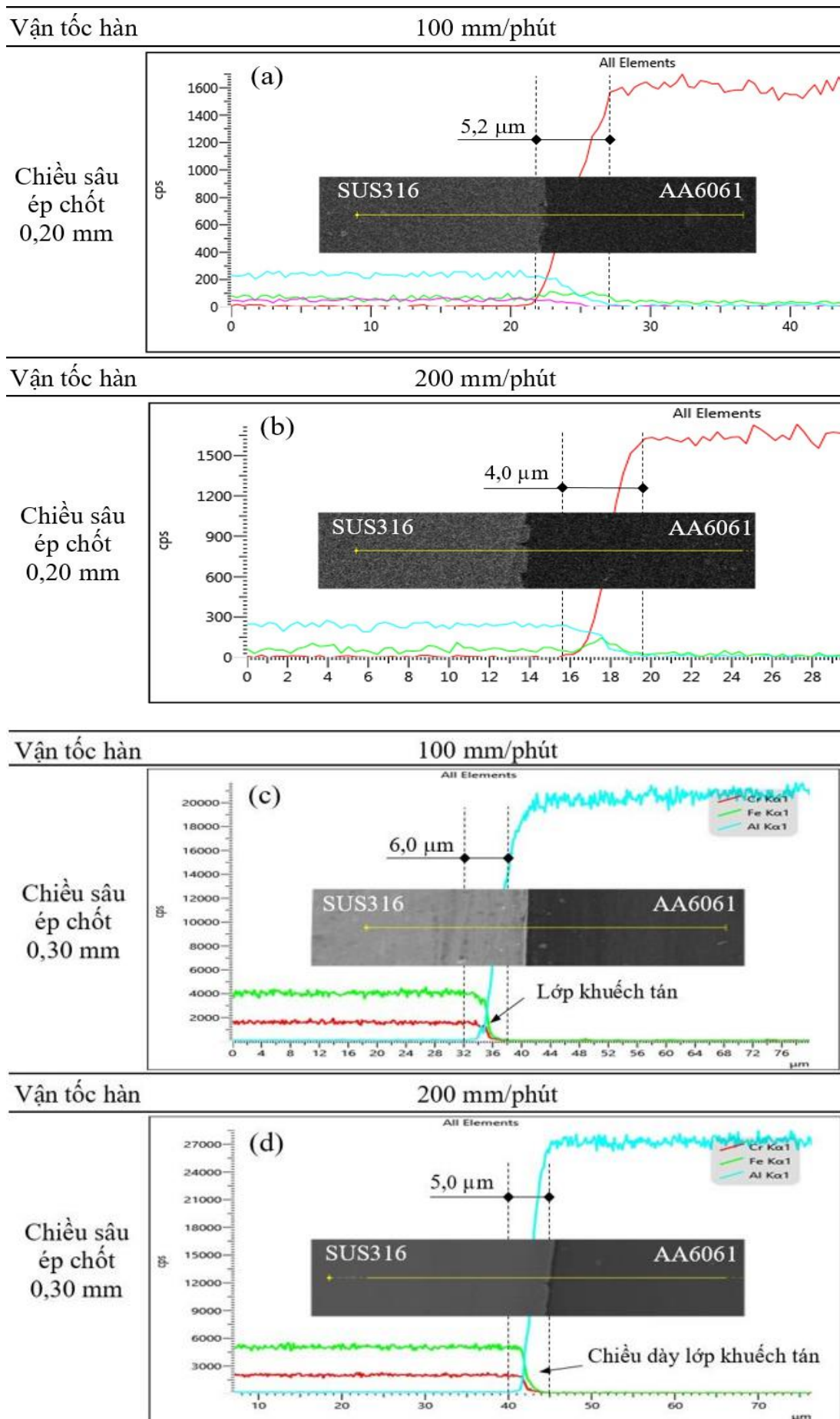
hai hợp kim AA6061 và SUS316 được hình thành ở vận tốc hàn 250 mm/phút và chiều sâu ép chốt 0,20 mm.



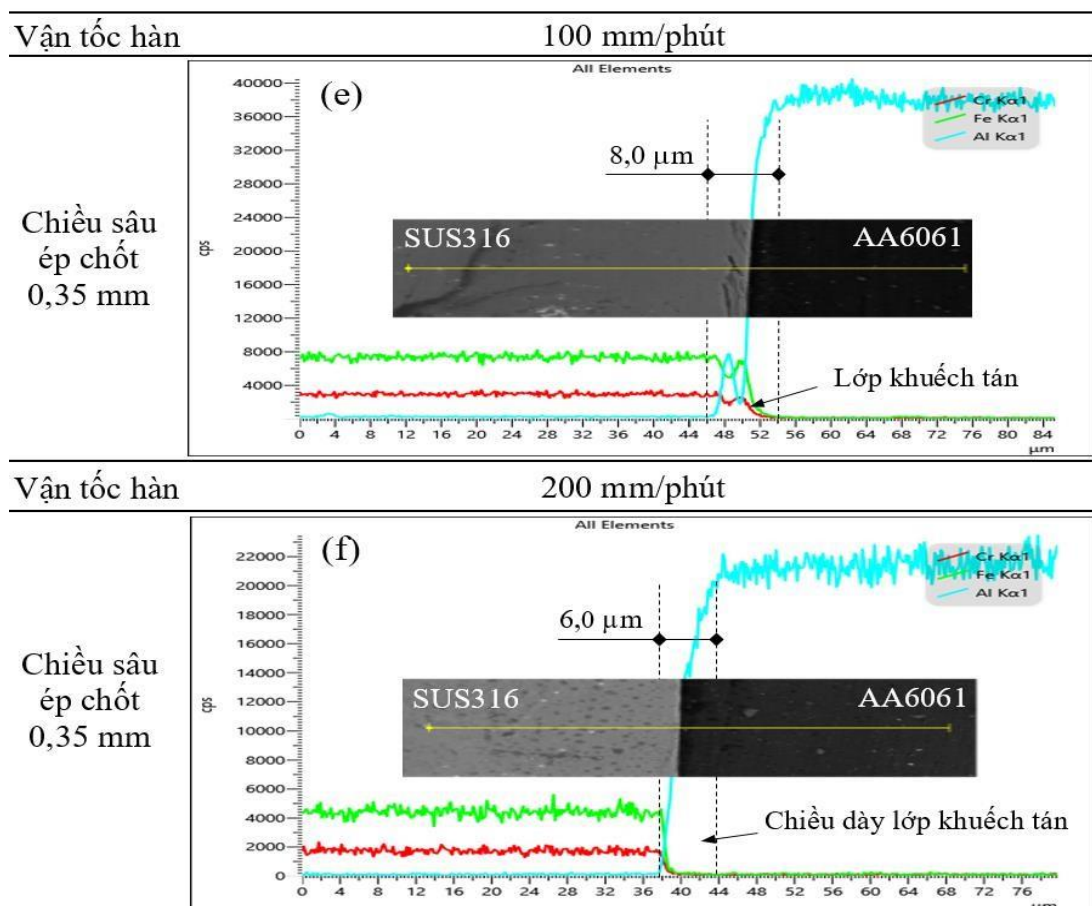
Hình 4.6. Hình SEM của mặt liên kết giữa AA6061 và SUS316 tại chiều sâu ép chốt (mm) và vận tốc hàn (mm/phút) khác nhau

Chiều dày của lớp IMC tăng khi tăng chiều sâu ép chốt. Ở vận tốc hàn 200 mm/phút, chiều dày lớp IMC tăng từ 0,5 μm lên 1,25 μm khi chiều sâu ép chốt tăng từ 0,20 mm lên 0,35 mm. Lớp IMC được tạo ra ở mặt liên kết mỗi hàn do nhiệt ma sát khi chốt hàn khuấy [34, 137]. Khi tăng chiều sâu ép chốt từ 0,20 mm lên 0,35 mm, chiều sâu của chốt vào thép cũng tăng từ 0,10 mm lên 0,25 mm nên chốt hàn khuấy trộn rõ rệt hơn. Vì vậy, chiều dày lớp IMC tăng khi tăng chiều sâu ép chốt hàn.

Biểu đồ phân bố nguyên tố cho thấy chiều dày lớp khuếch tán được tạo ra bởi vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt khác nhau như Hình 4.7. Lớp khuếch tán Fe - Al có chiều dày lớn hơn so với chiều dày lớp IMC. Hiện tượng này có thể được giải thích rằng là do sự hiện diện của các hạt kim loại Fe và Al với tỷ lệ khuếch tán thấp nên dẫn đến tăng chiều dày lớp khuếch tán. Kết quả này cũng tương đồng với những nghiên cứu trước đây [135]. Xu hướng tương tự về chiều dày lớp IMC cũng được phát hiện ở chiều dày lớp khuếch tán giữa AA6061 và SUS316 bị ảnh hưởng bởi tác động nhiệt đầu vào và hoạt động khuấy của chốt hàn. Việc tăng chiều sâu ép chốt hoặc giảm vận tốc hàn sẽ làm tăng chiều dày lớp hợp chất liên kim và lớp khuếch tán.



Hình 4.7. Ảnh hưởng vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt đến chiều dày lớp khuếch tán

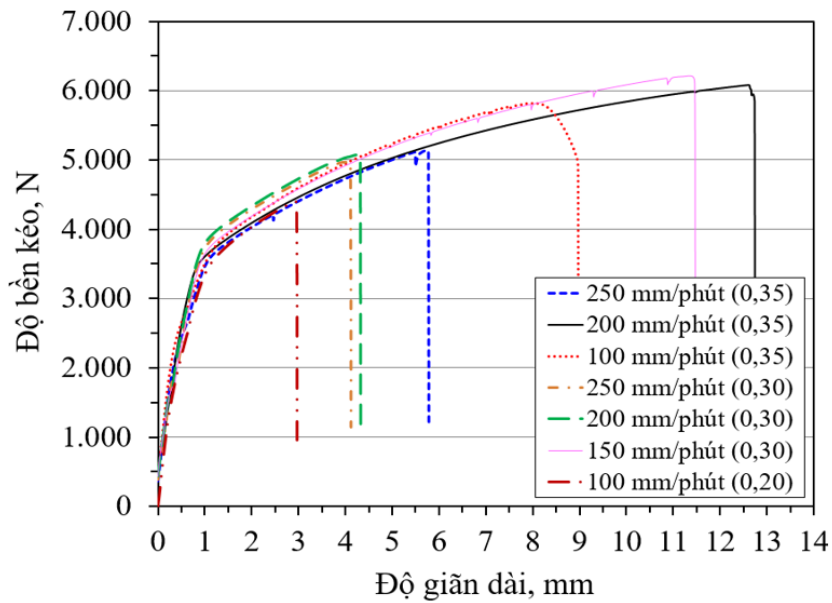


Hình 4.7. Ảnh hưởng vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt đến chiều dày lớp khuếch tán (tiếp theo)

Theo công trình của Xingbin H. và cộng sự (2024) nghiên cứu FSW giữa AA6061 và SUS316 đã công bố, nhiệt đầu vào cao dẫn đến chiều dày lớp IMC dày, giòn [33]. Đây có thể là nguyên nhân dẫn đến độ bền kéo mối hàn AA6061/SUS316 thấp tại vận tốc hàn 100 mm/phút và chiều sâu ép chốt 0,35 mm.

4.1.3. Độ bền kéo và ứng xử phá hủy mối hàn

Ảnh hưởng của thông số hàn đến đường cong chuyển vị được thể hiện trên Hình 4.8. Chuyển vị rất nhạy cảm với vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt. Bên cạnh đó, độ bền mối hàn AA6061/SUS316 lớn tương ứng với độ giãn dài và ngược lại. Độ bền mối hàn đạt giá trị cao nhất, chuyển vị mối hàn bắt đầu giảm dần đến khi bị đứt vùng HAZ bên AA6061 hoặc phá hủy tại mặt liên kết mối hàn. Độ bền mối hàn tương ứng với vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt khác nhau được thể hiện trong Bảng 4.2 và Hình 4.9. Vận tốc hàn thấp, độ bền mối hàn cao khi chiều sâu ép chốt 0,30 mm. Ngược lại, tại chiều sâu ép chốt 0,35 mm, mối hàn có độ bền cao hơn khi vận tốc hàn được tăng lên.



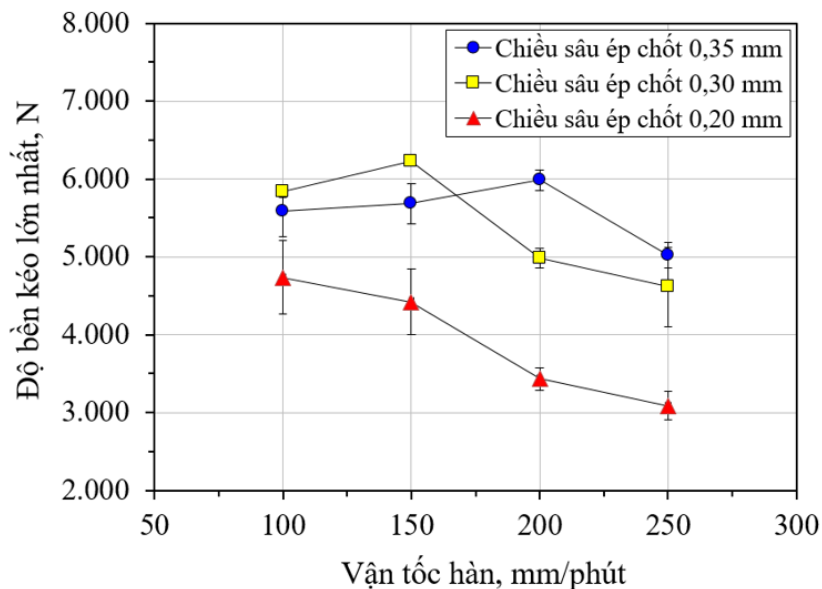
Hình 4.8. Ảnh hưởng vận tốc hàn, chiều sâu ép chốt đến đường cong chuyển vị

Độ bền kéo mối 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. Độ bền mối hàn được chế tạo bởi chiều sâu ép chốt 0,20 mm thấp ở mọi vận tốc hàn như trong Hình 4.6(c). Việc tăng chiều sâu ép chốt gây nên nhiệt đầu vào tăng, dẫn đến cấu trúc vi mô hạt kim loại thô hơn. Điều này, tương tự như kết quả trong công trình nghiên cứu mối hàn chồng FSW AA6061/AISI304 [34].

Bảng 4.2. Ảnh hưởng chiều sâu ép chốt và vận tốc hàn đến độ bền kéo mối hàn

Chiều sâu ép chốt (mm)	Vận tốc hàn (mm/phút)	Độ bền kéo lớn nhất (N)
0,20	100	4.732,96
	150	4.422,87
	200	3.430,58
	250	3.085,75
0,30	100	5.835,55
	150	6.231,48
	200	4.983,88
	250	4.612,11
0,35	100	5.589,86
	150	5.681,84
	200	5.987,41
	250	5.021,16

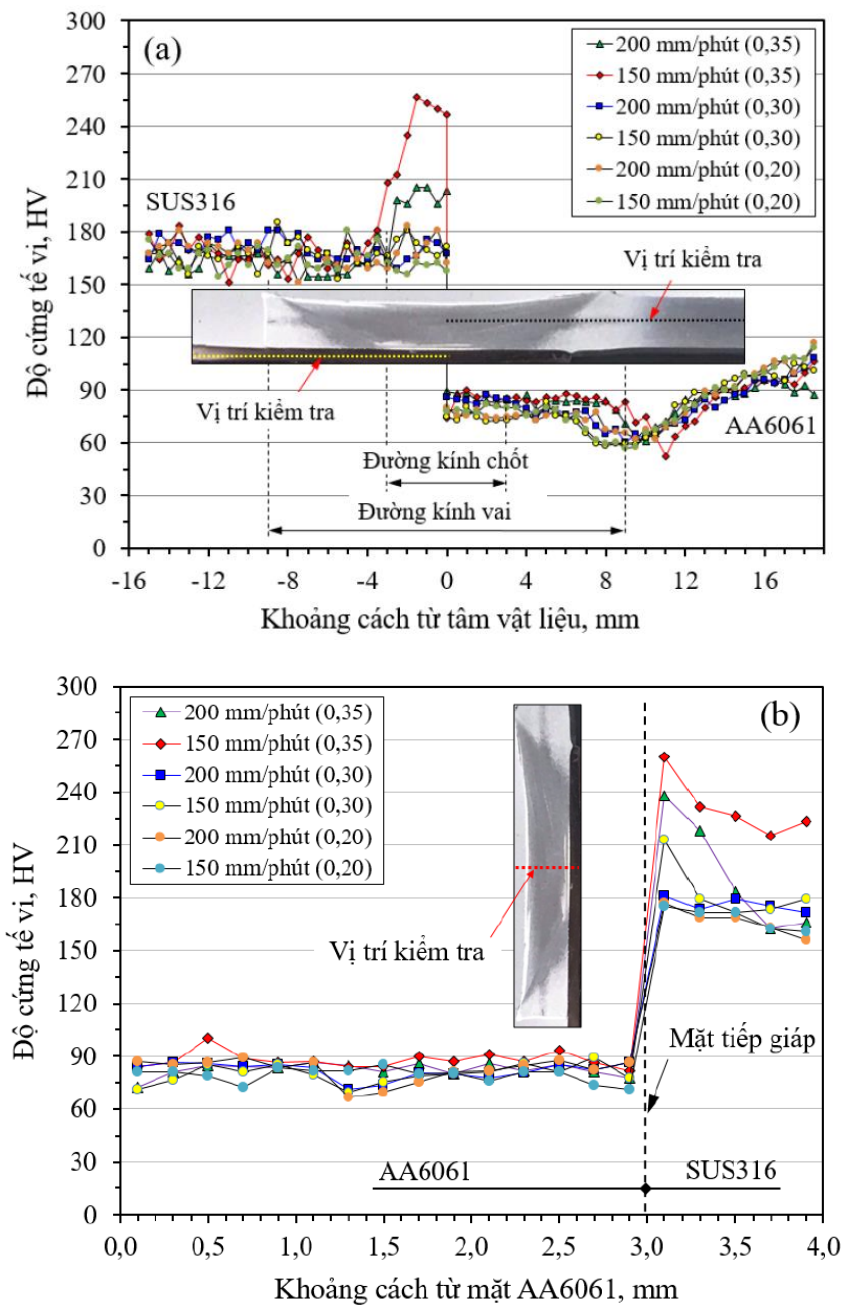
Ngoài ra, sử dụng chiều sâu ép chốt 0,30 mm sẽ tạo ra lớp IMC mỏng hơn so với chiều sâu ép chốt 0,35 mm. Có vẻ như chiều sâu ép chốt thấp không đủ để chốt hàn khuấy hiệu quả. Vì vậy, chiều dày lớp IMC thấp và xuất hiện một số khuyết tật không liên kết trên mặt tiếp giáp, Như thể hiện Hình 4.6 và Hình 4.7, chiều dày lớp IMC và lớp khuếch tán lớn tại chiều sâu ép chốt 0,35 mm, vận tốc hàn 100 mm/phút. Kết quả nghiên cứu FSW giữa AA6061 và SUS316 đã công bố, hình thành hợp chất $FeAl_3$ giòn của lớp IMC [33]. Vì vậy, độ bền kéo của mối hàn nhỏ. Khi tăng vận tốc hàn đã làm giảm đáng kể hoạt động khuấy của chốt, đặc biệt khi chiều sâu ép chốt thấp. Yếu tố này là nguyên nhân khiến độ bền kéo mối hàn thấp khi chiều sâu ép chốt nhỏ hơn 0,30 mm và vận tốc hàn lớn hơn 150 mm/phút. Những kết quả trên phản ánh rằng việc phân tích và áp dụng mối liên kết giữa vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt rất quan trọng trong việc cải thiện cơ tính mối hàn AA6061/SUS316.



Hình 4.9. Ảnh hưởng vận tốc hàn, chiều sâu ép chốt đến độ bền mối hàn

4.1.4. Phân bố độ cứng tế vi mối hàn

Mối quan hệ giữa chiều sâu ép chốt, vận tốc hàn và sự phân bố độ cứng tế vi mối hàn được mô tả trong Hình 4.10. Vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt không ảnh hưởng lớn đến độ cứng của tấm AA6061.



Hình 4.10. Độ cứng tế vi mối hàn AA6061/SUS316 dọc theo (a) mặt cắt ngang và (b) mặt cắt dọc tại vận tốc hàn và chiều sâu ép chót hàn khác nhau

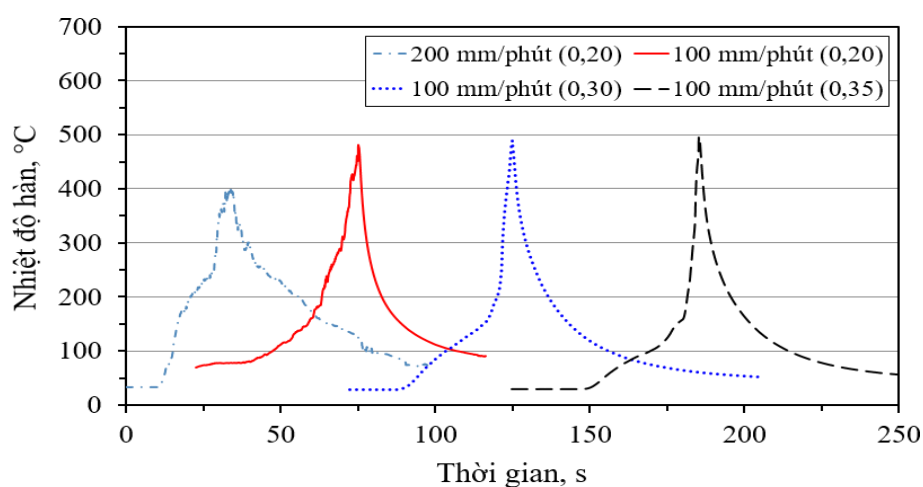
Tuy nhiên, giá trị độ cứng của SUS316 vùng SZ tăng nhanh chóng, do chót hàn khuấy mạnh. Độ cứng lớn nhất đạt giá trị 260 HV với chiều sâu ép chót 0,35 mm, vận tốc hàn 150 mm/phút. Giá trị độ cứng SUS316 tại SZ cao hơn là do cấu trúc hạt của lớp IMC nhỏ, mịn. Giá trị này tương đồng với công trình nghiên cứu của Mishra và cộng sự (2005), Coelho R.S và cộng sự (2012) [44, 138].

Sự phân bố độ cứng ở phía AA6061 bị ảnh hưởng cả vận tốc hàn và chiều sâu ép chót. Độ cứng của SUS316 gần mặt tiếp xúc tăng lên đáng kể, nguyên nhân do cấu trúc hạt bị biến dạng. Liu J. và cộng sự (2023) đã nghiên cứu cấu trúc vi mô và tính chất cơ

học mỗi hàn FSW giữa AA6061 với Q235 và ER4043 cho kết quả tương tự [135]. Mahto R.P. và cộng sự (2018) đã nghiên cứu cấu trúc vi mô mỗi hàn chồng FSW AA6061/AISI304 với kết quả cho rằng tất cả các vết nứt đều xảy ra ngoài vùng SZ, điều này có nghĩa độ bền vùng SZ tốt hơn do cấu trúc hạt nhỏ, mịn [34]. Supreeth G. và cộng sự (2022) nghiên cứu FSW giáp mí giữa SS 316 LN và N50 cho kết quả tương tự. Độ cứng vùng SZ tăng do kích thước hạt cấu trúc vi mô mịn, có khả năng chống lại độ sai lệch cao so với cấu trúc hạt thô [139]. Cấu trúc hạt vùng SZ của mỗi hàn AA6061/SUS316 nhỏ, tăng khả năng chống lệch vị trí so với cấu trúc hạt thô trong kim loại cơ bản của SUS316. Giá trị độ cứng AA6061 giảm tại vùng HAZ, nơi có cấu trúc hạt vi mô thô hơn. Điều này đã công bố trong nghiên cứu FSW AA6061 [140].

4.1.5. Nhiệt độ vùng hàn

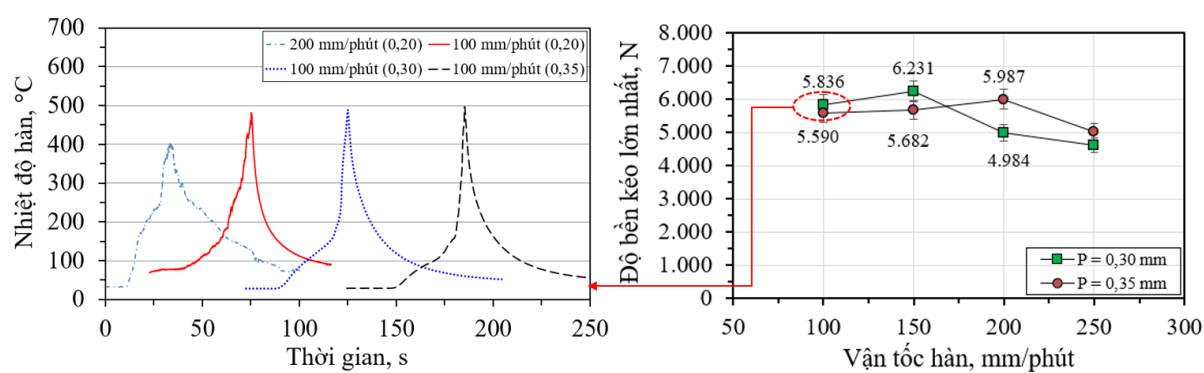
Tại vận tốc hàn 100 mm/phút, chiều sâu ép chốt thay đổi từ 0,20 mm đến 0,35 mm không ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ hàn. Như thể hiện Hình 4.11, nhiệt độ hàn tăng không nhiều (khoảng 20 °C) khi chiều sâu ép chốt tăng từ 0,20 mm lên 0,35 mm. Vận tốc hàn ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ hàn.



Hình 4.11. Ảnh hưởng vận tốc hàn, chiều sâu ép chốt đến nhiệt độ hàn

Nhiệt độ cao nhất của mỗi hàn giảm khoảng 80 °C khi vận tốc hàn tăng từ 100 mm/phút lên 200 mm/phút tại chiều sâu ép chốt là 0,20 mm. Một phát hiện tương tự đã được Mahto và cộng sự (2018) báo cáo trong quá trình FSW giữa AA6061 và AISI304 [34]. 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.

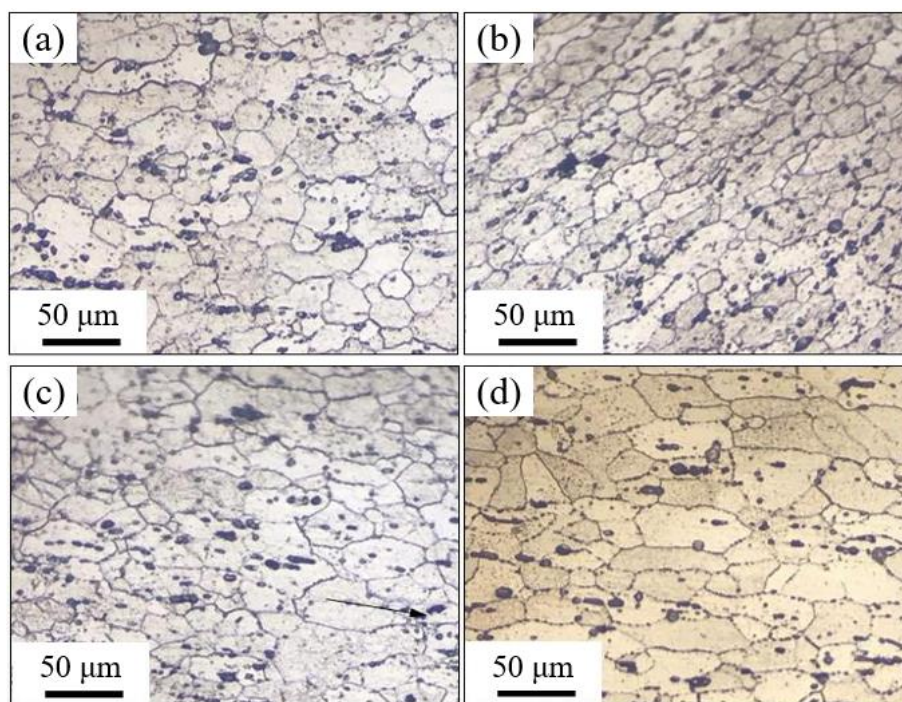
Nhiệt đầu vào ảnh hưởng đến sự hình thành lớp IMC giữa AA6061 và SUS316. Khi vận tốc hàn giảm, hoạt động khuấy của chót hàn cao, thời gian tiếp xúc giữa chót và phôi lớn nên nhiệt độ sinh ra bởi ma sát tăng trong quá trình hàn FSW. Ngược lại, khi tăng vận tốc hàn thì hoạt động khuấy của chót hàn thấp dẫn đến nhiệt độ hàn giảm. Trong khi đó, việc tăng chiều sâu ép chót nhỏ nên diện tích tiếp xúc của vai dụng cụ và phôi tăng không đáng kể. Do đó, nhiệt độ thay đổi không nhiều so với vận tốc hàn. Cơ tính của mối hàn bị ảnh hưởng trực tiếp bởi nhiệt độ hàn, tác động đến cấu trúc tế vi và ứng suất dư. Nhiệt độ đầu vào tại vận tốc hàn 100 mm/phút, chiều sâu ép chót 0,30 mm nhỏ hơn không đáng kể so với chiều sâu ép chót 0,35 mm. Với thông số công nghệ này hình thành kích thước hạt mịn nên độ bền mối hàn lớn hơn (Hình 4.12, Hình 4.14).



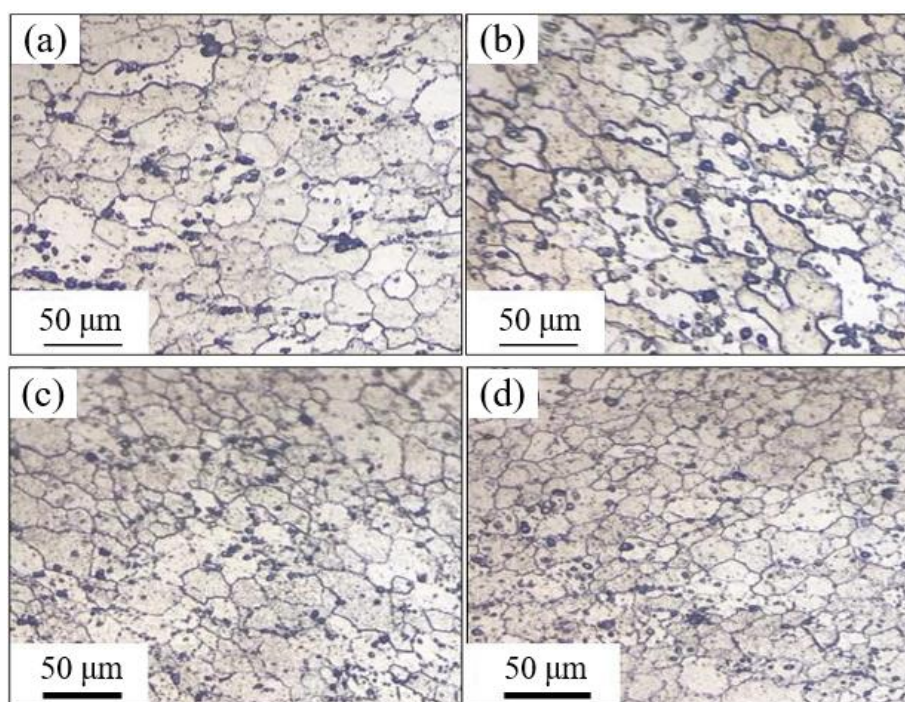
Hình 4.12. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến độ bền mối hàn tại vận tốc 100 mm/phút

Hơn nữa, do sự khác biệt trong việc phân bố nhiệt độ hàn và hoạt động khuấy của dụng cụ, sự phát triển hạt trong và xung quanh vùng hàn không đồng nhất. Heidarzadeh A. và cộng sự (2021), Meng X. và cộng sự (2021) cho kết quả tương đồng khi nghiên cứu sự hình thành và phát triển cấu trúc vi mô của FSW giữa thép và hợp kim nhôm [92, 141]. Kích thước hạt nhỏ nhất do chót hàn khuấy mạnh tại vùng SZ được thể hiện trong Hình 4.13(a). Ngược lại, kích thước hạt trong vùng HAZ thô hơn như Hình 4.13(c). Trong khi đó, hạt bị kéo dài do nhiệt độ lan rộng trong vùng TMAZ (Hình 4.13(b)).

Với vận tốc hàn 100 mm/phút và chiều sâu ép chót hàn 0,35 mm kích thước hạt thô tại vùng HAZ của AA6061 có thể làm giảm độ bền vùng này của mối hàn. Kích thước hạt của FSW AA6061/AISI304 thô nên các vết nứt đều xảy ra vùng HAZ [26, 34]. Như Hình 4.14, trên cấu trúc tế vi của mối hàn, thay đổi kích thước hạt ở các vùng hàn do vận tốc hàn tăng.



Hình 4.13. Cấu trúc vi mô theo mặt cắt ngang của mẫu tại vận tốc hàn 100 mm/phút và chiều sâu ép chốt 0,35 mm: (a) SZ, (b) TMAZ, (c) HAZ và (d) BM AA6061



Hình 4.14. Kích thước hạt khác nhau tại chiều sâu ép chốt 0,35 mm và vận tốc hàn (a) 100 mm/phút, (b) 150 mm/phút, (c) 200 mm/phút và (d) 250 mm/phút

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

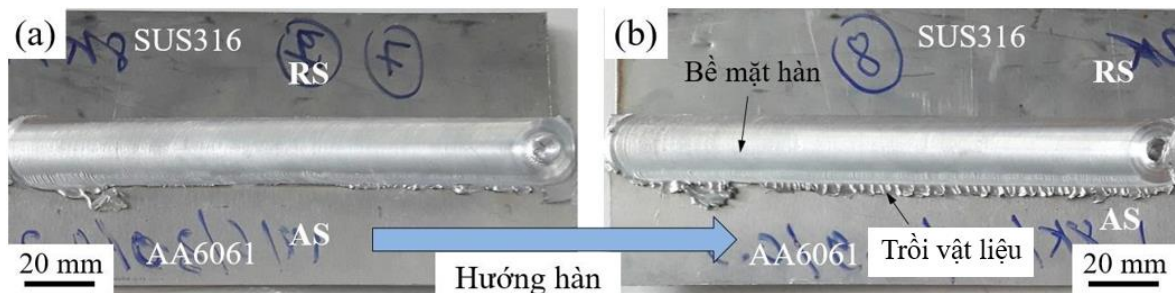
Mối hàn được chế tạo với vận tốc hàn từ 50 mm/phút đến 200 mm/phút, tốc độ quay dụng cụ hàn thay đổi từ 600 vòng/phút đến 900 vòng/phút. Chiều sâu ép chốt 0,30 mm, chiều dài chốt hàn 2,9 mm không đổi trong quá trình hàn FSW.

Bảng 4.3. Các thông số khác nhau để chế tạo mối hàn AA6061/SUS316 nhằm khảo sát ảnh hưởng của vận tốc hàn và tốc độ quay đến đặc tính mối 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)
600, 700, 800, 900	50, 75, 100, 150, 200	0,30	2,9

4.2.1. Bề mặt mối hàn

Bề mặt đại diện của các mối hàn AA6061/SUS316 được chế tạo bởi vận tốc hàn 200 mm/phút và 50 mm/phút, tốc độ quay 800 vòng/phút được thể hiện tương ứng trong Hình 4.15(a, b). Chiều sâu ép chốt 0,30 mm và chiều dài chốt hàn 2,9 mm là hằng số không đổi trong quá trình FSW. Bề mặt hàn nhẵn không có khuyết tật như: rãnh hoặc vết nứt. Mối hàn bị trôi vật liệu được hình thành đáng kể ở vận tốc hàn thấp 50 mm/phút. Như thể hiện trong Hình 4.17, nhiệt độ hàn cao tương ứng với vận tốc hàn thấp có thể là lý do hình thành loại khuyết tật này. Nội dung này tương đồng so với công trình nghiên cứu của Chao Y.J. và cộng sự (2003) [91].



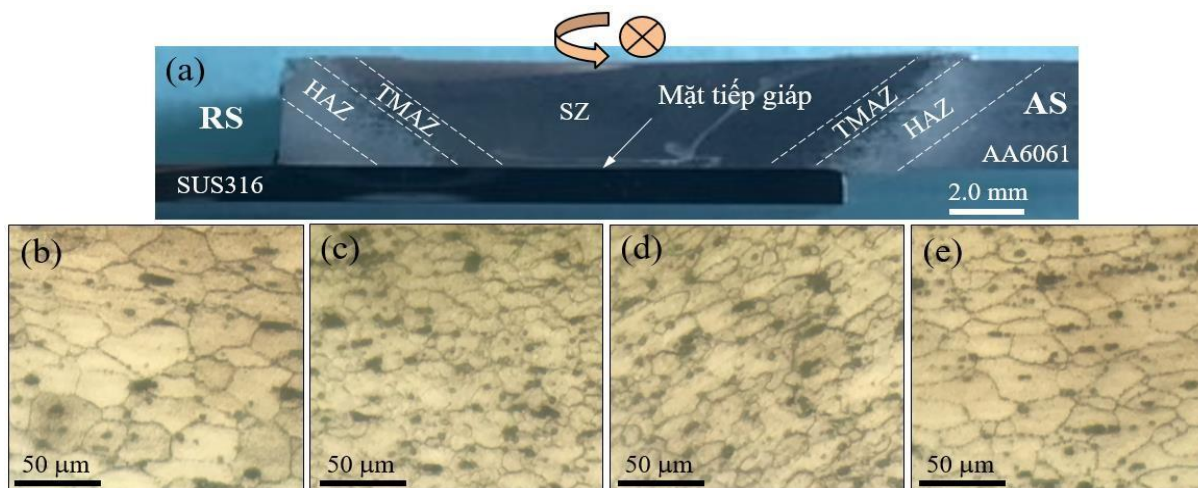
Hình 4.15. Bề mặt đại diện mối hàn AA6061/SUS316 được chế tạo ra bởi vận tốc hàn khác nhau (a) 200 mm/phút và (b) 50 mm/phút

4.2.2. Mặt cắt ngang mối hàn

Cấu trúc mặt cắt ngang tiêu biểu của mối hàn được chế tạo với vận tốc hàn 50 mm/phút được hiển thị trong Hình 4.16(a). Bề mặt hàn dễ dàng quan sát được do các tính chất khác nhau của hai hợp kim. Ba vùng hàn được tìm thấy gồm vùng SZ, vùng TMAZ và vùng HAZ. Các hạt kim loại trong cấu trúc tế vi các vùng hàn theo mặt cắt ngang được trình bày trong Hình 4.16(b - e).

Do sự khác biệt về nhiệt độ hàn (Hình 4.17) và vật liệu hàn được khuấy trộn, sự phát triển hạt của các vùng hàn này không đồng nhất, như đã báo cáo trong các công trình nghiên cứu [92, 141]. Với tác động mạnh nhất của chốt hàn, kích thước hạt nhỏ nhất tại vùng SZ (Hình 4.16(c)).

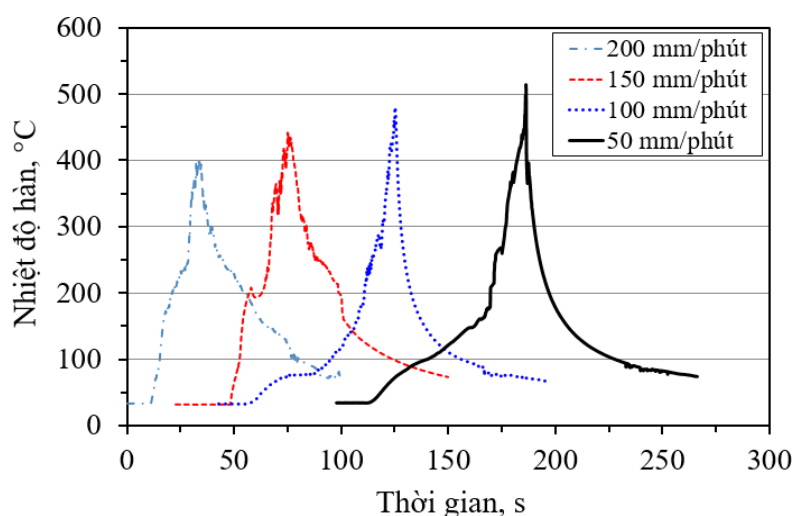
Ngược lại, vùng HAZ chỉ bị ảnh hưởng nhiệt khi hàn, sự phát triển của kích thước hạt lớn như Hình 4.16(b). Kích thước hạt tăng từ vùng SZ đến vùng HAZ với việc giảm khuấy của chót hàn. Kích thước hạt thô tại vùng HAZ có thể làm suy giảm độ bền vùng này, như được tìm thấy trong nghiên cứu FSW giữa AA6061 và AISI304 [26, 34].



Hình 4.16. Mặt cắt tổng quan mối hàn được chế tạo bởi vận tốc hàn 50 mm/phút và cấu trúc vi mô các vùng hàn (b) HAZ, (c) SZ, (d) TMAZ, và (e) BM AA6061

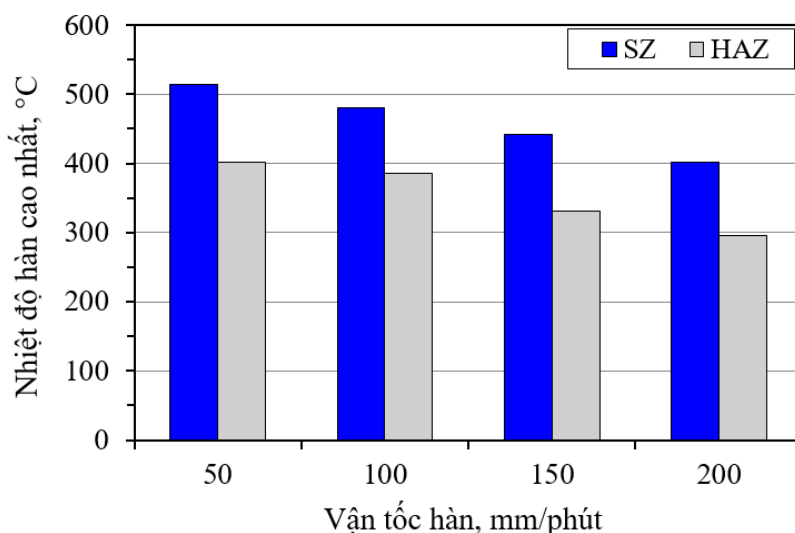
4.2.3. Nhiệt độ vùng hàn

Sự thay đổi nhiệt độ hàn tại vùng SZ được tạo ra bởi vận tốc hàn khác nhau được ghi lại trong Hình 4.17. Vận tốc hàn ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng quá trình hàn nhiệt. Ở đây, vận tốc hàn tăng làm giảm nhiệt độ hàn cả vùng HAZ và vùng SZ, như được mô tả trong Hình 4.18. Nhiệt độ cao nhất là 515 °C đạt được ở tốc độ hàn 50 mm/phút. Nhiệt độ này giảm xuống còn khoảng 400 °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.



Hình 4.17. Nhiệt độ hàn tại SZ được chế tạo bởi các vận tốc hàn khác nhau

Kết quả này có thể ảnh hưởng đến sự phát triển cấu trúc vi mô và độ bền cơ học của mối hàn sẽ được thảo luận trong phần tiếp theo.

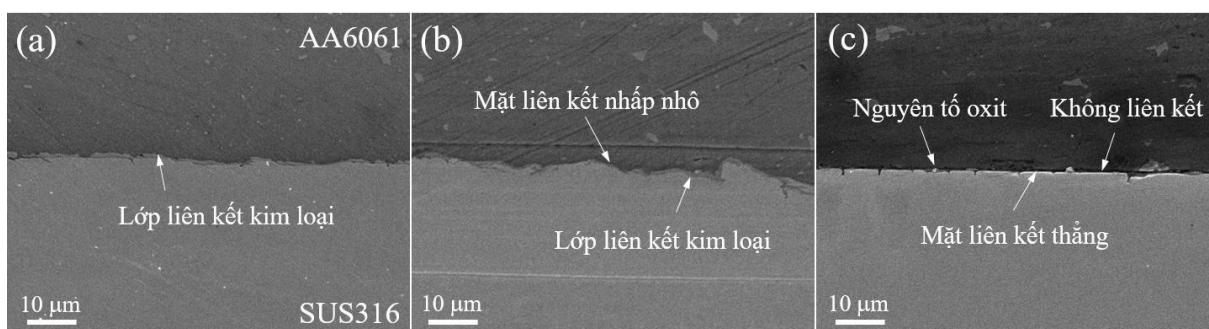


Hình 4.18. Nhiệt độ hàn cao nhất tại SZ và HAZ được chế tạo bởi các vận tốc hàn khác nhau

4.2.4. Đặc tính bề mặt liên kết mối hàn

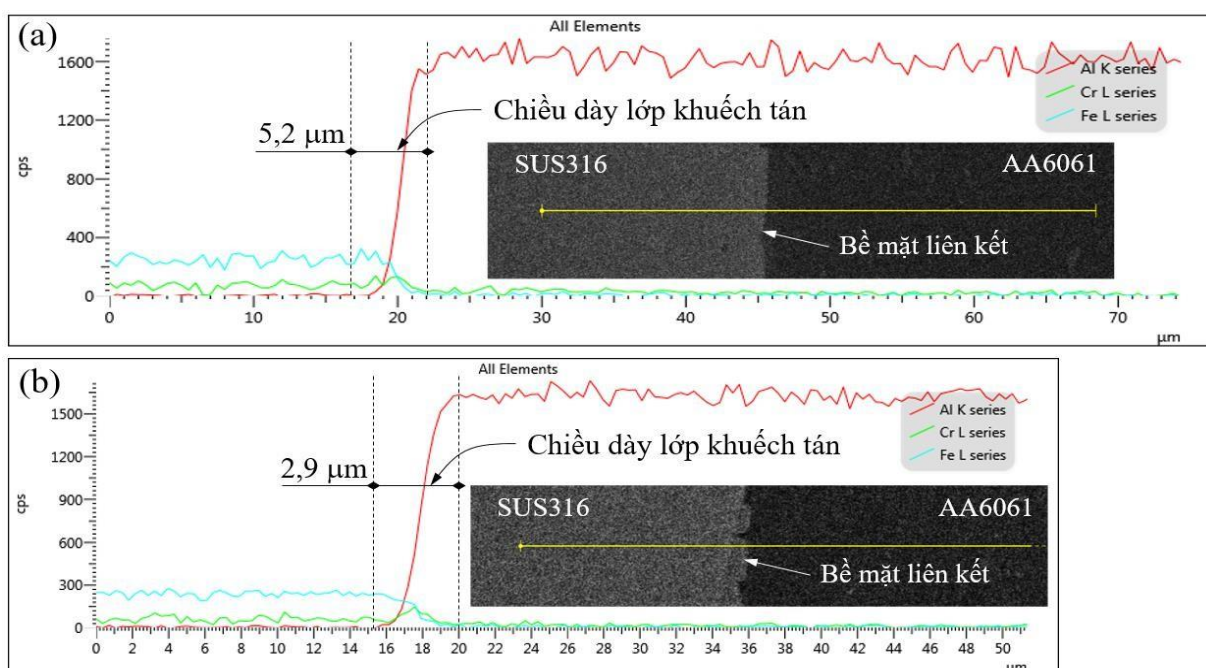
Hình thái bề mặt liên kết được chế tạo bởi các vận tốc hàn khác nhau được mô tả trong Hình 4.19. Màu tối hiển thị tấm AA6061, màu sáng là tấm SUS316. Nhìn chung, dạng hình học của mặt liên kết kim loại nhạy cảm với vận tốc hàn. Mặt liên kết nhấp nhô tại vận tốc hàn thấp như Hình 4.19(a, b). Khi vận tốc hàn tăng sẽ dẫn đến giao diện liên kết giữa AA6061 và SUS316 theo đường thẳng, như được quan sát trong Hình 4.19(c). Kết quả này có thể liên quan đến biến dạng dẻo kim loại bị ảnh hưởng bởi vận tốc hàn. Điều này được Shen Z. và cộng sự (2015) công bố trên mối hàn chồng FSW giữa AA5754 và DP600 [102]. Như được trình bày trong Hình 4.19(b), nhiệt độ hàn cao ở vận tốc hàn thấp làm tăng biến dạng dẻo kim loại hàn, hình thành lớp IMC nhấp nhô.

Như Hình 4.19(a, b) thể hiện, lớp IMC dường như được hình thành ở vận tốc hàn thấp. Sự hình thành lớp IMC tại mặt tiếp giáp có thể được tạo ra do cả nhiệt ma sát và tác động khuấy kim loại của chổi hàn, tương đồng với kết quả các công trình đã công bố [34, 49]. Điều này có thể giải thích cho việc giảm chiều dày lớp IMC do tăng vận tốc hàn, được trình bày trong Hình 4.22. Sự phân bố lớp IMC dọc theo mặt tiếp giáp không đồng nhất. Hơn nữa, lớp IMC không được phát hiện tại vận tốc hàn 200 mm/phút. Như quan sát trong Hình 4.19(c), một đường nứt dọc theo mặt tiếp giáp chỉ ra AA6061 không liên kết với SUS316. Có vẻ như lớp oxit đã ngăn cản quá trình liên kết này.

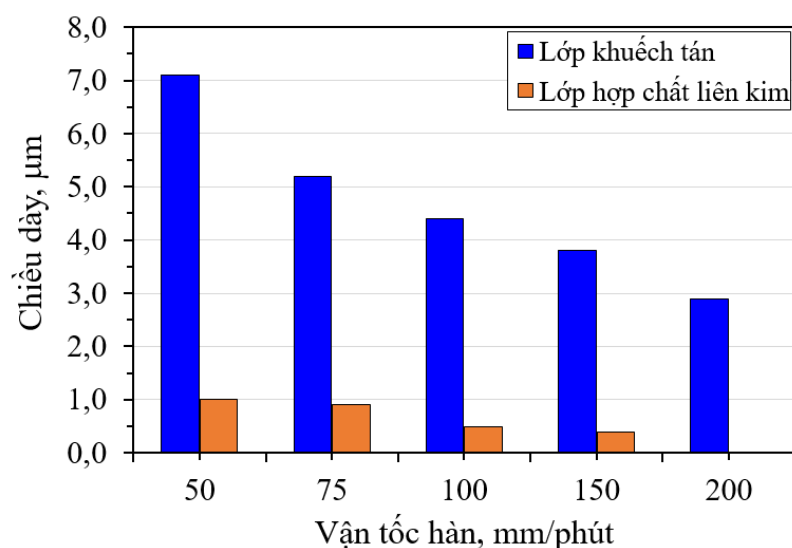


Hình 4.19. Ảnh SEM của liên kết giữa AA6061 và SUS316 được chế tạo bởi các vận tốc hàn khác nhau (a) 50 mm/phút, (b) 100 mm/phút và (c) 200 mm/phút

Chiều dày lớp khuếch tán và lớp IMC đại diện của mặt liên kết được thực hiện bởi vận tốc hàn khác nhau được trình bày trong Hình 4.21. Chúng cho thấy sự thay đổi đột ngột về khối lượng các nguyên tố Fe, Cr và Al tại mặt liên kết mỗi hàn. Chiều dày của lớp khuếch tán tại vận tốc hàn 75 mm/phút khoảng 5,2 μm như Hình 4.20(a). Giá trị này khoảng 2,9 μm ở vận tốc hàn 200 mm/phút (Hình 4.20(b)). Rõ ràng chiều dày lớp khuếch tán nhạy cảm với vận tốc hàn. Ở đây, vận tốc hàn tăng dẫn đến giảm chiều dày lớp khuếch tán. Kết quả có thể liên quan đến nhiệt đầu vào được tạo ra bởi vận tốc hàn. Kết quả tương đồng với nghiên cứu cấu trúc lớp IMC mối hàn FSW giữa thép và nhôm của Bouché K. và cộng sự (1998), Bouayad A. và cộng sự (2003) [142, 143]. Những kết quả trên có thể ảnh hưởng đến cơ tính mối hàn chồng FSW AA6061/SUS316.

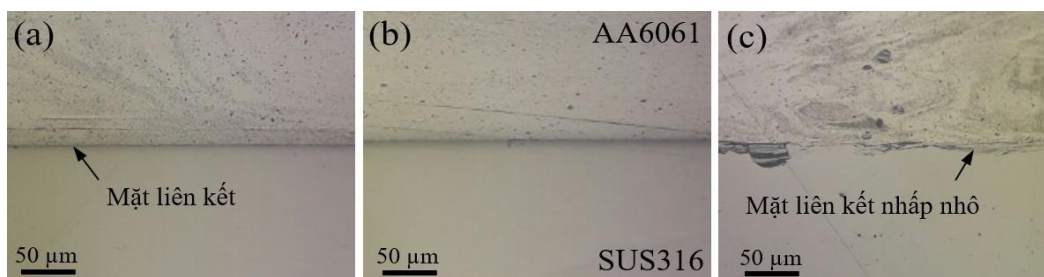


Hình 4.20. Biểu đồ phân bố nguyên tố phân tích chiều dày lớp khuếch tán được chế tạo tại vận tốc hàn (a) 75 mm/phút và (b) 200 mm/phút



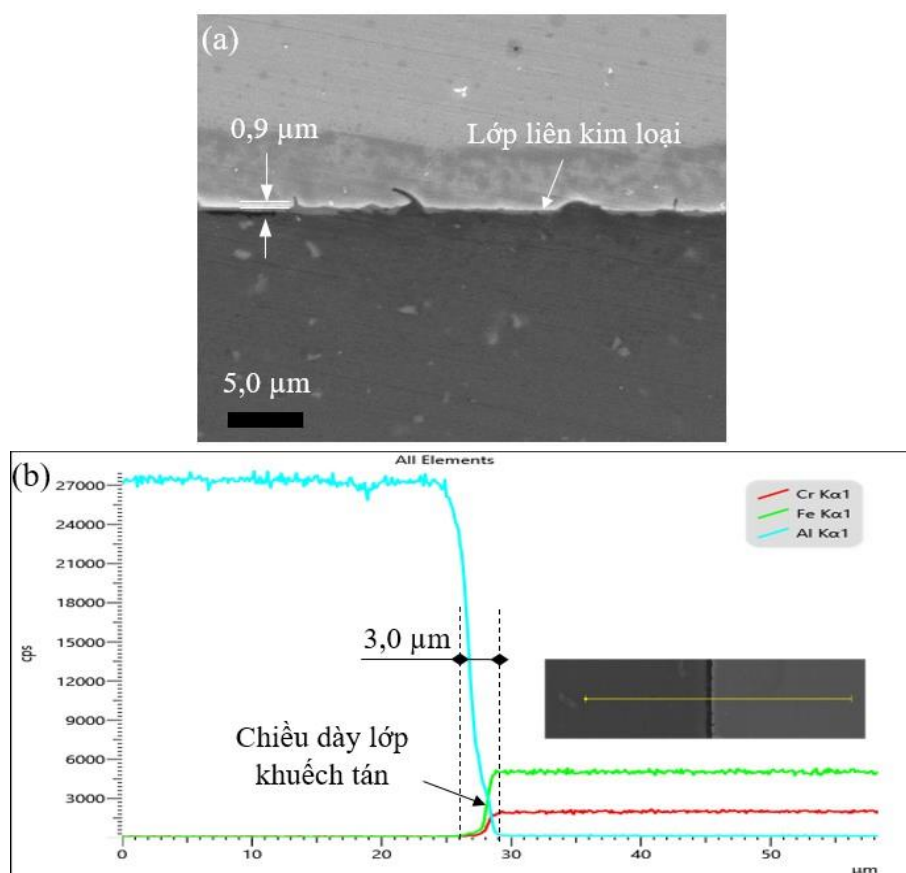
Hình 4.21. Chiều dày lớp khuếch tán, lớp IMC bị ảnh hưởng bởi vận tốc hàn

Hình ảnh kính hiển vi mặt tiếp giáp mỗi hàn với tốc độ quay khác nhau được thể hiện Hình 4.22. Vận tốc hàn 200 mm/phút, chiều sâu ép chốt 0,30 mm, chiều dài chốt hàn 2,9 mm là hằng số không đổi. Mặt tiếp giáp là đường thẳng, không nhấp nhô ở tốc độ quay 600 vòng/phút và 800 vòng/phút như Hình 4.22(a, b). Hình 4.22(c) cho thấy mặt tiếp giáp nhấp nhô tại tốc độ quay 900 vòng/phút. Bề mặt tiếp giáp liên kết tốt với số lượng lớn các nguyên tố SUS316 hòa trộn vào AA6061. Dụng cụ hàn khuấy mạnh do tốc độ quay cao dẫn đến những kết quả này. Nội dung tương đồng công trình đã nghiên cứu và công bố kết quả [37].



Hình 4.22. Hình ảnh kính hiển vi bề mặt tiếp giáp tại tốc độ quay (a) 600 vòng/phút, (b) 800 vòng/phút và (c) 900 vòng/phút

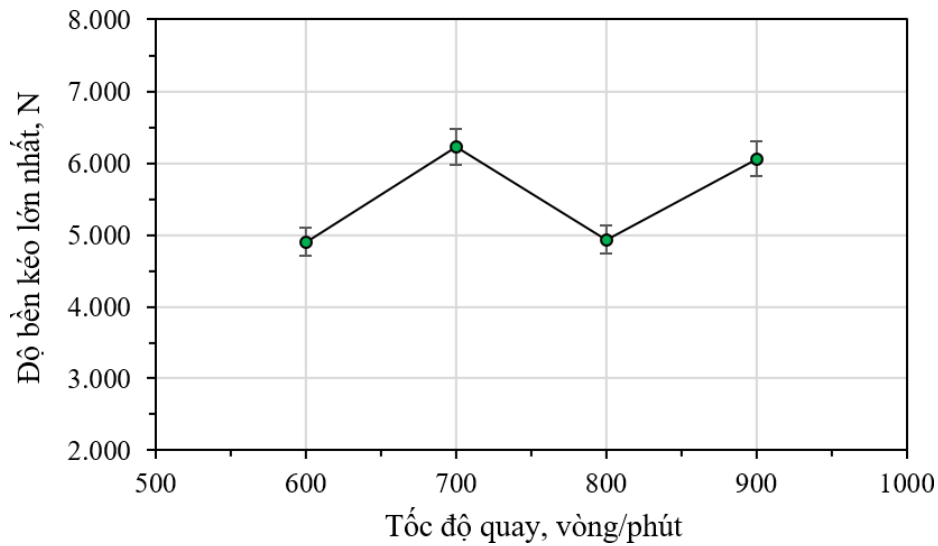
Hình SEM của mặt liên kết mối hàn ở tốc độ quay 800 vòng/phút và chiều dày của lớp khuếch tán đo bằng phổ tán xạ năng lượng tia X như Hình 4.23(a, b).



Hình 4.23. (a) Hình SEM mặt liên kết mối hàn và (b) biểu đồ phân bố nguyên tố phân tích độ dày lớp khuếch tán mối hàn được tạo ra ở tốc độ quay 800 vòng/phút

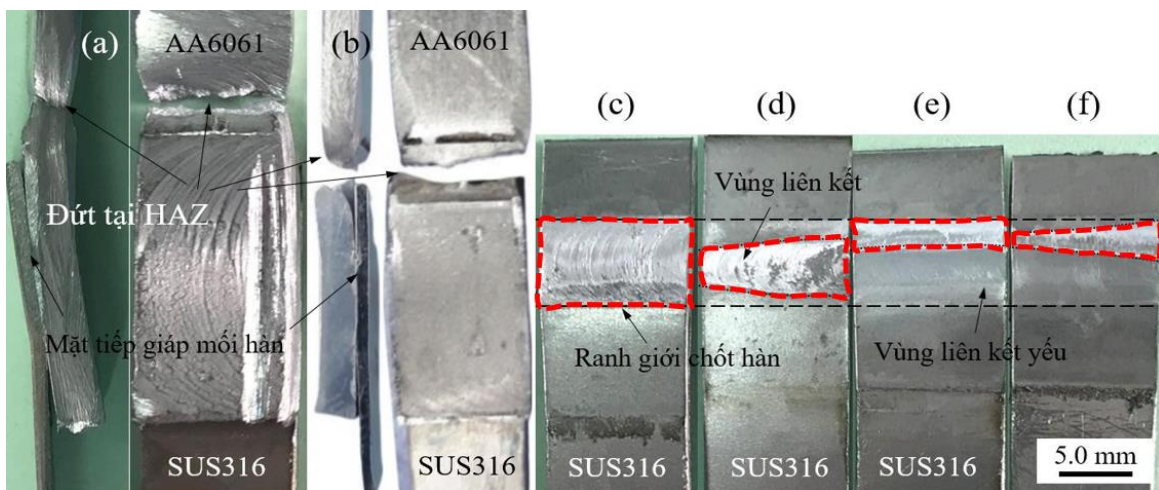
Lớp IMC hình thành dọc theo mặt tiếp giáp nhưng sự phân bố và chiều dày không đồng đều. Độ dày lớn nhất của lớp IMC khoảng 0,9 μm . Việc tăng nhiệt ma sát khi tăng tốc độ quay sẽ làm tăng chiều dày lớp IMC, như đã công bố trong các nghiên cứu [26, 134]. Chiều dày lớp khuếch tán cao hơn khoảng 3 lần so với chiều dày lớp hợp chất liên kim. Điều này tương đồng với các tác giả đã nghiên cứu và công bố kết quả [42, 135].

Độ bền kéo lớn nhất của mối hàn tại tốc độ quay khác nhau được thể hiện trong Hình 4.24. Mối hàn có độ bền cao nhất xấp xỉ 6.228 N tại tốc độ quay 700 vòng/phút, vận tốc hàn 200 mm/phút, chiều sâu ép chốt 0,30 mm và chiều dài chốt hàn 2,9 mm. Khi tốc độ quay tăng đến 900 vòng/phút, độ bền mối hàn giảm, đạt giá trị khoảng 6.055 N. Độ bền kéo mối hàn không chỉ bị ảnh hưởng bởi các đặc tính của lớp IMC [26, 34] mà còn bởi hiệu quả khuấy của chốt hàn. Để làm sáng tỏ đặc tính chịu kéo của các mối hàn, vị trí đứt và bề mặt phá hủy mối hàn được hiển thị trong Hình 4.25.



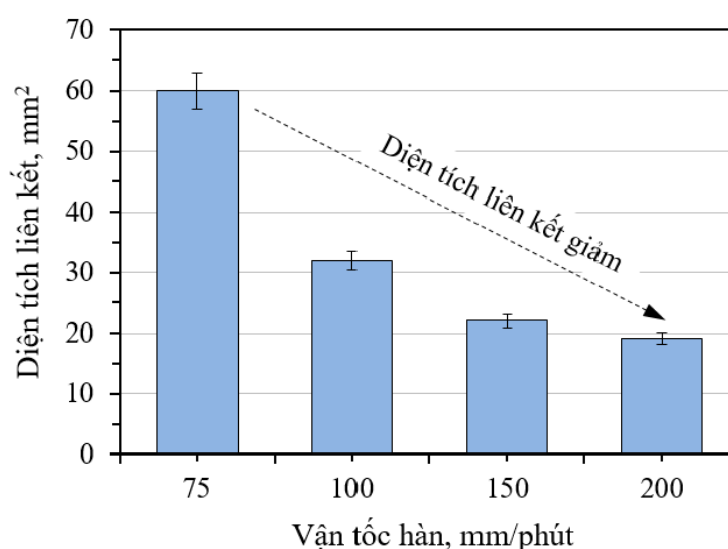
Hình 4.24. Độ bền kéo lớn nhất của mối hàn tại tốc độ quay khác nhau

Hai chế độ phá hủy đã được tìm thấy trong thử nghiệm này. Đầu tiên, vị trí đứt của các mẫu thử diễn ra tại vùng HAZ bên tấm AA6061 với vận tốc hàn 50 mm/phút, tốc độ quay 800 vòng/phút và chiều sâu ép chốt 0,20 mm như Hình 4.25(a). Vận tốc hàn, chiều sâu ép chốt tăng tương ứng 200 mm/phút và 0,30 mm, mối hàn cũng đứt vùng HAZ bên tấm AA6061 khi tốc độ quay giảm còn 700 vòng/phút (Hình 4.25(b)). Chế độ phá hủy thứ hai được phát hiện tại mặt liên kết giữa AA6061 và SUS316 tại tốc độ quay 800 vòng/phút, chiều sâu ép chốt 0,20 mm và các vận tốc hàn thay đổi từ 75 mm/phút đến 200 mm/phút (Hình 4.25(c - f)). Giảm vận tốc hàn và tăng chiều sâu ép chốt hữu ích cho việc trộn hai hợp kim nhưng nó làm thô kích thước hạt do nhiệt đầu vào cao. Kết quả là vị trí gãy được tìm thấy tại HAZ bên AA6061 mà không bị phá hủy tại mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 (Hình 4.25(a, b)) [50].



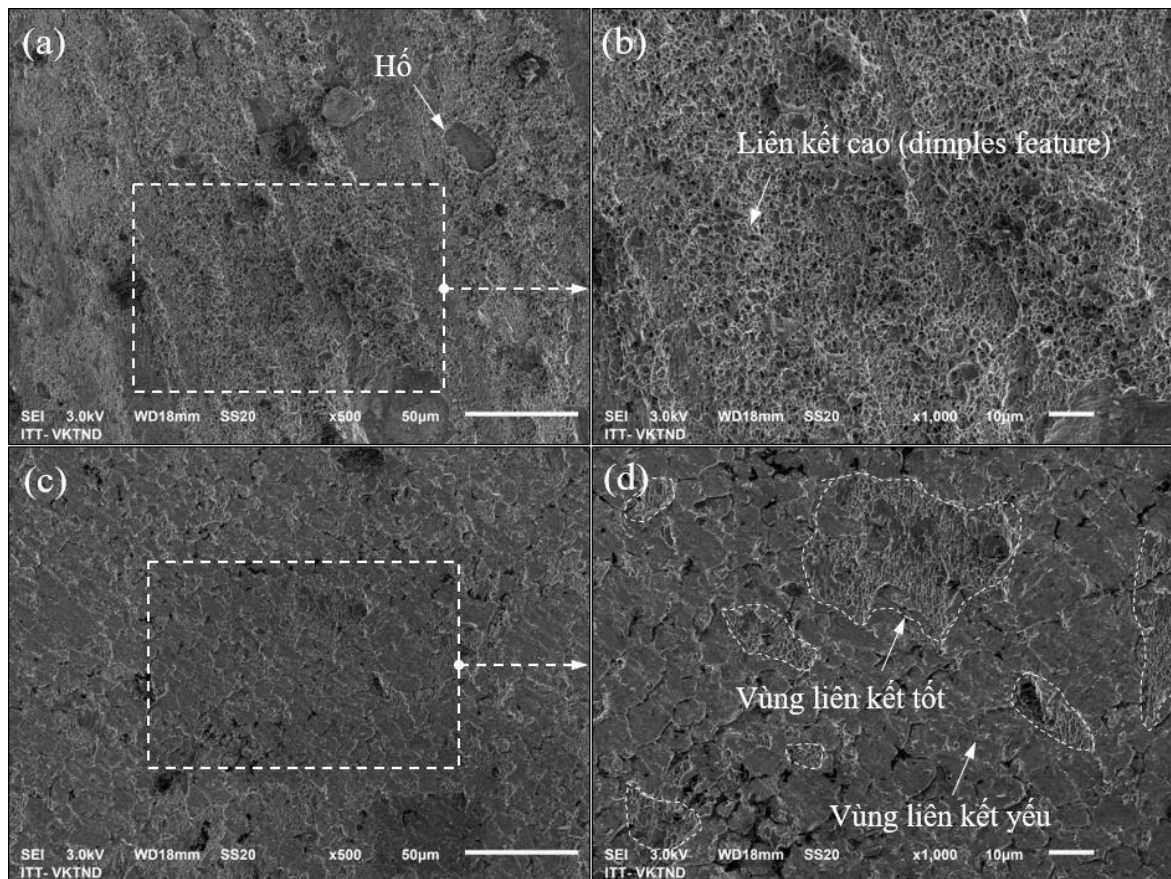
Hình 4.25. Vị trí đứt và bề mặt phá hủy tại vận tốc hàn, tốc độ quay và chiều sâu ép chốt khác nhau

Khu vực màu bạc cho thấy AA6061 liên kết tốt với SUS316. Diện tích liên kết giữa AA6061 và SUS316 thay đổi khi vận tốc hàn thay đổi. Diện tích liên kết cao nhất 60 mm² ở vận tốc hàn 75 mm/phút, tốc độ quay 800 vòng/phút và chiều sâu ép chót 0,20 mm như Hình 4.26(a). Diện tích liên kết giảm mạnh khi tăng vận tốc hàn từ 75 mm/phút lên 200 mm/phút. Như Hình 4.19(c), sự hiện diện của lớp oxit ngăn cản khuếch tán các nguyên tố của hai hợp kim hàn, có thể là lý do chính làm suy giảm độ bền mối hàn.



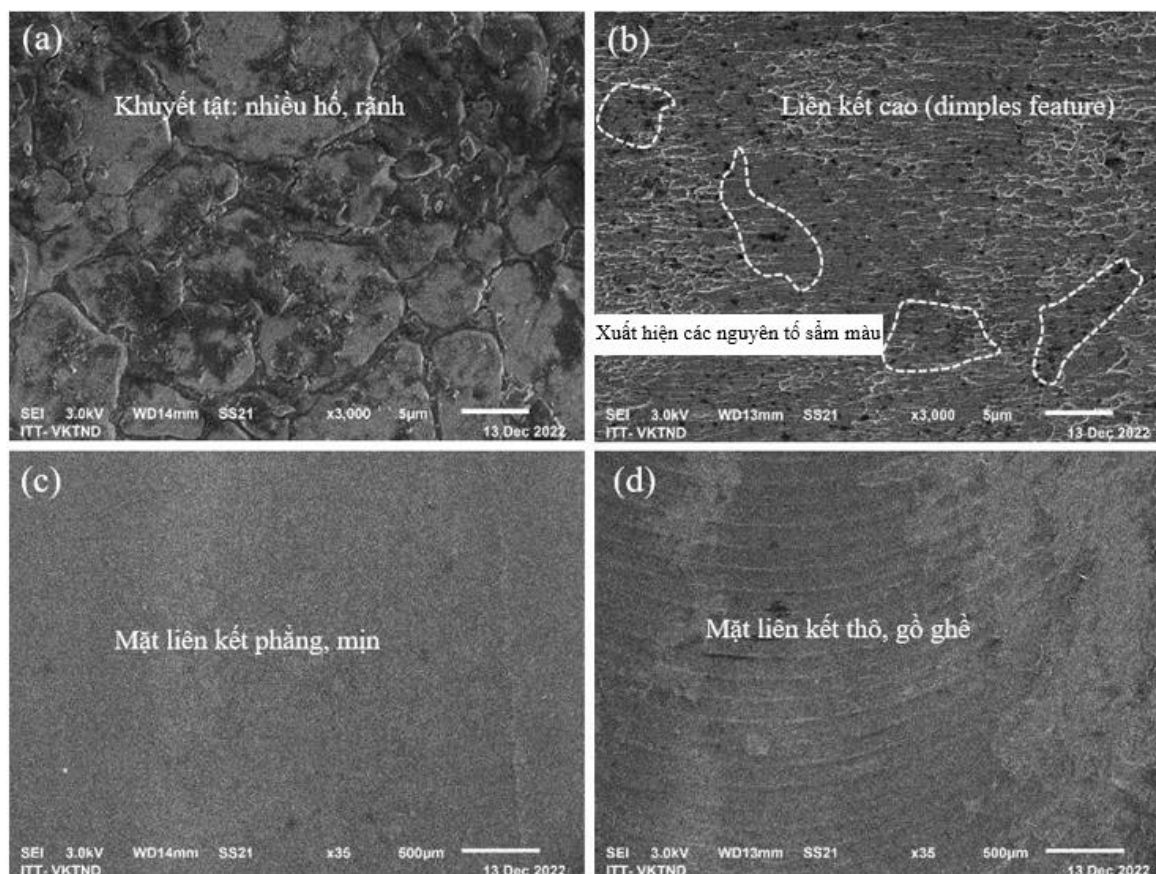
Hình 4.26. Diện tích liên kết tại mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 tại (a) vận tốc hàn và (b) tốc độ quay khác nhau

Hình SEM đại diện của bề mặt phá hủy mối hàn được thể hiện trong Hình 4.27. Sự khác biệt đáng kể khi mối hàn được chế tạo tại vận tốc hàn 75 mm/phút (Hình 4.27(a)) và vận tốc hàn 150 mm/phút (Hình 4.27(c)) bị phá hủy. Quan sát trong Hình 4.27(a), một số hố, rãnh được tìm thấy trên mặt tiếp giáp, nơi AA6061 không bám trên SUS316. Trong Hình 4.27(b), số lượng lớn các vết lõm được tìm thấy tại vận tốc hàn 75 mm/phút cho thấy AA6061 liên kết tốt với SUS316 và mẫu thử không có độ dẻo. Ngược lại, bề mặt phá hủy mịn hơn ở vận tốc hàn 150 mm/phút. Điều này có nghĩa là AA6061 liên kết yếu với SUS316. Như được thể hiện trong Hình 4.27(d), một số lớp lõm mỏng cho thấy một số lượng nhỏ các hạt AA6061 bám trên SUS316, dẫn đến giảm độ bền của liên kết tại mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316.



Hình 4.27. Hình SEM bề mặt phá hủy mối hàn AA6061/SUS316 tại vận tốc hàn khác nhau (a, b) 75 mm/phút và (c, d) 150 mm/phút

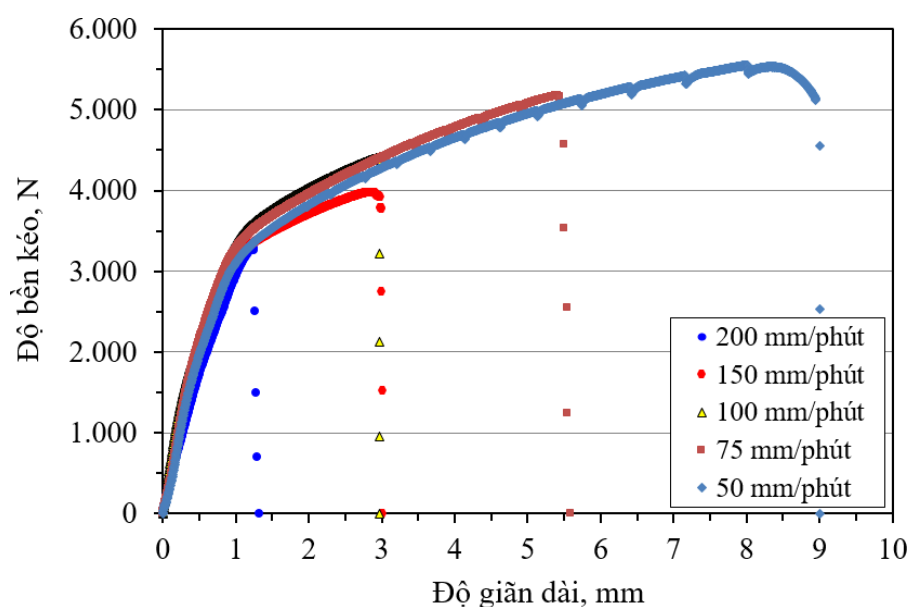
Hình 4.28 thể hiện liên kết hai hợp kim mối hàn tại tốc độ quay khác nhau. Mặt liên kết nhẵn mịn, nhiều hố, rãnh nên hai hợp kim liên kết không đều tại tốc độ quay 600 vòng/phút như Hình 4.28(a, c). Điều này cho thấy hiệu quả khuấy của chốt hàn thấp. Ngược lại, số lượng lớn vết lõm, mặt liên kết gồ ghề như Hình 4.28(b, d) được tìm thấy trên mặt phá hủy của SUS316 tại tốc độ quay 900 vòng/phút, nghĩa là hoạt động khuấy của chốt hàn tốt hơn ở tốc độ quay 600 vòng/phút. Tuy nhiên, khi tốc độ quay tăng có thể xuất hiện các nguyên tố oxit tại mặt tiếp giáp mối hàn nên độ bền kéo mối hàn giảm so với tại tốc độ quay 700 vòng/phút như Hình 4.24.



Hình 4.28. Hình SEM bề mặt phá hủy được tạo ra bởi tốc độ quay khác nhau (a, c) 600 vòng/phút và (b, d) 900 vòng/phút

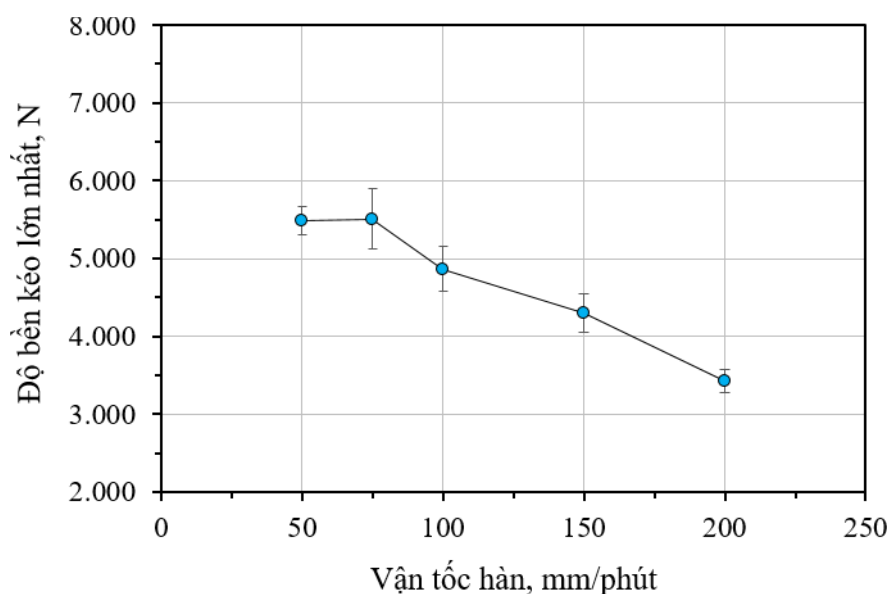
4.2.5. Độ bền kéo và ứng xử phá hủy mối hàn mối hàn

Đường cong ứng suất - biến dạng các mối hàn được chế tạo bởi vận tốc hàn khác nhau thể hiện trong Hình 4.29.



Hình 4.29. Đường cong ứng suất - biến dạng mối hàn tại vận tốc hàn khác nhau

Các đường cong ứng suất - biến dạng phụ thuộc đáng kể vào việc thay đổi vận tốc hàn, đặc biệt là ở độ bền kéo mối hàn. Như mô tả trong Hình 4.30, độ bền mối hàn tăng nhẹ tương ứng với việc tăng vận tốc hàn từ 50 mm/phút lên 75 mm/phút. Độ bền kéo cao nhất đạt giá trị khoảng 5.506 N tại vận tốc hàn 75 mm/phút. Tuy nhiên, giá trị này giảm sâu khi vận tốc hàn tăng từ 75 mm/phút đến 200 mm/phút. Chiều dày lớp IMC và lớp khuếch tán phù hợp khi mối hàn AA6061/SUS316 chịu sự ảnh hưởng của vận tốc hàn và chiều sâu ép chốt tại mục 4.1.



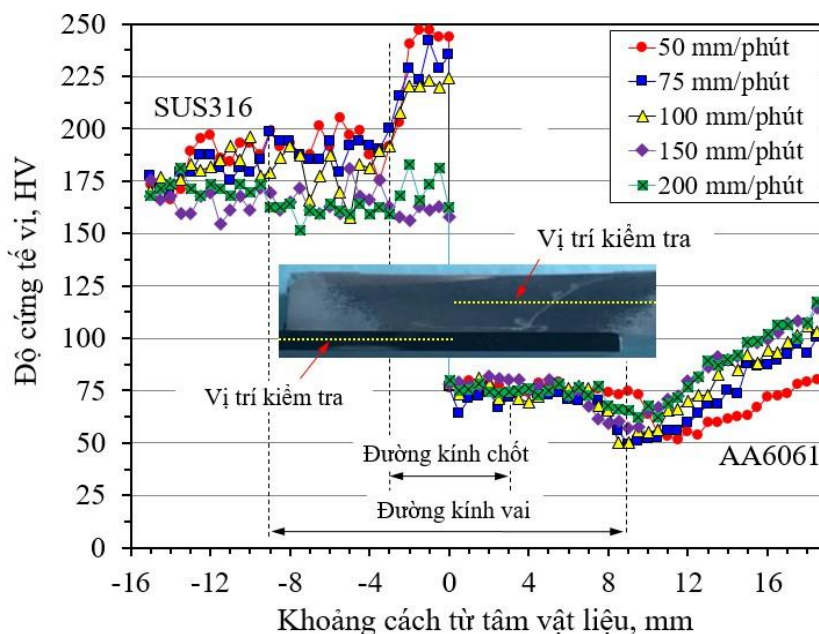
Hình 4.30. Độ bền kéo lớn nhất của mối hàn tại vận tốc hàn khác nhau

Như kết luận trong các công trình nghiên cứu [28, 142], việc giảm chiều dày lớp IMC làm tăng độ bền của mối hàn. Chiều dày lớp IMC ảnh hưởng không đáng kể đến độ bền mối hàn trong việc này. Mối hàn có độ bền thấp ở vận tốc hàn cao có thể liên quan đến khuyết tật bề mặt mà màng oxit được phát hiện ở 200 mm/phút (Hình 4.19(c)). Madhavan S. và cộng sự (2016) đã nghiên cứu nhiệt đầu vào đến cấu trúc vi mô và tính chất cơ học mối hàn chồng FSW giữa AA6061 và DP800. Sự xuất hiện pha Fe_3Al không ảnh hưởng đến cơ tính mối hàn. Độ bền lớn nhất mối hàn tại nhiệt đầu vào 120 J/mm với lớp IMC dày 1,49 μm [144]. Vì thế, lớp IMC giàu Fe không gây bất lợi như một số khuyết tật đối với độ bền mối hàn AA6061/SUS316.

4.2.6. Phân bố độ cứng tế vi mối hàn

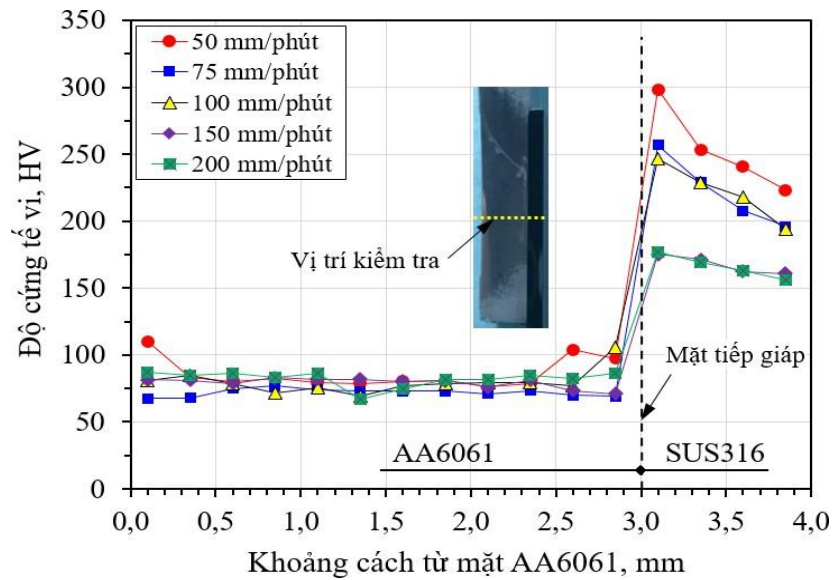
Độ cứng được phân bố theo mặt cắt ngang và chiều dày mối hàn tại tốc độ quay 800 vòng/phút và vận tốc hàn khác nhau được thể hiện trong Hình 4.31 và Hình 4.32. Chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn không đổi khi FSW. Trong cả hai trường hợp, giá trị độ cứng đều nhạy cảm với vận tốc hàn. Giá trị độ cứng nhỏ nhất tìm thấy trong

vùng HAZ của AA6061. Độ cứng mỗi hàn giảm tương ứng với vận tốc hàn giảm. Độ cứng vùng HAZ được mở rộng bằng cách giảm vận tốc hàn (Hình 4.31). Nhiệt độ hàn cao với vận tốc hàn thấp có thể khiến cấu trúc hạt AA6061 thô nên độ cứng mỗi hàn giảm (Hình 4.32). Kết quả đã được Malto và cộng sự (2018) nghiên cứu hàn chồng FSW giữa AA6061 và AISI304 công bố [34]. Ngược lại, giá trị độ cứng vùng SZ bên SUS316 rất cao tại vận tốc hàn 50 mm/phút và 75 mm/phút.



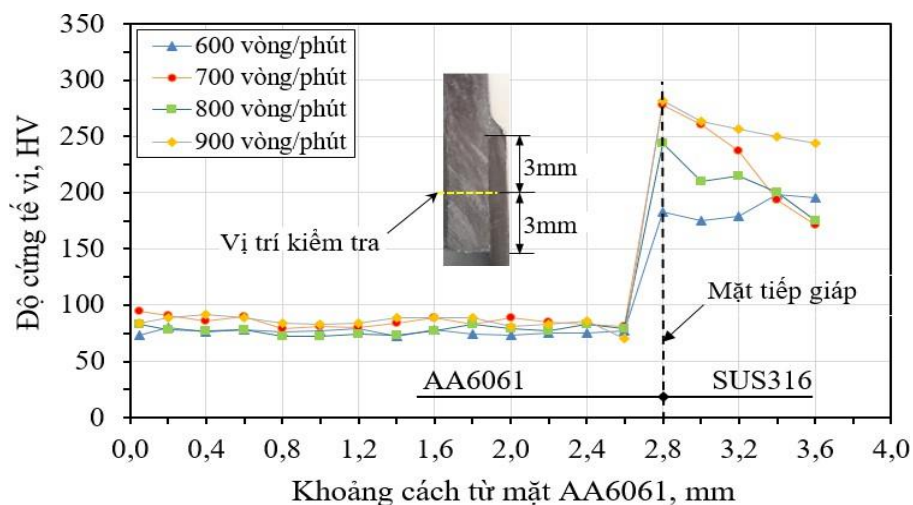
Hình 4.31. Độ cứng tế vi mặt cắt ngang mỗi hàn tại vận tốc hàn khác nhau

Như thể hiện Hình 4.32, độ cứng cao nhất mỗi hàn có giá trị xấp xỉ 300 HV tại vận tốc hàn 50 mm/phút. Tốc độ hàn giảm, độ cứng vùng SZ bên SUS316 tăng. Bên cạnh đó, hoạt động khuấy trộn kim loại của chốt hàn mạnh nên cấu trúc hạt kim loại nhỏ. Cấu trúc hạt mịn vùng SZ đã nâng cao khả năng chống lệch vị trí so với cấu trúc hạt thô của SUS316 cơ bản [34, 139].

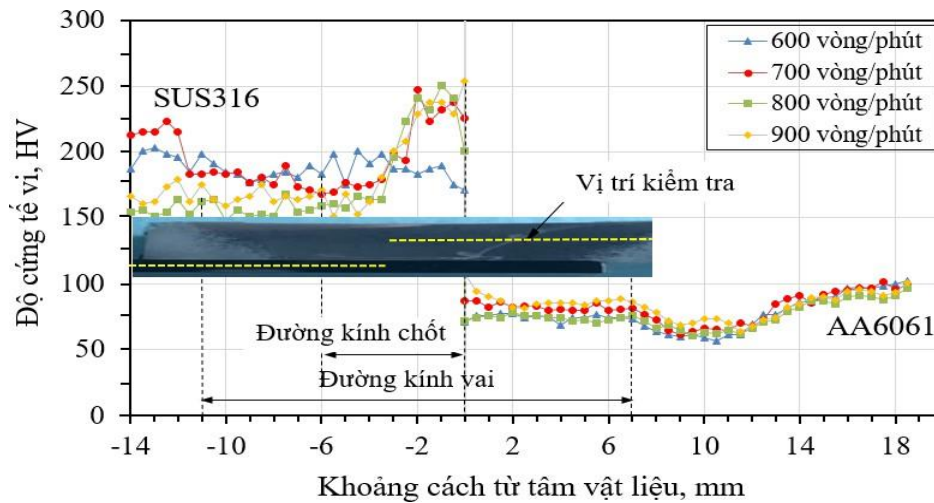


Hình 4.32. Độ cứng tế vi chiều dày mỗi hàn tại vận tốc hàn khác nhau

Bên cạnh đó, độ cứng tế vi bên AA6061 không ảnh hưởng đáng kể bởi tốc độ quay của dụng cụ hàn như Hình 4.33 và Hình 4.34. Vận tốc hàn 200 mm/phút, chiều sâu ép chốt 0,30 mm và chiều dài chốt hàn 2,9 mm không đổi. Độ cứng thấp nhất được phát hiện tại vùng HAZ bên AA6061. Theo kết quả đã công bố, giá trị độ cứng AA6061 giảm tại vùng HAZ, nơi có cấu trúc hạt vi mô thô hơn [140]. Ngược lại, tốc độ quay tác động mạnh đến sự phân bố độ cứng bên SUS316, đặc biệt vùng SZ. Giá trị độ cứng của SUS316 vùng SZ cao hơn là do kích thước hạt kim loại mịn. Cấu trúc hạt này đã nâng cao khả năng chống lệch vị trí so với cấu trúc hạt thô trong kim loại cơ bản SUS316 [34, 139]. So với AA6061, độ cứng của SUS316 nhạy hơn với tốc độ quay dụng cụ. Độ cứng mỗi hàn cao nhất xấp xỉ 282 HV ở tốc độ quay 900 vòng/phút (Hình 4.33). Kết quả cho thấy, việc tăng tốc độ quay làm tăng giá trị độ cứng mỗi hàn.



Hình 4.33. Độ cứng tế vi theo chiều dày mỗi hàn tại tốc độ quay khác nhau



Hình 4.34. Độ cứng tế vi mặt cắt ngang mối hàn tại tốc độ quay khác nhau

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

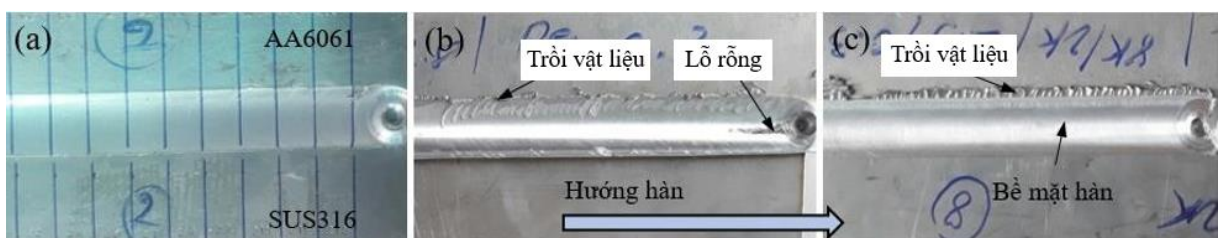
Mối hàn được chế tạo với chiều sâu ép chốt thay đổi từ 0,20 mm đến 0,40 mm, chiều dài chốt hàn từ 2,7 mm đến 3,0 mm. Tốc độ quay 800 vòng/phút và vận tốc hàn 200 mm/phút là hằng số, không đổi.

Bảng 4.4. Các thông số khác nhau để chế tạo mối hàn AA6061/SUS316 nhằm khảo sát ảnh hưởng của chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt đến đặc tính mối 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)
800	200	0,20, 0,30, 0,40	2,6, 2,7, 2,8, 2,9, 3,0

4.3.1. Bề mặt mối hàn

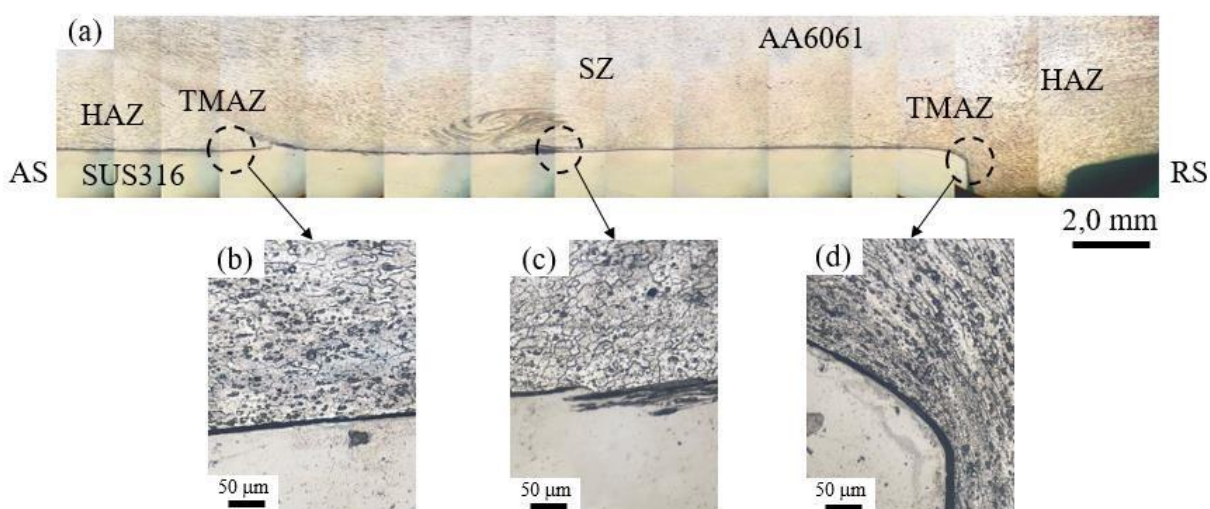
Mối hàn được chế tạo với chiều dài chốt hàn thay đổi từ 2,7 mm đến 2,9 mm, tốc độ quay 800 vòng/phút, vận tốc hàn 200 mm/phút và chiều sâu ép chốt 0,30 mm là hằng số cố định. Bề mặt đại diện của các mối hàn AA6061/SUS316 được thể hiện trong Hình 4.35. Bề mặt hàn nhẵn, không trôi vật liệu, nứt với chiều dài chốt hàn 2,7 mm được thể hiện Hình 4.35(a). Mối hàn bị trôi vật liệu được hình thành đáng kể tại chiều dài chốt hàn 2,9 mm. Nhiệt đầu vào mối hàn lớn nên bề mặt hàn nhẵn như Hình 4.35(c).



Hình 4.35. Bề mặt mối hàn AA6061/SUS316 được chế tạo tại chiều dài chốt hàn khác nhau (a) $L = 2,7$ (mm), (b) $L = 2,8$ (mm), (c) $L = 2,9$ (mm)

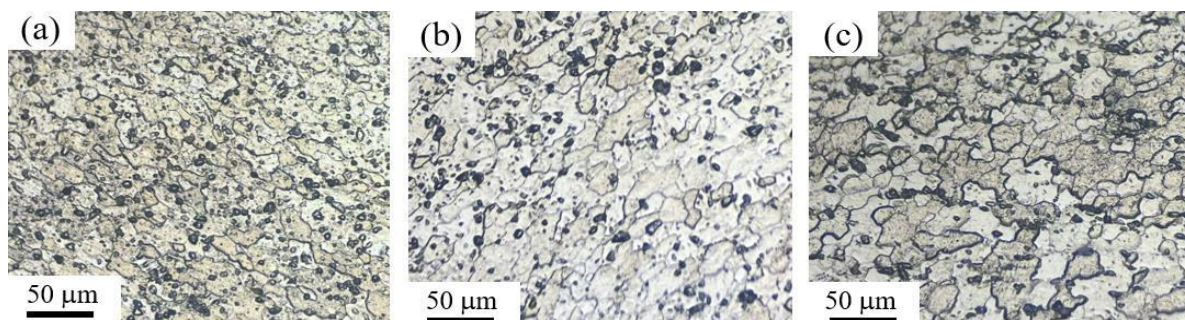
4.3.2. Sự phát triển cấu trúc tế vi mối hàn

Hình 4.36 hiển thị cấu trúc tế vi mối hàn AA6061/SUS316 được chế tạo với chiều dài chốt hàn 2,9 mm, chiều sâu ép chốt 0,30 mm. Mối hàn không bị khuyết tật như: nứt, rãnh, lỗ hổng được thể hiện Hình 4.36(a). Kích thước hạt AA6061 thay đổi theo các vùng hàn. Kích thước hạt lớn dần tương ứng từ vùng SZ đến vùng TMAZ như Hình 4.36(b, c, d). Nội dung phù hợp với các công trình nghiên cứu trước đây [21, 44, 72].



Hình 4.36. (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 và chiều sâu ép chốt 0,30 mm

Kích thước hạt AA6061 của mối hàn được chế tạo bởi chiều dài chốt hàn khác nhau như Hình 4.37. Khi FSW với chiều dài chốt hàn khác nhau ảnh hưởng đến việc phân bố nhiệt độ hàn, sự phát triển hạt trong và xung quanh vùng hàn không đồng nhất [142, 145]. Darmadi D.B. và cộng sự (2019) nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dài chốt hàn đến độ bền mối hàn FSW giáp mí AA7075. Kết quả, độ bền mối hàn tăng khi tăng chiều dài chốt hàn [146]. Như thể hiện Hình 4.37(c) khi tăng chiều dài chốt hàn, nhiệt đầu vào tăng nên kích thước hạt kim loại mối hàn AA6061/SUS316 mịn hơn.

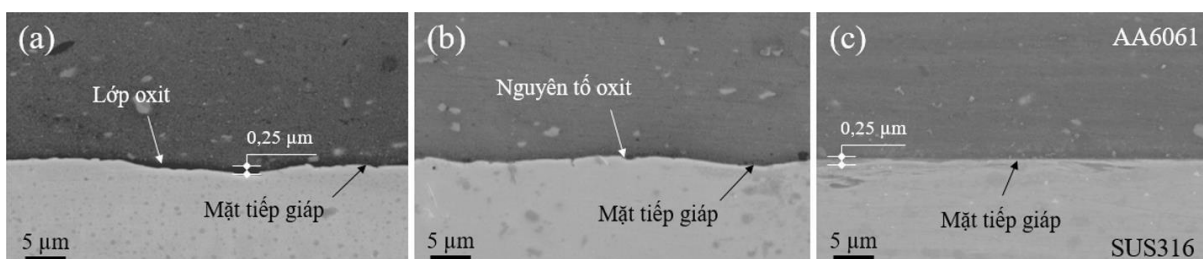


**Hình 4.37. Cấu trúc tế vi AA6061 vùng SZ tại chiều dài chốt hàn khác nhau
(a) $L = 2,7$ mm, (b) $L = 2,8$ (mm), (c) $L = 2,9$ mm**

Bên cạnh đó, có thể xuất hiện nhiều nguyên tố oxit trên tấm AA6061 của mối hàn với chiều dài chốt 2,7 mm như Hình 4.37(a). Dưới nhiệt độ cao tại vùng khuấy, màng oxit bị vỡ và phân tán dọc bề mặt tiếp giáp hai hợp kim mối hàn [147 - 149]. Việc này hình thành lớp oxit tại mặt liên kết giữa AA6061 và SUS316 như Hình 4.38(a). Tăng chiều dài chốt hàn lên 2,8 mm, đã giảm các nguyên tố oxit trong cấu trúc và mặt tiếp giáp mối hàn (Hình 4.37(b) và Hình 4.38(b)). Nhiệt đầu vào tăng khi tăng chiều dài chốt hàn, kích thước hạt vùng SZ nhỏ [146] nên AA6061 liên kết cơ học tốt với SUS316.

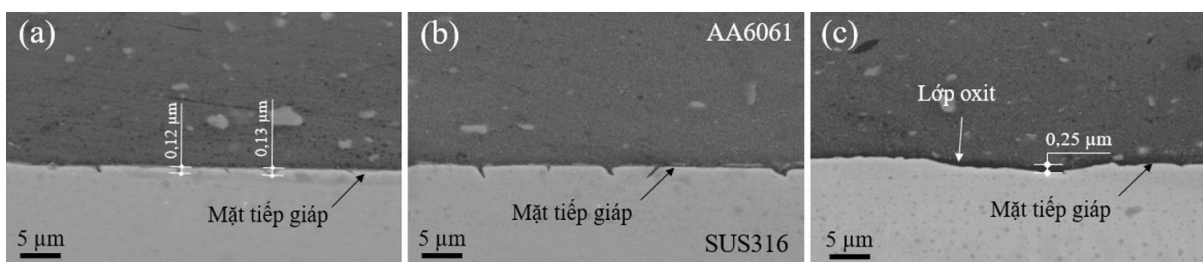
4.3.3. Đặc tính bề mặt liên kết mối hàn

Nhiệt đầu vào mối hàn thấp nên không thể phá hủy lớp oxit xấp xỉ $0,25\ \mu\text{m}$ tại mặt tiếp giáp như Hình 4.38(a). Điều này có thể do nguyên nhân dòng nhiệt thất thoát lớn truyền qua dụng cụ hàn khi chiều dài chốt hàn nhỏ [91]. Khi tăng chiều dài chốt hàn đến 2,8 mm, còn tồn tại các nguyên tố oxit nhưng lớp liên kết kim loại gọn sóng (Hình 4.38(b)). Bề mặt hàn nhiều khuyết tật như trồi vật liệu, không nhẵn, lỗ rỗng bên trong mối hàn như Hình 4.37(b). Các nguyên tố Fe, Al hòa trộn vào nhau, hình thành lớp IMC dày khoảng $0,25\ \mu\text{m}$ tại mặt tiếp giáp với chiều dài chốt 2,9 mm. Lúc này, không còn các nguyên tố oxit tại mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 như Hình 4.38(c).



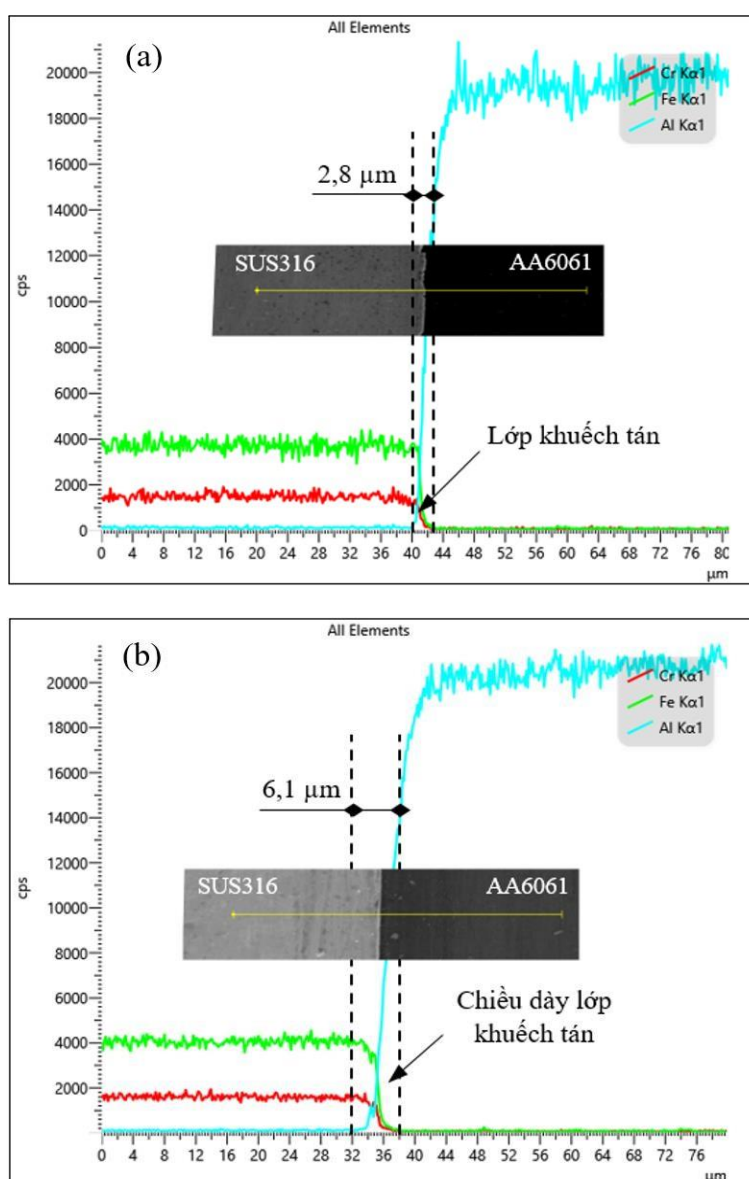
Hình 4.38. Hình SEM mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 tại chiều dài chốt hàn khác nhau (a) $L = 2,7$ (mm), (b) $L = 2,8$ (mm), (c) $L = 2,9$ (mm)

Mối hàn được chế tạo tại chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn khác nhau như Hình 4.39. Lớp IMC tại mặt tiếp giáp khoảng $0,12\ \mu\text{m}$ điền đầy các vết khuếch tán trên tấm SUS316 tại chiều dài chốt hàn 2,9 mm và chiều sâu ép chốt 0,20 mm như Hình 4.39(a). 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 (Hình 4.39(b)). Rõ ràng, AA6061 liên kết tốt với SUS316 khi tăng chiều dài chốt. Darmadi và cộng sự (2019) công bố khi nghiên cứu hàn giáp mí nhôm AA7075 với độ bền kéo tối đa mối hàn đạt 183 MPa khi chốt hàn dài 6,5 mm, giảm còn 42 MPa khi chốt dài 2,5 mm [146].



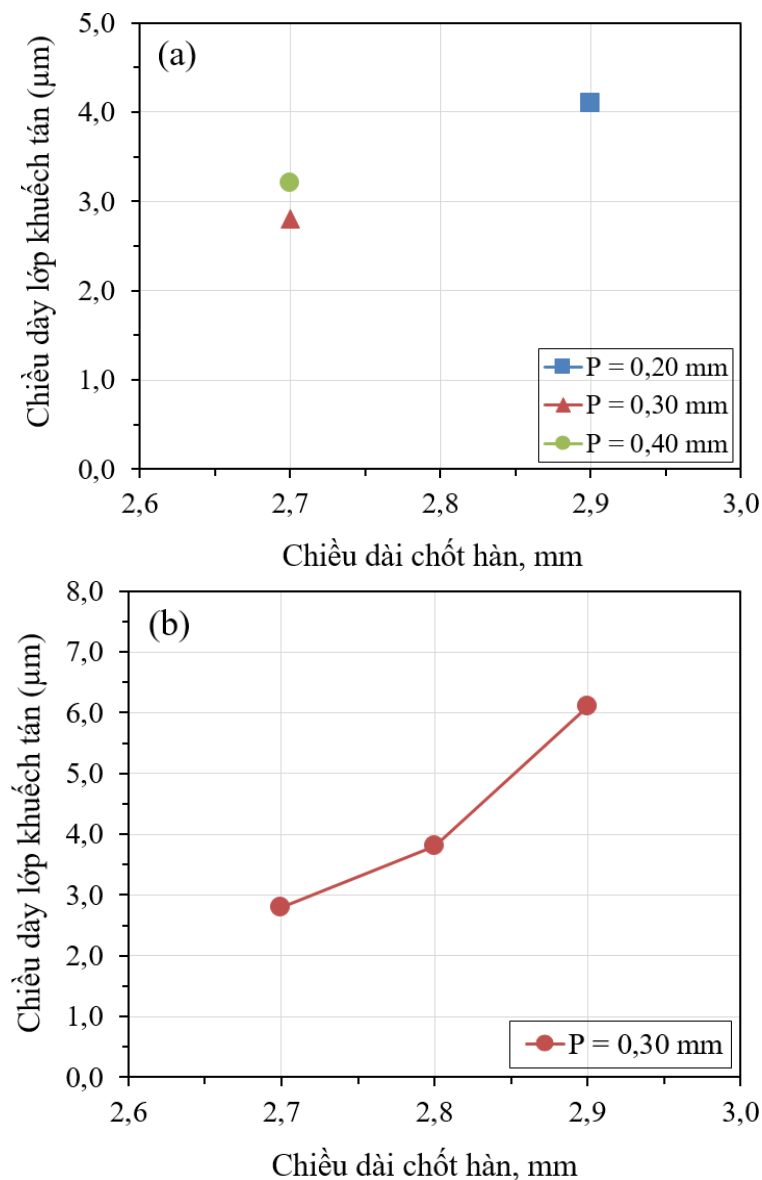
Hình 4.39. Hình SEM mặt tiếp giáp tại chiều sâu ép và dài chốt hàn khác nhau
(a) $L = 2,9$ mm (0,20), (b) $L = 2,7$ mm (0,40), (c) $L = 2,7$ mm (0,30)

Chiều dày lớp khuếch tán của mỗi hàn tương ứng với chiều dài chốt khác nhau được thể hiện Hình 4.40(a, b). 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.



Hình 4.40. Ảnh hưởng chiều dài chốt hàn đến chiều dày lớp khuếch tán
(a) chiều dài chốt hàn 2,7 mm, (b) chiều dài chốt hàn 2,9 mm

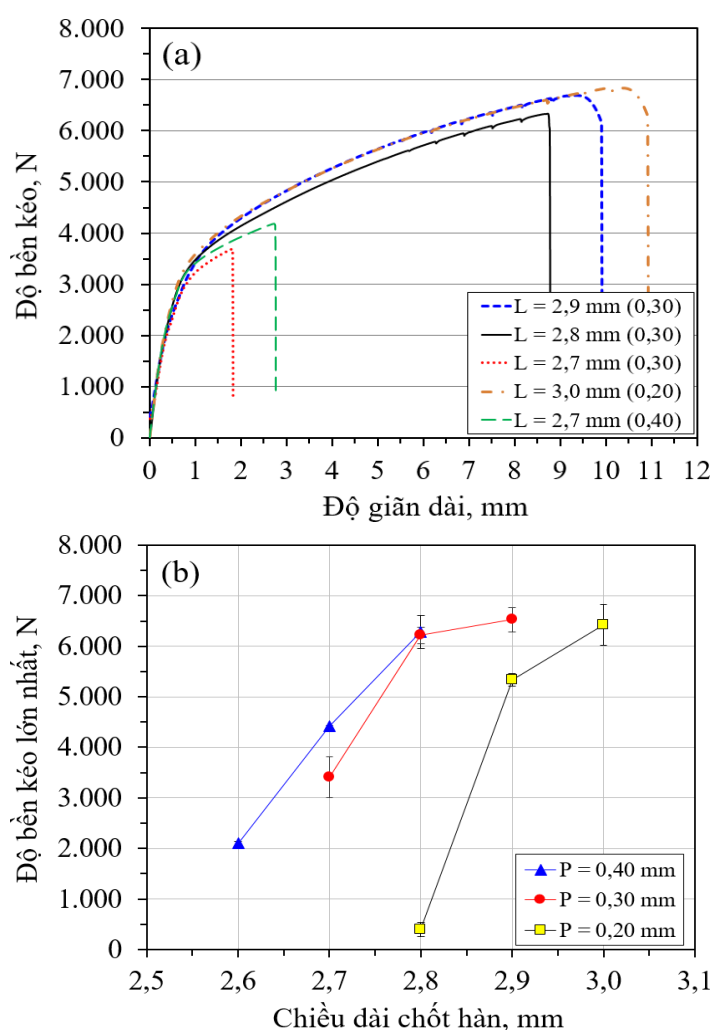
Trong khi đó, chiều dày lớp khuếch tán tăng đến 6,1 μm tại chiều sâu ép chốt 0,30 mm. Khi chiều dài chốt hàn cố định 2,7 mm, chiều dày lớp khuếch tán tăng khi tăng chiều sâu ép chốt như Hình 4.41(a). Tại chiều sâu ép chốt 0,30 mm, chiều dày lớp khuếch tán tăng khi tăng chiều dài chốt hàn (Hình 4.41(b)). Lớp IMC mới hàn tại mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 được hình thành dưới tác động khuấy, trộn của chốt hàn. Công trình nghiên cứu được Yazdipour A. và cộng sự (2016) công bố trên FSW giáp mí giữa AA5083-H321 và 316L [137]. Kết quả khẳng định rằng, khi tăng chiều dài chốt hàn, chiều dày lớp khuếch tán tăng. Ngoài ra, chiều dày lớp IMC tăng sẽ làm tăng chiều dày lớp khuếch tán.



Hình 4.41. (a) Chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn, (b) chiều dài chốt hàn ảnh hưởng đến chiều dày lớp khuếch tán

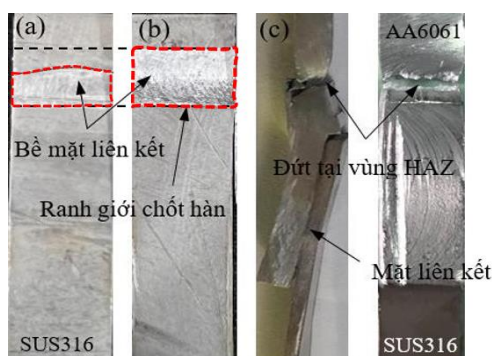
4.3.4. Độ bền kéo và ứng xử phá hủy mối hàn

Ảnh hưởng của chiều sâu ép và chiều dài chốt hàn đến đường cong chuyển vị như Hình 4.42(a). Chiều dài chốt hàn ảnh hưởng lớn đến chuyển vị. Chiều sâu ép chốt nhỏ nên nhiệt ma sát thấp do diện tích tiếp xúc giữa vai dụng cụ và vật liệu hàn tăng không đáng kể. Độ bền kéo mối hàn tăng không đáng kể khi tăng chiều sâu ép chốt. Như Hình 4.42(b) thể hiện, chiều dài chốt hàn quyết định đến cơ tính mối hàn hơn chiều sâu ép chốt [146]. Mối hàn có độ bền kéo thấp tại chiều sâu ép chốt 0,20 mm và chiều dài chốt hàn 2,8 mm. Độ bền 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 0,20 mm. Điều này thể hiện AA6061 liên kết tốt với SUS316 như Hình 4.43(c). Vì vậy, khi chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn tăng đồng thời, độ bền kéo mối hàn tăng nhanh. Độ bền 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 như Bảng 4.5 và Hình 4.42(b).



Hình 4.42. Ảnh hưởng của chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn đến (a) đường cong chuyển vị, (b) độ bền kéo mối hàn AA6061/SUS316

Đại diện mặt liên kết 2 hợp kim hàn trên tấm SUS316 tương ứng (a) $L = 2,7$ (mm), (b) $L = 2,8$ (mm), (c) $L = 2,9$ (mm) được thể hiện Hình 4.43.

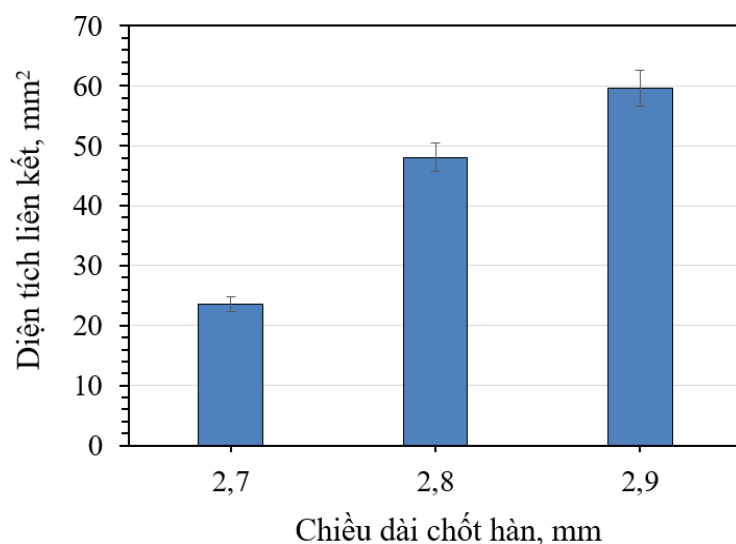


**Hình 4.43. (a, b) mối hàn bị phá hủy tại mặt tiếp giáp
(c) mối hàn bị đứt tại HAZ bên AA6061**

Bảng 4.5. Ảnh hưởng chiều sâu ép chốt và chiều dài chốt hàn đến độ bền kéo

Chiều sâu ép chốt (mm)	Chiều dài chốt hàn (mm)	Độ bền kéo lớn nhất (N)
0,20	2,8	400,00
	2,9	5.337,20
	3,0	6.425,30
0,30	2,7	3.406,79
	2,8	6.219,43
	2,9	6.525,95
0,40	2,6	2.099,69
	2,7	4.413,72
	2,8	6.282,61

Hình 4.44 thể hiện diện tích liên kết giữa AA6061 với SUS316. Diện tích liên kết nhỏ nhất khoảng 24 mm^2 khi chiều dài chốt hàn $2,7 \text{ mm}$. Như thể hiện Hình 4.43(a), nhiệt đầu vào mối hàn nhỏ nên AA6061 ít liên kết với SUS316. Diện tích liên kết có giá trị lớn nhất xấp xỉ 60 mm^2 tại chiều dài chốt hàn $2,9 \text{ mm}$. Mối hàn bị đứt tại vùng HAZ bên AA6061 như Hình 4.43(c). Kết quả cho thấy liên kết giữa AA6061 và SUS316 tăng khi tăng chiều dài chốt hàn nên độ bền kéo mối hàn tăng như Hình 4.42(b). Bên cạnh đó, chiều dày lớp IMC và lớp khuếch tán tăng khi tăng chiều dài chốt hàn như Hình 4.40 và Hình 4.41 nên độ bền kéo mối hàn tăng.



Hình 4.44. Ảnh hưởng của chiều dài chốt hàn đến diện tích liên kết giữa AA6061 và SUS316

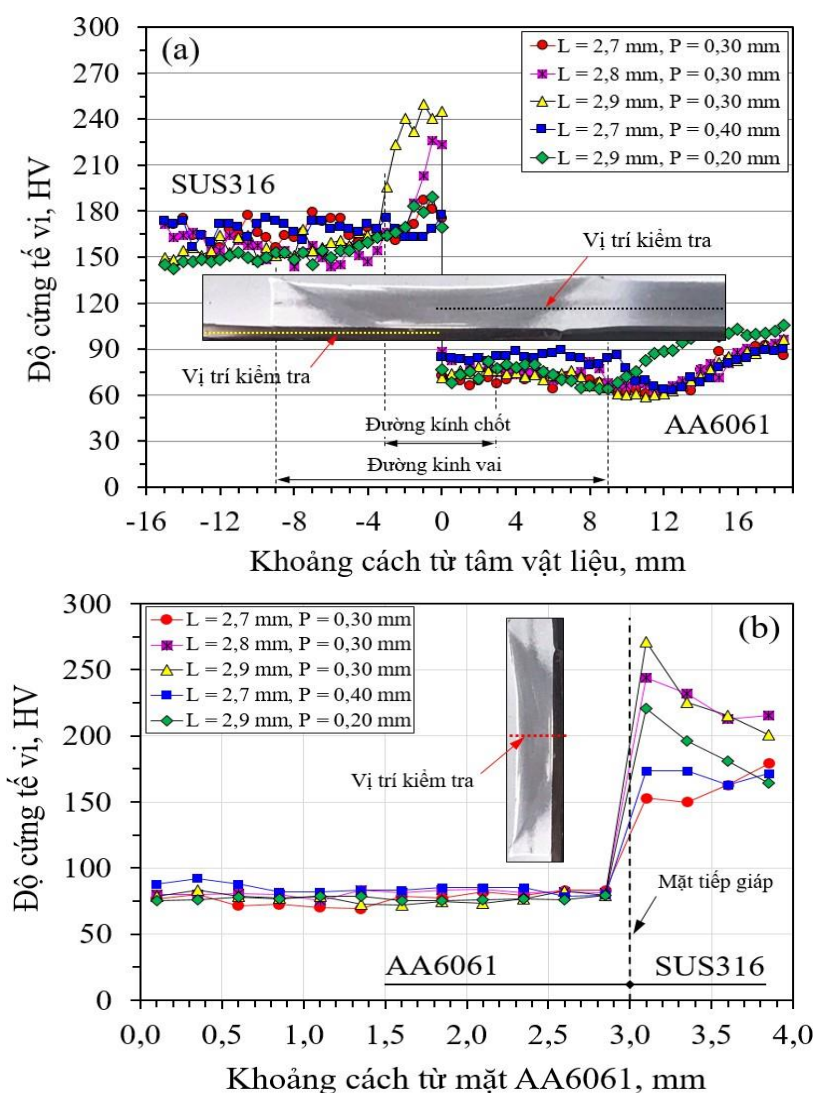
Hình SEM bề mặt phá hủy mỗi hàn tại mặt SUS316 như trong Hình 4.45. Nhiệt đầu vào và hoạt động khuấy của chốt hàn hình thành liên kết giữa hai hợp kim. Bề mặt liên kết giữa nhôm và thép không gỉ ít gồ ghề và hình thành lớp IMC (Hình 4.39(a)). Tuy nhiên, chốt hàn khuấy chưa hiệu quả nên nhiệt độ thấp, hình thành nhiều nguyên tố oxit như Hình 4.45(a). Mặt liên kết gồ ghề khi tăng chiều sâu ép chốt đạt giá trị 0,30 mm. Nhiệt độ hàn không cao nên chưa loại bỏ hoàn toàn các nguyên tố oxit (Hình 4.38(b)). Hơn nữa, chiều dài chốt hàn nhỏ, giá trị 2,8 mm nên AA6061 liên kết không tốt với SUS316 [146]. Mỗi 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 như Hình 4.45(c). 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 như được thấy trong Hình 4.45(b).



Hình 4.45. Hình SEM bề mặt phá hủy được chế tạo bởi chiều dài chốt hàn (mm) và chiều sâu ép chốt (mm) khác nhau (a) 2,9 - 0,20, (b) 2,8 - 0,30, (c) 3,0 - 0,20

4.3.5. Phân bố độ cứng tế vi môi hàn

Mối quan hệ giữa chiều dài chót hàn và chiều sâu ép chót đến sự phân bố độ cứng môi hàn AA6061/SUS316 được mô tả trong Hình 4.46(a, b). Chiều sâu ép và chiều dài chót hàn không ảnh hưởng lớn đến độ cứng của tấm AA6061 trên chiều dày môi hàn. Độ cứng tấm AA6061 tăng nhanh khi tăng chiều dài chót hàn, đồng thời giảm mạnh trên tấm SUS316 trên mặt cắt ngang môi hàn. Hiện tượng này cho thấy, với chiều sâu ép chót nhỏ nên nhiệt đầu vào môi hàn thấp, kích thước hạt vùng SZ lớn. Tương tự, khi tăng chiều sâu ép chót và giảm chiều dài chót hàn như Hình 4.46(a). Tại chiều sâu ép chót 0,30 mm, giá trị độ cứng của SUS316 tại vùng SZ tăng nhanh chóng, do chót hàn khuấy mạnh với chiều dài chót hàn từ 2,8 mm đến 2,9 mm. Độ cứng lớn nhất đạt giá trị 250 HV tại mặt cắt ngang, giá trị 271 HV tại chiều dày môi hàn với chiều sâu ép chót 0,30 mm, chiều dài chót hàn 2,9 mm.



Hình 4.46. Ảnh hưởng chiều dài chót hàn và chiều sâu ép chót đến độ cứng tế vi (a) mặt cắt ngang, (b) chiều dày môi hàn AA6061/SUS316

Giá trị độ cứng SUS316 tại SZ cao do cấu trúc hạt của lớp liên kết kim loại nhỏ, mịn [44, 138]. Độ cứng tấm AA6061 giảm đều tại vùng HAZ, nơi kích thước hạt kim loại thô [146]. Sự phân bố độ cứng tấm AA6061 ít ảnh hưởng của chiều sâu ép và chiều dài chốt hàn. Độ cứng tấm SUS316 gần mặt tiếp giáp tăng lên đáng kể, nguyên nhân do nhiệt đầu vào mỗi hàn tăng nên kích thước hạt kim loại nhỏ, mịn. Kết quả tương đồng với các công trình nghiên cứu [44, 135, 138].

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

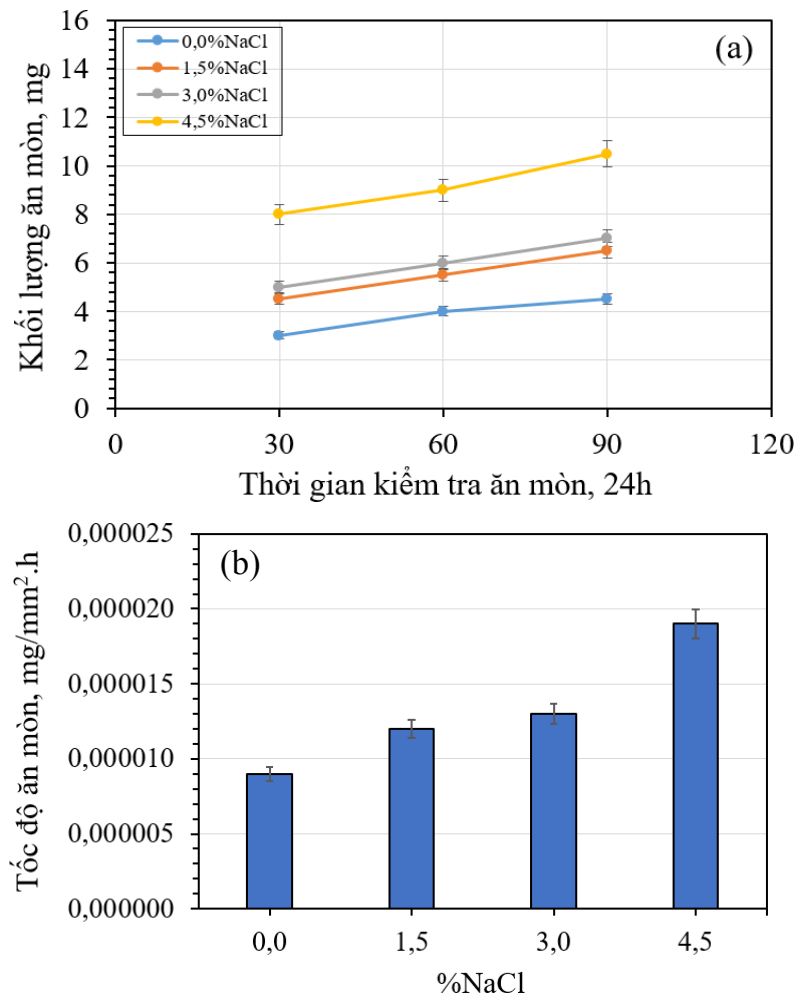
4.4.1. Tốc độ ăn mòn

Độ bền kéo cao nhất mỗi hàn FSW AA6061/SUS316 được chế tạo tại vận tốc hàn 150 mm/phút, tốc độ quay 800 vòng/phút, chiều sâu ép chốt 0,30 mm và chiều dài chốt hàn 2,9 mm. Mỗi hàn này được chế tạo các mẫu thử nghiệm ăn mòn, trình bày chi tiết trong mục 3.4.6.

Ăn mòn lớn nhất đạt 8,0 mg khi ngâm trong dung dịch 4,5 %NaCl sau 30 ngày đêm như Bảng 4.6. 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 4.47.

Bảng 4.6. Khối lượng ăn mòn mỗi hàn ngâm trong dung dịch NaCl

Nồng độ NaCl	Khối lượng ban đầu (g)	Thời gian ngâm (ngày đêm)		
		30	60	90
		Khối lượng ăn mòn (mg)		
0,0 %	1,685	3,0	4,0	4,5
1,5 %	1,872	4,5	5,5	6,5
3,0 %	1,817	5,0	6,0	7,0
4,5 %	1,991	8,0	9,0	10,5

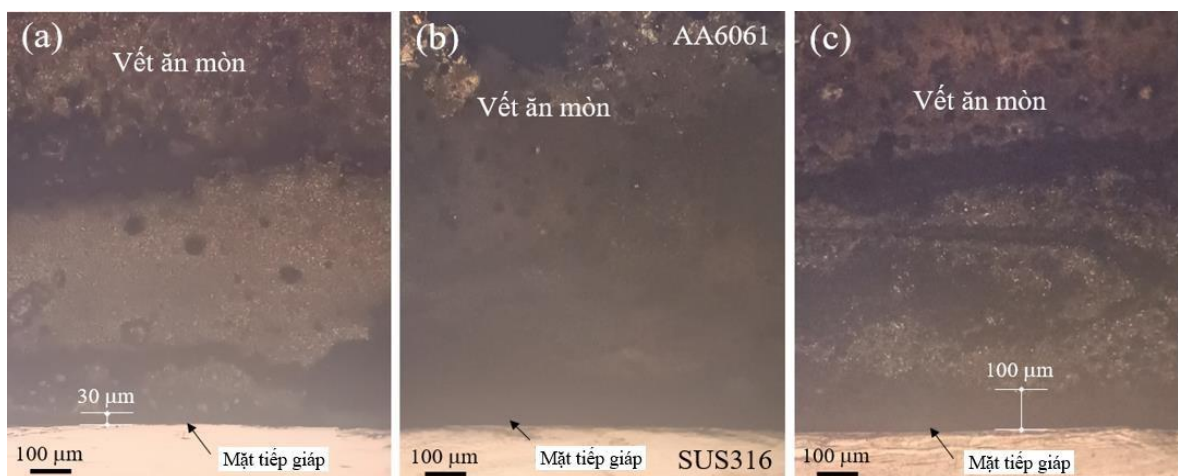


Hình 4.47. Ăn mòn mối hàn trong các dung dịch %NaCl khác nhau

(a) khối lượng ăn mòn - mg, (b) tốc độ ăn mòn - mg/mm².h

4.4.2. Phân tích cơ chế ăn mòn

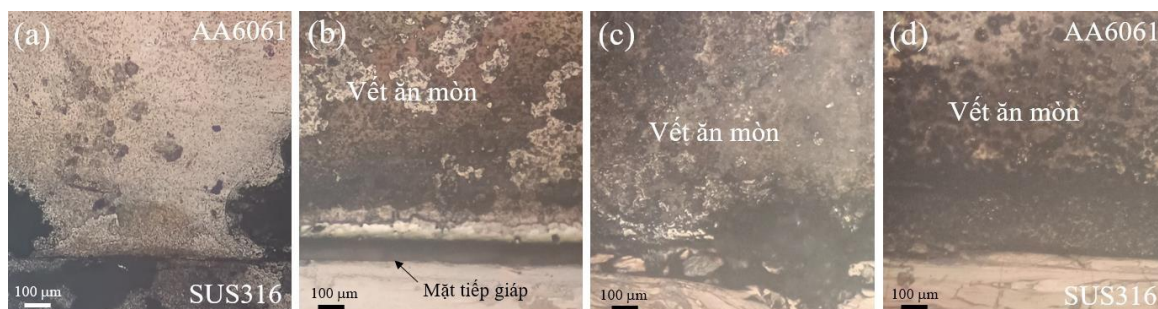
Thời gian ngâm mẫu 30 ngày, ăn mòn trên AA6061 và bắt đầu xuất hiện lớp oxit thụ động như Hình 4.48.



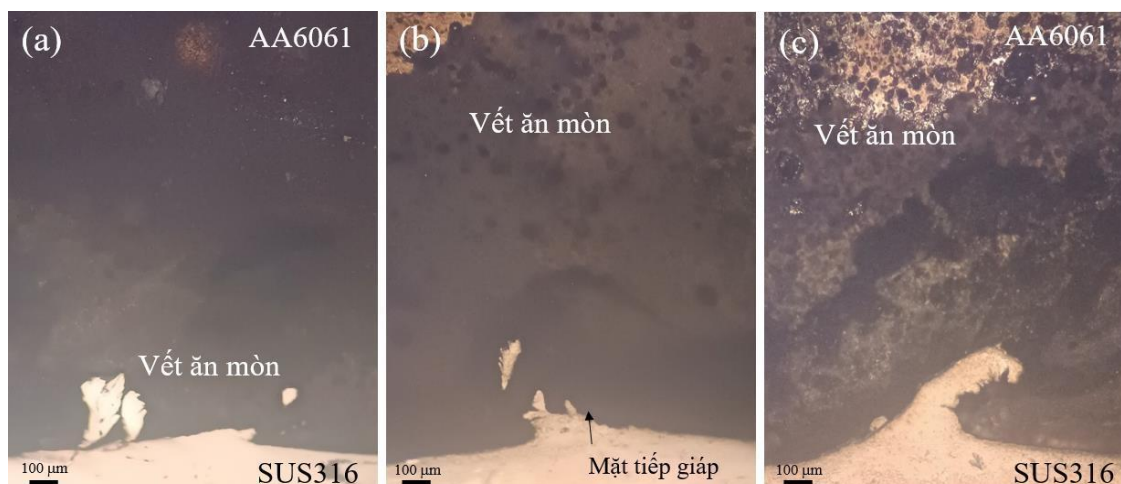
Hình 4.48. Cấu trúc ăn mòn mối hàn vùng SZ sau 30 ngày đêm (a) 0 %NaCl, (b) 1,5 %NaCl, (c) 3,0 %NaCl, (d) 4,5 %NaCl

Theo Anaman S.Y. và cộng sự (2019), AA5052-H32 của mối hàn FSW bị ăn mòn theo công thức $\text{Al} + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2$ [115]. Vì thế, AA6061 phản ứng mạnh với H_2O hình thành lớp $\text{Al}(\text{OH})_3$ trên bề mặt ăn mòn. Lớp $\text{Al}(\text{OH})_3$ ít và chiều dày nhỏ nên khả năng chống ăn mòn còn hạn chế.

Thời gian ngâm tăng 90 ngày đêm, lớp nhôm hydroxit nhiều phủ quanh vết ăn mòn. Màng $\text{Al}(\text{OH})_3$ thụ động có tác dụng giảm khả năng ăn mòn của AA6061 như Hình 4.49 và Hình 4.50. Dưới tác dụng của ion Cl^- lớp oxit thụ động nhanh bị phá hủy, lớp $\text{Al}(\text{OH})_3$ mới ngay lập tức hình thành. Nội dung này được thể hiện qua các công trình nghiên cứu trước đây [8, 119, 150]. $\text{Al}(\text{OH})_3$ bị hòa tan nên AA6061 cũng hòa tan ăn mòn của mối hàn tăng. 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 4.49). Như kết quả nghiên cứu đã công bố [119, 121, 122], chiều sâu và kích thước ăn mòn vùng tiếp giáp mối hàn nhiều hơn AA6061. Hơn nữa, ăn mòn đều tại TMAZ do kích thước hạt thô hơn SZ (Hình 4.49 và Hình 4.50).



Hình 4.49. Chiều rộng mặt tiếp giáp mối hàn vùng SZ bị ăn mòn sau 90 ngày đêm (a) 0 %NaCl, (b) 1,5 %NaCl, (c) 4,5 %NaCl



Hình 4.50. Cấu trúc ăn mòn mối hàn vùng TMAZ sau 90 ngày đêm 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

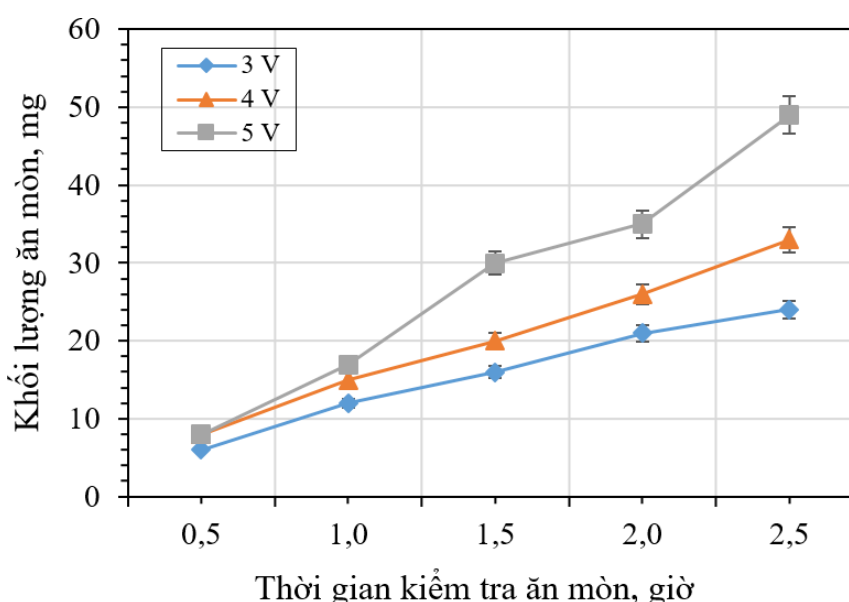
4.5.1. Tốc độ ăn mòn

Khối lượng và tốc độ ăn mòn mỗi hàn ngâm trong dung dịch 3,0 %NaCl, dưới tác dụng của các hiệu điện thế khác nhau được thể hiện trong Hình 4.51 và Hình 4.52. Khối lượng ăn mòn AA6061/SUS316 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 (Bảng 4.7). Dưới tác dụng của dòng điện, AA6061 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 $\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$.

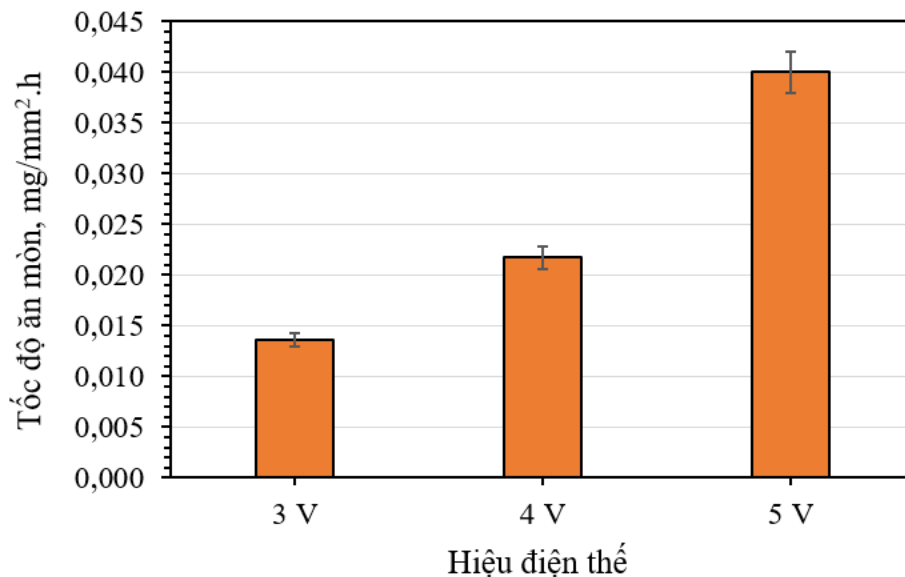
Bảng 4.7. Tốc độ ăn mòn mỗi hàn dưới tác dụng hiệu điện thế khác nhau

Hiệu điện thế tác dụng	3 V	4 V	5 V
Tốc độ ăn mòn (mg/mm ² .h)	0,0136	0,0217	0,0400

Khi dòng điện tăng sẽ hình thành nhiều ion Al³⁺ nên tốc độ ăn mòn của AA6061 tăng. Ăn mòn tăng, lớp Al(OH)₃ thụ động tăng, điền đầy các vết ăn mòn tạo thành các mảng tối màu được thể hiện từ Hình 4.53 đến Hình 4.54. Vì vậy, tốc độ ăn mòn của mỗi hàn tăng khi tăng hiệu điện thế.



Hình 4.51. Khối lượng ăn mòn mẫu ngâm trong dung dịch 3,0 %NaCl dưới tác dụng của hiệu điện thế khác nhau

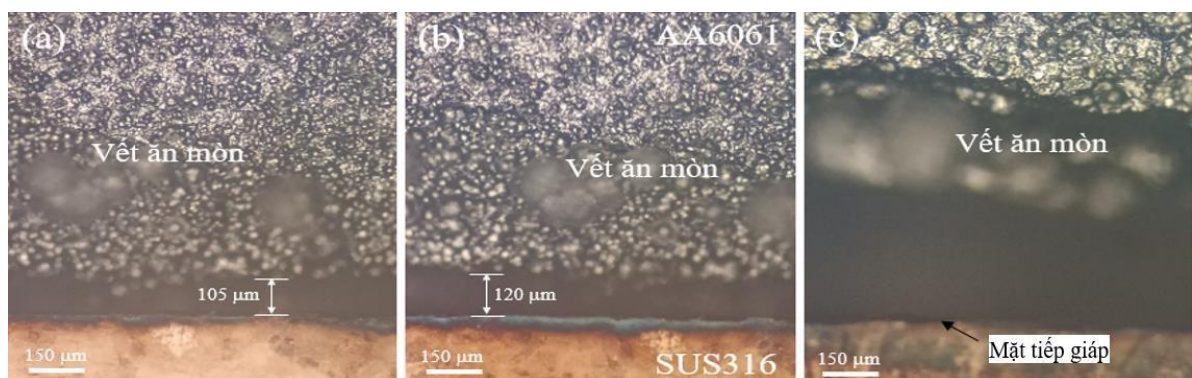


Hình 4.52. Tốc độ ăn mòn mẫu ngâm trong dung dịch 3,0 %NaCl dưới tác dụng của hiệu điện thế khác nhau

4.5.2. Phân tích cơ chế ăn mòn

Sử dụng máy cấp nguồn để khảo sát ăn mòn là quá trình “cưỡng chế” để gia tăng tốc độ ăn mòn mối hàn AA6061/SUS316.

Ăn mòn rõ bị ảnh hưởng bởi nhiều thông số khác nhau như pH, thành phần kim loại, hiệu điện thế, nhiệt độ [114]. Hạt kim loại nhỏ, mịn nên ăn mòn trên nhôm tạo thành các vết rỗ. Ăn mòn đều trên toàn bề mặt khi hiệu điện thế là 3 V như Hình 4.53(a). Ăn mòn nhiều, tạo thành mảng lớn khi tăng hiệu điện thế như trong Hình 4.53(b, c). Kích thước ăn mòn trên tấm AA6061 và mặt tiếp giáp mối hàn tăng khi tăng hiệu điện thế.

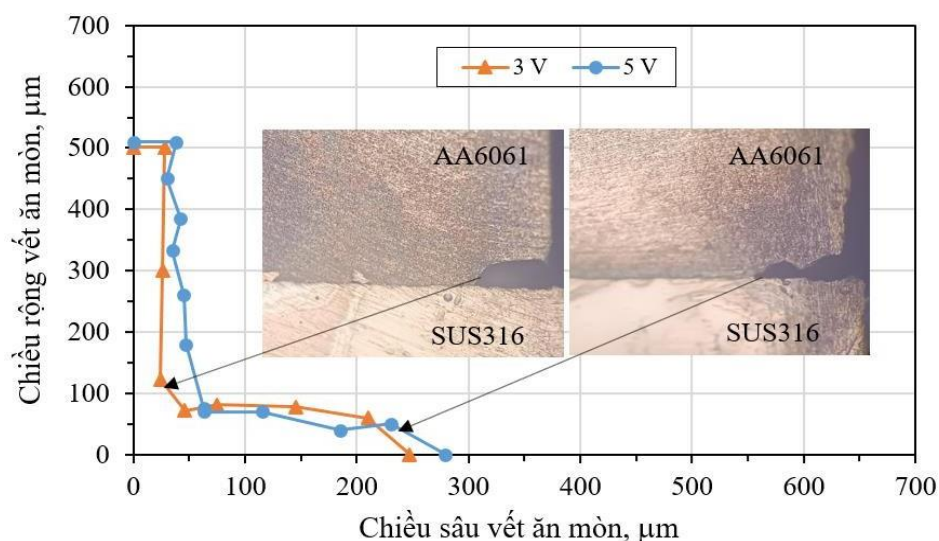


Hình 4.53. Cấu trúc tế vi vùng SZ tại hiệu điện thế khác nhau (a) 3 V, (b) 4 V, (c) 5 V

Căn cứ kết quả các công trình [34, 109, 110], tại vùng hàn bên cạnh SZ, đầu khuấy hoạt động mạnh và tác dụng của vai dụng cụ nên nhiệt đầu vào tăng. Nhiệt độ tăng dẫn đến bề mặt liên kết hai hợp kim hàn nhấp nhô như Hình 4.53. Cần lưu ý rằng hiện tượng

ăn mòn điện hóa tồn tại giữa các vùng hàn do các hạt kim loại liên kết tạo thành, được thể hiện trong công trình đã công bố [117]. Khi AA6061 ăn mòn xuất hiện lớp $\text{Al}(\text{OH})_3$ thụ động điền vào các vết ăn mòn nên phần nào cản trở khả năng ăn mòn của mối hàn. Ăn mòn tại mặt tiếp giáp tăng từ 105 μm lên 120 μm khi tăng hiệu điện thế từ 3 V lên 4 V. Ăn mòn nhiều tại mặt tiếp giáp, lan rộng ra tấm AA6061 khi tăng hiệu điện thế lên 5 V như Hình 4.53(c). Chiều rộng, chiều sâu ăn mòn tăng nên tốc độ ăn mòn tăng khi tăng hiệu điện thế. Kết quả chỉ ra rằng, tốc độ ăn mòn tăng khi tăng hiệu điện thế. Lớp IMC phân bố không đồng nhất nên chiều rộng và chiều sâu ăn mòn của mối hàn AA6061/SUS316 cũng tương tự.

Như thể hiện Hình 4.54, chiều rộng nhôm AA6061 bị ăn mòn lớn nhất là 501 μm tại hiệu điện thế 3 V, tăng đến giá trị 510 μm khi tăng hiệu điện thế đến 5 V, tương ứng với chiều rộng ăn mòn dọc theo mặt tiếp giáp hai hợp kim 80 μm và 76 μm . Căn cứ theo kết quả nghiên cứu của các công trình [108, 116, 117, 121], AA6061 thường phản ứng cao dưới độ ẩm tạo thành một màng $\text{Al}(\text{OH})_3$ thụ động. Trong trường hợp này, các hạt hình thành ở cực âm làm tăng pH cục bộ, từ đó dẫn đến sự hòa tan của các nguyên tố nhôm nên bề mặt xốp, dễ bị ăn mòn [114, 117]. Khả năng ăn mòn của hạt liên kết kim loại không giống như nhôm cơ bản. Sự chênh lệch điện thế giữa các hạt liên kết kim loại và nền nhôm hình thành các phân tử ăn mòn. Nhôm hòa tan liên tục trong dung dịch NaCl. Dưới tác dụng của dòng điện và các ion Cl^- đã phá vỡ lớp oxit thụ động $\text{Al}(\text{OH})_3$ [115] nên mối hàn ăn mòn tuần hoàn. Bên cạnh đó, khi tăng hiệu điện thế thì ăn mòn điện hóa cục bộ giữa các hạt lớp IMC và nền AA6061 tăng lên. Nghiên cứu này cho thấy rằng sự gia tăng hiện tượng rỗ và ăn mòn liên vùng khi tăng hiệu điện thế.



Hình 4.54. Mẫu hàn ăn mòn bên cạnh vùng SZ tại $U = 3 \text{ V}$ và $U = 5 \text{ V}$

Trong quá trình hàn ma sát khuấy, hình thành lớp liên kết kim loại dày 0,9 μm và có các nguyên tố Fe, Cr hòa trộn vào AA6061. Bên cạnh đó, chiều dày lớp khuếch tán cao hơn khoảng ba lần so với chiều dày lớp IMC [135, 139]. Ngoài việc ăn mòn trên tấm AA6061, tại mặt tiếp giáp hai hợp kim thường xuyên xảy ra ăn mòn điện hóa nên mối hàn nhanh chóng phá hủy khi chịu tác động của môi trường ăn mòn.

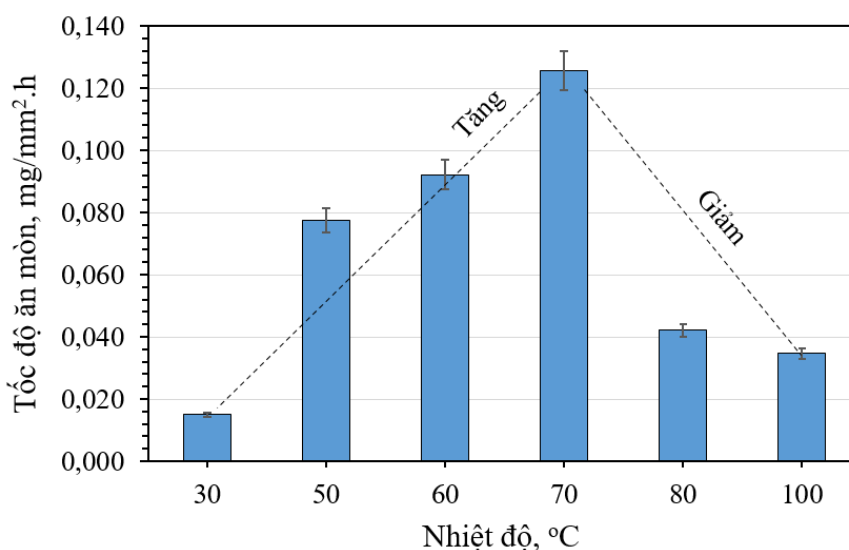
4.6. Tác dụng của nhiệt độ đến quá trình ăn mòn

4.6.1. Tốc độ ăn mòn

Mối hàn bị ăn mòn khi ngâm trong dung dịch 3,0 %NaCl, tác dụng cùng lúc hiệu điện thế 3 V và nhiệt độ khác nhau được thể hiện Bảng 4.8. Tốc độ ăn mòn mối hàn tăng khi nhiệt độ từ 30 $^{\circ}\text{C}$ đến 70 $^{\circ}\text{C}$, giảm khi nhiệt độ tăng từ 70 $^{\circ}\text{C}$ đến 100 $^{\circ}\text{C}$. Tốc độ ăn mòn lớn nhất xấp xỉ 0,126 $\text{mg}/\text{mm}^2.\text{h}$ tại nhiệt độ 70 $^{\circ}\text{C}$ như Bảng 4.8 và Hình 4.55.

Bảng 4.8. Tốc độ ăn mòn mối hàn dưới tác dụng của nhiệt độ khác nhau

Nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$)	30	50	60	70	80	100
Tốc độ ăn mòn ($\text{mg}/\text{mm}^2.\text{h}$)	0,0150	0,0776	0,0922	0,1257	0,0421	0,0346



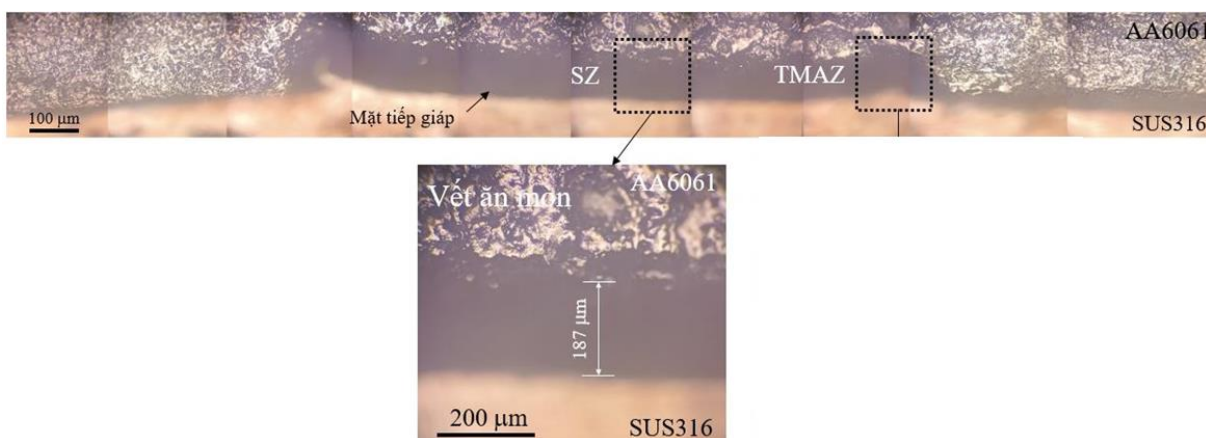
Hình 4.55. Tốc độ ăn mòn mối hàn ngâm trong dung dịch 3,0 %NaCl, $U = 3\text{ V}$ và nhiệt độ khác nhau

4.6.2. Phân tích cơ chế ăn mòn

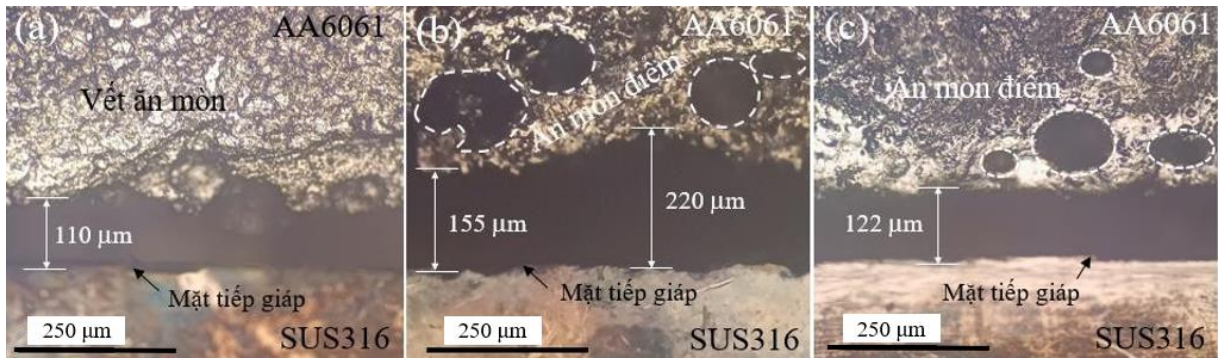
Như thể hiện Hình 4.56 và Hình 4.57, khi nhiệt độ tăng từ 30 $^{\circ}\text{C}$ đến 70 $^{\circ}\text{C}$, tốc độ của phản ứng ăn mòn hóa học liên tục tăng. Số lượng màng $\text{Al}(\text{OH})_3$ thụ động hình thành trên bề mặt AA6061 tương đối nhỏ và cấu trúc chưa ổn định. Do đó, các màng thụ động này có tác dụng bảo vệ ăn mòn không đáng kể [8, 115]. Có nghĩa là ăn mòn đều và tăng

liên tục khi nhiệt độ tăng.

Nhôm hydroxit được tạo ra khi vật liệu bị ăn mòn thể hiện vùng tối từ Hình 4.56 đến Hình 4.57 [116, 117]. Tại SZ, mối hàn ăn mòn đều với nhiệt độ 50 °C. Ăn mòn lớn hơn, đặc biệt tại mặt tiếp giáp khi tăng nhiệt độ lên 70 °C được thể hiện trong Hình 4.55. Tốc độ ăn mòn lớn nhất 0,1257 mg/mm².h tại 70 °C (Bảng 4.8 và Hình 4.55). Màng Al(OH)₃ thụ động phủ toàn bộ lên vết ăn mòn dọc mặt tiếp giáp giữa AA6061 và SUS316 của mối hàn. Khi nhiệt độ lớn hơn 70 °C, phản ứng ăn mòn hóa học tiếp tục tăng. Tuy nhiên, cấu trúc của màng Al(OH)₃ ổn định và số lượng tăng lên. Al(OH)₃ có chức năng làm giảm ăn mòn mối hàn nên tốc độ ăn mòn giảm [8, 115]. Lớp Al(OH)₃ thụ động chưa hoàn chỉnh là ranh giới các hạt liên kết kim loại và tạp chất. Chính vì thế, nhiệt độ tăng đến 80 °C như Hình 4.57(b), một số vị trí của lớp Al(OH)₃ thụ động hấp thụ ion Cl⁻ trong dung dịch NaCl nên AA6061 hoà tan với tốc độ lớn hình thành các lỗ, phát sinh ăn mòn điểm. Nội dung này tương đồng với các công trình nghiên cứu trước đây [8, 116, 117]. Kích thước điểm ăn mòn, vết ăn mòn tại mặt tiếp giáp giảm khi nhiệt độ tăng, đặc biệt là các điểm ăn mòn trên AA6061 (Hình 4.57(c)). Vì vậy, tại nhiệt độ 100 °C, tốc độ ăn mòn giảm còn 0,0346 mg/mm².h. Shangbi Peng và cộng sự (2015) [151] đã nghiên cứu ăn mòn của đường ống X65 trong môi trường biển. Kết quả cho thấy, ống bị ăn mòn đều và tăng liên tục trong khoảng nhiệt độ từ 20 °C đến 65 °C. Đường ống ăn mòn cục bộ và tốc độ ăn mòn giảm dần khi nhiệt độ lớn hơn 65 °C.

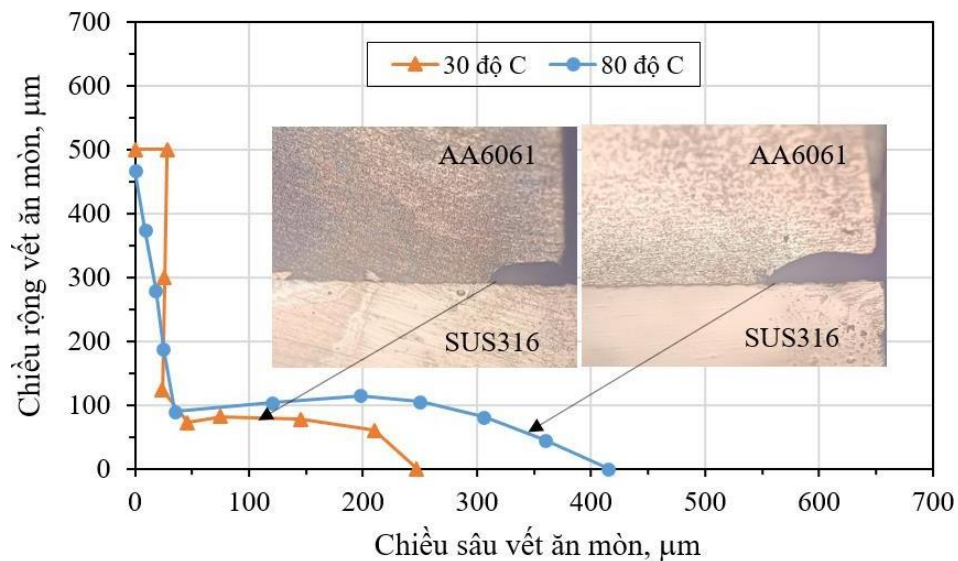


Hình 4.56. Mặt cắt ngang ăn mòn mối hàn AA6061/SUS316 ở nhiệt độ 70 °C

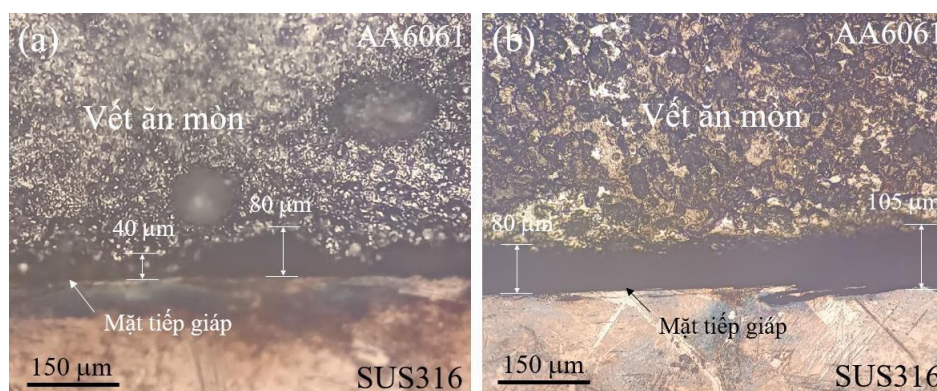


Hình 4.57. Cấu trúc ăn mòn tế vi vùng SZ tại nhiệt độ (a) 50 °C, (b) 80 °C, (c) 100 °C

Tại SZ, lớp liên kết kim loại tạo thành nhiều mảng nên ăn mòn sâu và rộng hơn. Quan sát trong Hình 4.58, chiều rộng vết ăn mòn lớn nhất tại 80 °C nhỏ hơn tại 30 °C. Tuy nhiên, dọc mặt tiếp giáp tại nhiệt độ 80 °C ăn mòn rộng và sâu hơn tại nhiệt độ 30 °C. Chiều rộng và chiều sâu ăn mòn lớn nhất tương ứng là 110 μm, 415 μm ở nhiệt độ 80 °C. Trong khi đó chiều rộng, chiều sâu ăn mòn tại nhiệt độ 30 °C giảm còn 80 μm và 247 μm. Ngoài ra, tại nhiệt độ 80 °C ăn mòn vùng SZ đồng nhất dọc mặt tiếp giáp, đạt giá trị xấp xỉ 1,5 lần so với nhiệt độ 30 °C (Hình 4.59) và được lấp đầy bằng lớp $\text{Al}(\text{OH})_3$. Vì vậy, tốc độ ăn mòn môi hàn dưới tác dụng của nhiệt độ 80 °C lớn hơn 30 °C.



Hình 4.58. Mẫu hàn ăn mòn bên cạnh vùng SZ tại nhiệt độ 30 °C và 80 °C



Hình 4.59. Chiếu rộng ăn mòn tại mặt tiếp giáp mối hàn vùng SZ dưới tác dụng của nhiệt độ khác nhau (a) 30 °C, (b) 80 °C

4.7. Đánh giá tác động của môi trường đến tốc độ ăn mòn mối hàn

Tác động của môi trường ăn mòn khác nhau như %NaCl, hiệu điện thế và nhiệt độ nên tốc độ ăn mòn mối hàn khác nhau, cụ thể như sau:

Ăn mòn thấp khi ngâm trong dung dịch 0,0 %NaCl vì AA6061 hòa tan trong H₂O hình thành lớp Al(OH)₃ có khả năng cản trở quá trình ăn mòn.

Ăn mòn mối hàn tăng khi tăng %NaCl. Thời gian ngâm trên 30 ngày, tốc độ ăn mòn mối hàn tăng không đáng kể.

Mối hàn ăn mòn lớn trong thời gian ngắn khi chịu tác động của 3,0 %NaCl và hiệu điện thế. Tốc độ ăn mòn tăng tương ứng khi tăng hiệu điện thế. Tốc độ ăn mòn mối hàn ngâm 3,0 %NaCl, tác dụng đồng thời các hiệu điện thế khác nhau như Bảng 4.9. Dưới tác dụng của hiệu điện thế 3 V, 4 V, 5 V, tốc độ ăn mòn mối hàn lớn hơn tương ứng 1.440, 2.088, 3.848 lần so với mẫu không có hiệu điện thế tác dụng.

Bảng 4.9. Tốc độ ăn mòn mối hàn ngâm 3,0 %NaCl và hiệu điện thế khác nhau

Hiệu điện thế tác dụng	0 V	3 V	4 V	5 V
Tốc độ ăn mòn (mg/mm ² .h)	0,00001040	0,0150	0,0217	0,0400

Ăn mòn mãnh liệt khi mối hàn chịu tác động cùng lúc 3,0 %NaCl, hiệu điện thế 3V và nhiệt độ. Tại nhiệt độ 70 °C tốc độ ăn mòn mối hàn lớn hơn xấp xỉ 8,4 lần so với nhiệt độ môi trường 30 °C, lớn hơn 12.000 lần so với mẫu không tác dụng hiệu điện thế, tại 30 °C (Bảng 4.10).

Bảng 4.10. Tốc độ ăn mòn mẫu ngâm 3,0 %NaCl và các môi trường ăn mòn khác

Môi trường ăn mòn	0 V	3 V	3 V, 70 °C
Tốc độ ăn mòn (mg/mm ² .h)	0,00001040	0,0150	0,1257

Chương V. 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.

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

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

Nhiệt đầu vào cao sẽ hình thành lớp IMC dày và giòn, diện tích liên kết giữa AA6061 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 do cấu trúc hạt thô hơn. Ngoài ra, vận tốc hàn không ảnh hưởng lớn đến độ cứng tấm AA6061 nhưng giá trị độ cứng của SUS316 vùng SZ tăng nhanh chóng.

Cơ chế phá hủy của mối hàn không chỉ bị tác động bởi đặc tính của lớp liên kim IMC và sự phát triển cấu trúc tế vi mà còn do bởi sự hình thành diện tích liên kết dọc theo bề mặt mối hàn.

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 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 tốc độ ăn mòn giảm.

5.2. Khuyến nghị

5.2.1. Những hạn chế của đề tài

Thời gian nghiên cứu ngắn nên còn nhiều nội dung chưa được nghiên cứu:

Chiều dày lớp IMC, lớp khuếch tán giảm, độ bền mối hàn tăng. Tuy nhiên, chiều dày lớp IMC, lớp khuếch tán giảm tại $v = 250$ mm/phút, $P = 0,35$ mm nhưng độ bền mối hàn giảm. Kết quả cho ta thấy ngoài chiều dày lớp IMC, lớp khuếch tán, đặc tính liên kết giữa AA6061 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 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 tại $v = 100$ mm/phút, $P = 0,35$ mm. Kết quả dựa vào tài liệu tham khảo của các công trình như: Newishy M. và cộng sự (2023), Xingbin H. và cộng sự (2024) nên dự đoán lớp IMC dày và giòn.

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. Đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo

Bên cạnh các nội dung chưa nghiên cứu trên, công nghệ FSW còn khá mới ở nước ta nên chưa có công trình nghiên cứu hàn chồng FSW giữa AA6061 và SUS316. Tấm lưỡng kim AA6061/SUS316 được sản xuất các thiết bị, kết cấu lĩnh vực tàu thủy, đường sắt, hàng không vũ trụ, ô tô, thực phẩm, y tế... nên cần nghiên cứu thêm các nội dung sau:

▪ Cơ tính mối hàn

- Nghiên cứu tuổi thọ, cơ chế phá hủy mối hàn AA6061/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/SUS316 trước và sau ăn mòn.

- Chụp EDS mặt tiếp giáp giữa AA6061 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.

▪ **Ăn mòn mối hàn**

- 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.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Chính phủ nước cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam (2022), Nghị định quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn - Quyết định số 06/2022/NĐ-CP.
2. Mai Đăng Tuấn (2019), *Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến cơ tính và tổ chức mối hàn ma sát khuấy cho các kết cấu phẳng bằng hợp kim nhôm biến dạng*, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh.
3. Dương Đình Hảo, Trần Hưng Trà, Vũ Công Hòa, Phí Công Thuyên (2015), “Nghiên cứu ảnh hưởng của thông số hàn đến sự phân bố nhiệt độ và cấu trúc mối hàn ma sát khuấy tấm hợp kim nhôm AA7075-T6”, *Hội nghị khoa học và công nghệ toàn quốc về cơ khí - Lần thứ IV*, tr. 252 - 260.
4. Dương Đình Hảo, Trần Hưng Trà, Vũ Công Hòa (2015), “Nghiên cứu ảnh hưởng của thông số hàn đến độ bền kéo mối hàn ma sát khuấy tấm hợp kim nhôm AA7075”, *Tạp chí khoa học, công nghệ thủy sản*, số 3, tr. 21 - 26.
5. Nhan PT., Khang TM., and Tra TH. (2019), “Investigation of AA5083 T - lap joint fabricated by friction stir welding”, *Vietnam Journal of Science and Technology*, 57(4), pp. 457 - 467.
6. Nguyễn Thúc Hà, Bùi Văn Hạnh, Võ Văn Phong (2006), *Giáo trình công nghệ hàn*, Nhà xuất bản Giáo dục, Hà Nội.
7. Ngô Lê Thông (2004), *Công nghệ hàn điện nóng chảy - tập 1: Cơ sở lý thuyết*. Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
8. Trịnh Xuân Sén (2006), *Ăn mòn và bảo vệ kim loại*, NXB Đại học quốc gia Hà Nội.
9. Nguyễn Khắc Xương, Bùi Chương, Phạm Kim Đình, Nguyễn Văn Đức, Phùng Thị Tổ Hằng, Nguyễn Hoàng Nghi, Phan Thị Minh Ngọc, Nguyễn Anh Sơn, Nguyễn Văn Tư (2016), *Vật liệu kỹ thuật (Chế tạo, cấu trúc, tính chất, lựa chọn và ứng dụng)*, Nhà xuất bản Bách Khoa Hà Nội.

Tiếng Anh

10. Kah P., Rajan R., Martikainen J., and et al. (2015), “Investigation of weld defects in friction - stir welding and fusion welding of aluminium alloys”, *Int J Mech*

Mater Eng 10(1), pp. 1 - 10.

11. Uzun H., Donne C.D., Argagnotto A., Ghidini T., and Gambaro C. (2005), "Friction stir welding of dissimilar AA6013-T4 to X5CrNi18 - 10 stainless steel", *Materials and Design* 26, pp. 41 - 46.
12. Jia H., Wu K., Sun Y., and et al. (2023), "Experimental Research on Process Optimization for High - Speed Friction Stir Welding of Aluminum Alloy", *JOM - US* 75(3), pp. 941 - 953.
13. Witik R.A., Payet J., Michaud V., and et al. (2011), "Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications", *Compos Part A-Appl S* 42(11), pp. 1694 - 1709.
14. Zhang W., and Xu J. (2022), "Advanced lightweight materials for automobiles: a review", *Mater Des* 221(27).
15. Outokumpu Oyj. (2013), *Handbook of Stainless Steel*.
16. Elga Stainless steel technical Handbook. www.elga.se.
17. Nandan R., DebRoy T., and Bhadeshia H.K.D.H. (2008), "Recent advances in friction stir welding - process, weldment structure and properties", *Progress in Materials Science* 53(6), pp. 980 - 1023.
18. Sengupta B., Shekhar S., and Kulkarni K.N. (2017), "A novel ultra - high strength and low - cost as - cast titanium alloy". *Mater Sci Eng A* 696, pp. 478 - 481.
19. Ghosh M., Gupta R.K., and Husain M.M. (2014), "Friction stir welding of stainless steel to Al alloy: effect of thermal condition on weld nugget microstructure", *Metall Mater Trans A* 45, pp. 854 - 863.
20. Yang J., Oliveira J.P., Li Y., Tan C., Gao C., Zhao Y., and et al. (2022), "Laser techniques for dissimilar joining of aluminum alloys to steels: A critical review", *Journal of Materials Processing Technology* 301.
21. Kumar Arya P., Gupta G., and Kumar Rajput A. (2016), "A Review on Friction Stir Welding for Aluminium Alloy to Steel", *International Journal of Scientific & Engineering Research* 7(5), pp. 119 - 125.
22. Zhang H., and Liu J. (2011), "Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy/stainless steel lap joints fabricated by MIG welding - brazing process", *Materials Science and Engineering A* 528(19), pp. 6179 - 6185.

23. Shah L.H., Akhtar Z., and Ishak M. (2013), "Investigation of aluminum - stainless steel dissimilar weld quality using different filler metals", *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME)* 8(1), pp. 1121 - 1131.
24. Bang H.S., Bang H.S., Jeon G.H., and et al. (2012), "Gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials Al6061-T6 aluminum alloy and STS304 stainless steel", *Mater. Des* 37, pp. 48 - 55.
25. Zheng Q., Feng X., Shen Y., and et al. (2016), "Dissimilar friction stir welding of 6061Al to 316 stainless steel using Zn as a filler metal", *J Alloy Compd* 686, pp 693 - 701.
26. Mahto R.P., Bhoje R., Pal S.K, Joshi H.S, and Das S. (2016), "A study on mechanical properties in friction stir lap welding of AA6061-T6 and AISI304", *Materials Science and Engineering A* 652, pp. 136 - 144.
27. Kimapong K., and Watanabe T. (2005), "Lap joint of A5083 aluminum alloy and SS400 steel by friction stir welding", *Materials Transactions* 46(4), pp. 835 - 841.
28. Elrefaey A., Gouda M., Takahashi M., and Ikeuchi K. (2005), "Characterization of Aluminum/Steel Lap Joint by Friction Stir Welding", *Journal of Materials Engineering and Performance* 14(1), pp. 10 - 17.
29. Dehghani M., Amadeh A., and Mousavi S.A.A.A. (2013), "Investigations on the effects of friction stir welding parameters on intermetallic and defect formation in joining aluminum alloy to mild steel", *Materials Design* 49, pp. 433 - 441.
30. Derazkola HA., Aval HJ., and Elyasi M. (2015), "Analysis of process parameters effects on dissimilar friction stir welding of AA1100 and A441 AISI steel", *Science of Technology Welding Join* 20(7), pp. 553 - 562.
31. Muhamad MR., Jamaludin MF., Yusof F., Mahmoodian R., Morisada Y., Suga T., and Fujii SH. (2020), "Effects of Al-Ni powder addition on dissimilar friction stir welding between AA7075-T6 and 304L", *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik* 51(9), pp. 1274 - 1284.
32. Newishy M., Jaskari M., Jarvenpaa A., Fujii H., and Abdel-Aleem HA. (2023), "Friction Stir Welding of Dissimilar Al 6061-T6 to AISI 316 Stainless Steel: Microstructure and Mechanical Properties", *Materials (Basel)* 16(11).
33. Xingbin H., Xian L., Yuxin P., Chuansong X., Sheng L., and Wei L (2024), "Effect

of pre - heat treatment and welding parameters on microstructure and mechanical properties of 6061Al/316L steel FSLW joint”, *Materials Science and Technology*, pp. 1 - 22.

34. Mahto R.P., Kumar R., Pal SK., and Panda SK. (2018), “A comprehensive study on force, temperature, mechanical properties and micro - structural characterizations in friction stir lap welding of dissimilar materials (AA6061-T6 & AISI304)”, *Journal of Manufacturing Processes* 31, pp. 624 - 639.
35. Campanella D., Russo Spina P., Buffa G., and Fratini L., (2016). “Dissimilar Al/steel friction stir welding lap-joints for automotive applications”, *American Institute of Physics*, pp. 1 - 7.
36. Ermolaeva N.S., Castro M.B.G., and Kandachar PV. (2004), “Materials selection for an automotive structure by integrating structural optimization with environmental impact assessment”, *Materials and Design* 25(8), pp. 689 - 698.
37. Dillthey U., and Stein L. (2006), “Multimaterial car body design: challenge for welding and joining”, *Science and Technology of Welding and Joining* 11(2), pp. 135 - 142.
38. Campanella D., Buffa G., and Fratini L. (2021), “Friction Stir Welding of dissimilar aluminum - steel joints for the shipbuilding industry”, *Esaform 2021. MS05 (Joining)*, pp. 1 - 10.
39. Movahedi M., Kokabi A.H., Seyed Reihani S.M., and Najafi H. (2011), “Mechanical and microstructural characterization of A1-5083/St-12 lap joints made by friction stir welding”, *Procedia Eng* 10(3), pp. 297 - 303.
40. Zandsalimi S., Heidarzadeh A., and Saeid T. (2018), “Dissimilar friction-stir welding of 430 stainless steel and 6061 aluminum alloy: Microstructure and mechanical properties of the joints”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 233(9), pp. 1791 - 1801.
41. Zheng Q., Feng X., Shen Y., Huang G., and Zhao P. (2016), “Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to 316 stainless steel using Zn as a filler metal”, *Journal of Alloys and Compounds* 686, pp. 693 - 701.
42. Huy HH., Hao DD., Quan MN., and 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.

43. Batistão BF., Bergmann LA., Gargarella P., Guedes de Alcântara N., dos Santos JF., and Klusemann B. (2020), “Characterization of Dissimilar Friction Stir Welded Lap Joints of AA5083 and GL D36 Steel”, *Journal of Materials Research and Technology* 9(6), pp. 15132 - 15142.
44. Mishra R.S., and Ma Z.Y. (2005), “Friction stir welding and processing”, *Mater Sci Eng R Rep* 50(1 - 2), pp. 1 - 78.
45. Liu S., Wan G., Shen X., Li X., Peng Y., Xia C., Zhao Y., Hu X., and Long W. (2023), “The microstructure and mechanical properties of aluminum/steel welded joint by FSLW”, *Mater Sci Tech - Lond* 39(16), pp. 2491 - 2500.
46. Mao Y., Ni Y., Xiao X., Qin D., and Fu L. (2020), “Microstructural characterization and mechanical properties of micro friction stir welded dissimilar Al/Cu ultra - thin sheets”, *Journal of Manufacturing Processes* 60(11), pp. 356 - 365.
47. Dressler U., Biallas G., and Alfaro Mercado U. (2009), “Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminium alloy AA2024-T3”, *Materials Science and Engineering* 526(1 - 2), pp. 113 - 117.
48. Zuo L., Zuo D., Zhu Y., and et al. (2018), “Acoustic emission analysis for tool wear state during friction stir joining of SiCp/Al composite”, *Int J Adv Manuf Tech* 99, pp. 1361 - 1368.
49. Ramachandran K.K., Murugan N., and Shashi Kumar S. (2015), “Influence of tool traverse speed on the characteristics of dissimilar friction stir welded aluminium alloy, AA5052 and HSLA steel joints”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15(4), pp. 822 - 830.
50. Dehghani M., Mousavi S.A.A.A, and Amadeh A. (2013), “Effects of welding parameters and tool geometry on properties of 3003-H18 aluminum alloy to mild steel friction stir weld”, *Trans Nonferrous Met Soc China* 23(7), pp. 1957 - 1965.
51. Pourali M., Abdollah - Zadeh A., Saeid T., and Kargar F. (2017), “Influence of welding parameters on intermetallic compounds formation in dissimilar steel/aluminum friction stir welds”, *Journal of Alloys and Compounds* 715, pp. 1 - 8.
52. Jabraeili R., Jafarian H., Khajeh R., and et al. (2021), “Effect of FSW process parameters on microstructure and mechanical properties of the dissimilar AA2024

Al alloy and 304 stain less steel joints”, *Mater Sci Eng A* 814(3).

53. Kim Y., Kim J., and Kim I. (2014), “Effect of process parameters on optimum welding condition of DP590 steel by friction stir welding”, *J Mech Sci Technol* 28 (12), pp. 5143 - 5148.
54. Liu T., Gao S., Ye W., and et al. (2023), “Achievement of high - quality joints and regulation of intermetallic compounds in ultrasonic vibration enhanced friction stir lap welding of aluminum/steel”, *J Mater Res Technol* 25, pp. 5096 - 5109.
55. Geng P., Morimura M., Ma H., and et al. (2022), “Elucidation of intermetallic compounds and mechanical properties of dissimilar friction stir lap welded 5052 Al alloy and DP590 steel”, *J Alloy Compd* 906(4).
56. Mehta K.P. (2018), “A review on friction - based joining of dissimilar aluminum steel joints”, *J Mater Res* 34(1), pp. 1 - 19.
57. Chen S., Zhai Z., Huang J., and et al. (2016), “Interface microstructure and fracture behavior of single/dual-beam laser welded steel - Al dissimilar joint produced with copper interlayer”, *Int J Adv Manuf Tech* 82(1), pp. 631 - 643.
58. Moradi M., Aval H., and Jamaati R. (2017), “Effect of pre and post welding heat treatment in SiC - fortified dissimilar AA6061-AA2024 FSW butt joint”, *J Manuf Process*, 30, pp. 97 - 105.
59. Xu X., Ren X., Hou H., and et al. (2021), “Effects of cryogenic and annealing treatment on microstructure and properties of friction stir welded TA15 joints”, *Mater Sci Eng A* 804, pp. 1 - 6.
60. Baghdadi A.H., Rajabi A., Selamat N.F.M, and et al. (2019), “Effect of post - weld heat treatment on the mechanical behavior and dislocation density of friction stir welded Al6061[J]”, *Mater Sci Eng A* 754, pp. 728 - 734.
61. Singh P., Deepak D., and Singh Brar G. (2020), “Comparative evaluation of aluminum and stainless steel dissimilar welded joints”, *Materials Today: Proceedings* 33(3), pp. 1488 - 1492.
62. Baddoo N.R. (2008), “Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities”, *Journal of Constructional Steel Research* 64, pp. 1199 - 1206.
63. Guan Q., Long J., Yu P., and et al. (2019), “Effect of steel to aluminum laser

welding parameters on mechanical properties of weld beads”, *Opt Laser Technol* 111, pp. 387 - 394.

64. Mecó S., Pardal G., Ganguly S., Williams S., and McPherson N. (2015), “Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminium joints for thick structural components”, *Optics and Lasers in Engineering* 67, pp. 22 - 30.
65. Chen N., Wang H.P., Carlson B.E., and et al. (2017), “Fracture mechanisms of Al/steel resistance spot welds in lap shear test”, *J Mater Process Technol* 243, pp. 347 - 354.
66. Yu Pan T. (2007), “Friction Stir Spot Welding (FSSW) - A Literature Review. Welding & Joining & Fastening & Friction Stir Welding”, SP - 2139, pp. 1 - 12.
67. Pan B., Sun H., Shang S., Banu M., Wang P., Carlson B.E., and et al. (2022), “Understanding formation mechanisms of intermetallic compounds in dissimilar Al/steel joint processed by resistance spot welding”, *Journal of Manufacturing Processes* 83, pp. 212 - 222.
68. Cai W., Wang P.C., and Yang W. (2005), “Assembly dimensional prediction for selfpiercing riveted aluminum panels”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45(6), pp. 695 - 704.
69. Abe Y., Kato T., and Mori K. (2006), “Joinability of aluminum alloy and mild steel sheets by self - piercing rivet”, *Journal of Materials Processing Technology* 177(1 - 3), pp. 417 - 421.
70. Yan W.M., Xie Z.Q., Yu C., Song L.L., and He H.X. (2017), “Experimental investigation and design method for the shear strength of self - piercing rivet connections in thin - walled steel structures”, *Journal of Constructional Steel Research* 133, pp. 231 - 240.
71. Wan L., and Huang Y. (2018), “Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys and steels: a review”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 99, pp. 1781 - 1811.
72. Yang Y., Luo Z., Zhang Y., and Su J. (2024), “Dissimilar welding of aluminium to steel: A review”, *Journal of Manufacturing Processes* 110, pp. 376 - 397.
73. Güven İ., Seçil E., and Gürel Ç. (2014), “Effects of temper condition and post weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of friction stir butt

welded AA7075 Al alloy plates”, Int J Adv Manuf Tech 70(1), pp. 201 - 213.

74. Gibson B.T., Lammlein D.H., Prater T.J., Longhurst W.R., Cox C.D., Ballun M.C., Dharmaraj K.J. Cook G.E., Strauss A.M. (2013), “Friction stir welding: Process, automation, and control” Journal of Manufacturing Processes JMP17, pp. 1 - 18.
75. Gite R.A., Loharkar P.K., Shimpi R. (2019), “Friction stir welding parameters and application: A review”, Materials Today: Proceedings, pp. 1 - 5.
76. Mukherjee A., Patel N.V., Gurjar K.C. (2017), “Review paper on friction stir welding and its impact on environment”, International Research Journal of Engineering and Technology, pp. 1481 - 1490.
77. Amini A., Asadi P., P. Zolghadr. (2014), “Friction stir welding applications in industry”, Advances in Friction Stir Welding and Processing, pp. 671 - 722.
78. Kallee S.W. (2010), *Industrial applications of friction stir welding*, pp. 118 - 163.
79. Mishra R.S., Mahoney M.W. (2007), “Friction stir welding and processing”, ASM International, Materials Park, OH, pp. 297 - 302.
80. Mehta K.P. (2018), “A review on friction - based joining of dissimilar aluminum steel joints”, J Mater Res 34(1), pp. 1 - 19.
81. Chaudhary K. (2017), “A Review on Advance Welding Processes”, International Journal of Engineering and Techniques 3(6), pp. 86 - 96.
82. Senkov O.N., Mahaffey D.W., Semiatin S.L., and Woodward C. (2015), “Site - dependent tension properties of inertia friction - welded joints made from dissimilar Ni - based superalloys (superalloys LHSR and Mar - M247)”, Journal of Materials Engineering and Performance 24(3), pp. 1173 - 1184.
83. Huang Z.W., Li H.Y., Preuss M., Karadge M., Bowen P., Bray S., and Baxter G. (2007), “Inertia friction welding dissimilar Nickel - based superalloys alloy 720Li to IN718”. Metall Mater Trans A 38, pp. 1608 - 1619.
84. Yilbas B.S., Sahin A.Z., Kahraman N. and Al-Garni A.Z. (1995), “Friction welding of St-A1 and Al-Cu materials”, Journal of Materials Processing Technology 49, pp. 431 - 443.
85. Fukumoto S., Tsubakino H., Okita K., Aritoshi M. and Tomita T. (1998), “Microstructure of friction weld interface of 1050 aluminium to austenitic stainless steel”, Materials Science and Technology 14, pp. 333 - 338.

86. Su Y., Hua X., Yixiong W., Zhang Y., and Guo Y. (2015), "Characterization of intermetallic compound layer thickness at aluminum - steel interface during overlaying", *Materials and Design* 78, pp. 1 - 4.
87. Venugopal T., Rao K.S., and Rao K.P. (2004), "Studies on friction stir welded AA7075 aluminum alloy", *Trans Indian Inst Met* 57(6), pp. 659 - 663.
88. Wang G., Zhao Y., and Hao Y. (2018), "Friction stir welding of high - strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing", *Journal of Materials Science & Technology* 34(1), pp. 73 - 91.
89. Padovani C.G., Davenport A.J., Connolly B.J., Williams S.W., Groso A., Stampanoni M., and Bellucci F. (2008), "Corrosion and protection of friction stir welds in aerospace aluminium alloys", *La metallurgia Italiana* 100(9), pp. 29 - 42.
90. Sinclair P.C., Longhurst W.R., Cox C.D., Lammlein D.H., Strauss A.M., and Cook G. E. (2010), "Heated friction stir welding, An experimental and theoretical investigation into How preheating influences process forces", *Materials and manuf. Process* 25(11), pp. 1283 - 1291.
91. Chao Y.J., Qi X., and Tang W. (2003), "Heat transfer in friction stir welding experimental, and numerical studies", *Transactions of the ASME*, pp. 138 - 145.
92. Heidarzadeh A., Mironov S., Kaibyshev R., and et al (2021). "Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution", *Progress in Materials Science* 117, pp. 1 - 68.
93. Arora A., De A., and DebRoy T. (2011), "Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter", *Scripta Materialia* 64(1), pp. 9 - 12.
94. Elangovan K., and Balasubramanian V. (2008), "Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy", *Materials and Design* 29(2), pp. 362 - 373.
95. Rai R., De A., Bhadeshia H.K.D.H. and DebRoy T. (2011), "Review: Friction Stir Welding Tools", *Science and Technology of Welding and Joining* 16(4), pp. 325 - 342.
96. Thomas W.M., and Staines D.G. (2002), "Friction Stir Welding - Tools and developments", pp. 1 - 22. <https://www.researchgate.net/publication/273057191>.
97. Kim Y.G., Fujii H., Tsumura T., Komazaki T., and Nakata K. (2006), "Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy", *Mater Sci Eng*

A, 415(1-2), pp. 250 - 254.

98. Hartl R., Vieltorf F., and Zaeh M.F. (2020). "Correlations between the Surface Topography and Mechanical Properties of Friction Stir Welds", *Metals* 2020, 10(7), pp. 1 - 14.
99. Leonard A.J., and Lockyer S.A. (2003), "Flaws in friction stir welds. In 4th International Symposium on Friction Stir Welding", 16, pp. 1 - 10. Park City, Utah, USA.
100. Agudo L., Eyidi D., Schmaranzer C.H., Arenholz E., Jank N., Bruckner J., and et al. (2007), "Intermetallic Fe_xAl_y - phases in a steel/Al alloy fusion weld", *J Mater Sci* 42, pp. 4205 - 4214.
101. Wang T., Komarasamy M., Liu K., and Mishra R.S. (2018), "Friction stir butt welding of strain - hardened aluminum alloy with high strength steel", *Mater. Sci. Eng. A* 737, pp. 85 - 89.
102. Shen Z., Chen Y., Haghshenas M., and Gerlich A.P. (2015), "Role of welding parameters on interfacial bonding in dissimilar steel/aluminum friction stir welds", *Engineering Science and Technology* 18(2), pp. 270 - 277.
103. Liu X., Lan S., and Ni J. (2014), "Analysis of process parameters effects on friction stir welding of dissimilar aluminum alloy to advanced high strength steel", *Materials & Design* 59, pp. 50 - 62.
104. Xu P., Hua X., Shen C., Huang Y., Li F., and Zhang Y. (2022), "Dynamic growth model of Fe₂Al₅ during dissimilar joining of Al to steel using the variable polarity cold metal transfer (VP-CMT)", *Journal Material Processes Technology* 302.
105. Wang P., Chen X., Pan Q., Madigan B., and Long J. (2016), "Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview", *Int J Adv Manuf Technol*, 87, pp. 3081 - 3090.
106. Zhang D., Wen K., Song H., Zhang G., Xu H., Xia J., and et al. (2023), "Effect of high entropy alloy as the interlayer on the interfacial microstructure and mechanical property of Al/steel bimetal by compound casting", *J Mater Res Technol*, 25, pp. 1709 - 1718.
107. Singh J., Arora K.S., and Shukla D.K. (2019), "Dissimilar MIG-CMT weld-brazing of aluminium to steel: a review", *J Alloys Compd*, 783, pp. 753 - 764.
108. Zhang T., Wang K., Qiao K., Wu B., Liu Q., Han P., and et al. (2023), "Evolution

mechanism of intermetallic compounds and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded QP980 steel and 6061 aluminum alloy”, *Mater Charact* 202.

109. Lan S., Liu X., and Ni J. (2016), “Microstructural evolution during friction stir welding of dissimilar aluminum alloy to advanced high strength steel”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol* 82, pp. 2183 - 2193.
110. Bozzi S., Helbert-Etter A.L., Baudin T., Criqui B., and Kerbiguet J.G. (2010), “Intermetallic compounds in Al 6016/IF - steel friction stir spot welds”, *Materials Science and Engineering: A*, 527(16), pp. 4505 - 4509.
111. Chen T. (2009), “Process parameters study on FSW joints of dissimilar metals for aluminium steel”, *J Mater Sci*, (44), pp. 2573 - 2580.
112. Ghosh M., Kar A., Kumar K., and Kailas S. (2012), “Structural characterization of reaction zone for friction stir welded aluminum-stainless steel joint”, *Mater Technol Adv Perform Mater*, 27(2), pp. 169 - 172.
113. Hatano R., Ogura T., Matsuda T., Sano T., and Hirose A. (2018), “Relationship between intermetallic compound layer thickness with deviation and interfacial strength for dissimilar joints of aluminum alloy and stainless steel”, *Materials Science and Engineering: A*, 735, pp. 361 - 366.
114. Baroux B. (1995), “The pitting corrosion of stainless steel (Further insights). Corrosion mechanisms in theory and practice”, Marcel Dekker Inc. NY, 1995. Ch9, pp. 265 - 309.
115. Anaman S.Y., Cho H.H., Das H., Il Baik S., Hong S.T., and Sook Lee J. (2019), “Galvanic Corrosion Assessment of Friction Stir Butt Welded Joint of Aluminum and Steel Alloys”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology Technology*, 7(4), pp. 905 - 911.
116. Davis JR. (1999), *Corrosion of Aluminium and Aluminium Alloys*. ASM International.
117. Szklarska Z., Smialowska. (2004), “Pitting corrosion of Aluminum”, *Corrosion Science*, 46, pp. 893 - 902.
118. Majeed T., Mehta Y., and Siddiquee A.N. (2021), “Precipitation - dependent corrosion analysis of heat treatable aluminum alloys via friction stir welding, a

review”, Journal of Mechanical Engineering Science, 235(24), pp. 1 - 27.

119. Paglia C.S., and Buchheit R.G. (2008), “A look in the corrosion of aluminum alloy friction stir welds”, Scripta Materialia, 58(5), pp. 383 - 387.
120. Anton Savio Lewise K., Edwin Raja Dhas J. and Pandiyarjan R. (2022), Corrosion Behavior of FSSWed AA2024 and AA7075 Dissimilar Aluminum - Alloy. In book: *Recent Advances in Materials Technologies*, pp. 225 - 232.
121. Gharavi F., Matori KA., Yunus R., Othman NK., and Fadaeifard F. (2016), “Corrosion evaluation of friction stir welded lap joints of AA6061 - T6 aluminum alloy”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 26(3), pp. 684 - 696.
122. Jariyaboon M., Davenport A.J., Ambat R., Connolly B.J., Williams S.W. and Price D.A. (2006), “Corrosion of a dissimilar friction stir weld joining aluminium alloys AA2024 and AA7010”, Corrosion Engineering, Science and Technology, 41(2), pp. 135 - 142.
123. Ratna Sunil B. and Pradeep Kumar Reddy G. (2016), “Corrosion behavior of friction stir welded AZ31B Mg alloy - Al6063 alloy joint”, Ratna Sunil & Pradeep Kumar Reddy, Cogent Engineering, 3(1), pp. 1 - 6.
124. Niu PL., Li WY., Chen YH., Liu QP., and Chen DL. (2022), “Base material location dependence of corrosion response in friction stir welded dissimilar 2024 to 5083 aluminum alloy joints”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 32(7), pp. 2164 - 2176.
125. ASTM E92. (2023), Edition-Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials.
126. Palit S. (2018), Recent Advances in Corrosion Science: A Critical Overview and a Deep Comprehension, In book: *Direct Synthesis of Metal Complexes*, pp. 379 - 411.
127. Zhan H., Mol J.M.C., Hannour F., Zhuang L., Terryn H., and de Wit J.H.W. (2008), “The influence of copper content on intergranular corrosion of model AlMgSi(Cu) alloys [J]”, Materials and Corrosion, 59(8), pp. 670 - 675.
128. Davis JR. (2006), *Corrosion of Weldments*. ASM International.
129. Jariyaboon M., Davenport A.J., Ambat R., Connolly B.J., Williams S.W., and Price D.A. (2007), “The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024-T351”, Corrosion Science, 49(2), pp. 877 - 909.

130. Annual Book of ASTM Standards (2004): General method & instrumentation.
131. ASTM G71 - 81, (2003), Standard Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes.
132. ASTM G31 - 72, (1999), Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals.
133. ASTM G1, (1999), Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens. G1 - 90.
134. Matsuda T., Ogaki T., Hayashi K., Iwamoto C., Nozawa T., Ohata M., and Hirose A. (2022), "Fracture dominant in friction stir spot welded joint between 6061 aluminum alloy and galvanized steel based on microscale tensile testing", *Materials and Design* 213, pp. 1 - 11.
135. Liu J., Wu B., Wang Z., Li CW., Chen G., and Miao Y. (2023), "Microstructure and mechanical properties of aluminum - steel dissimilar metal welded using arc and friction stir hybrid welding", *Materials and Design* 225(1).
136. Kobayashi S., and Yakou T. (2002), "Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion - treatment", *Materials Science and Engineering A* 338(1 - 2), pp. 44 - 53.
137. Yazdipour A., and Heidarzadeh A. (2016), "Dissimilar butt friction stir welding of Al 5083 - H321 and 316L stainless steel alloys", *Int J Adv Manuf Technol* 87(9 - 12), pp. 3105 - 3112.
138. Coelho R.S., Kostka A., Santos J.F.D. and Pyzalla A.R. (2012), "Friction - stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure", *Materials Science & Engineering A* 556, pp. 175 - 183.
139. Supreeth G., Ravi S.H., Charlie S., and et al (2022), "Friction stir welding of SS316 LN and nitronic 50 jacket sections for application in superconducting fusion magnet systems", *Mater Des* 221, pp. 1 - 11.
140. Kalinenko A., Vysotskii I., Malopheyev S., Mironov S., and Kaibyshev R. (2021), "Relationship between welding conditions, abnormal grain growth and mechanical performance in friction - stir welded 6061-T6 aluminum alloy", *Materials Science and Engineering A* 817, pp. 1 - 13.

141. Meng X., Huang Y., Cao J., Shen J., and Dos Santos J.F. (2021), "Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding", *Progress in Materials Science* 115, pp. 1 - 224.
142. Bouché K., Barbier F., and Coulet A. (1998), "Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium", *Materials Science and Engineering A*, 249(1 - 2), pp.167 - 75.
143. Bouayad A., Gerometta Ch., Belkebir A., and Ambari A. (2003), "Kinetic interactions between solid iron and molten aluminium", *Materials Science and Engineering A*, 363(1 - 2), pp. 53 - 61.
144. Madhavan S., Kamaraj M., Vijayaraghavan L., and Srinivasa Rao K. (2016), "Microstructure and mechanical properties of aluminium/steel dissimilar weldments: effect of heat input", *Materials Science and Technology*, 33(2), pp. 200 - 209.
145. Kar A., Vicharapu B., Morisada Y., and Fujii H. (2020), "Elucidation of interfacial microstructure and properties in friction stir lap welding of aluminium alloy and mild steel", *Materials Characterization* 168(4), pp. 1 - 25.
146. Darmadi D.B., Mentary A., Yusup E.M., and Mahzan S. (2019), "Evaluating The Effect of The Pin's Length to The Strength of Double Sides Friction Stir Welded Aluminum", *International journal of integrated engineering*, 11(5), pp. 1 - 11.
147. Tang W., Guo X., McClure J.C., and Murr L.E. (1998), "Heat Input and Temperature Distribution in Friction Stir Welding", *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, 7, pp. 163 - 172.
148. Yilmaz M., Col M., and Acet M. (2003), "Interface properties of aluminum/steel friction - welded components", *Materials Characterization*, 49, pp. 421 - 429.
149. Chen Y.C., and Nakata K. (2008), "Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys", *Scripta Materialia*, 58, pp. 433 - 436.
150. Wolfensberger K. (1998), "The european aluminium industry in world - wide perspective. Aluminium", 74(9), pp. 564 - 574.
151. Peng S., and Zeng Z. (2015), "An experimental study on the internal corrosion of a subsea multiphase pipeline", *Petroleum* 1, pp. 75 - 81.