

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN



BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI KHOA HỌC CÔNG NGHỆ CẤP BỘ

**NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ GIA CÔNG BIẾN DẠNG
DẼO THEO BƯỚC (INCREMENTAL SHEET FORMING - ISF) CÓ
SỰ TRỢ GIÚP CỦA RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM TRONG GIA CÔNG
CHI TIẾT DẠNG TẤM VỎ TRONG SẢN XUẤT Ô TÔ.**

Mã số: B2022-TNA-26

Chủ nhiệm đề tài: TS. Hồ Ký Thanh

Thái Nguyên – Năm 2024

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN

BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI KHOA HỌC CÔNG NGHỆ CẤP BỘ

**NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ GIA CÔNG BIẾN DẠNG
DẪO THEO BƯỚC (INCREMENTAL SHEET FORMING - ISF) CÓ
SỰ TRỢ GIÚP CỦA RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM TRONG GIA CÔNG
CHI TIẾT DẠNG TẤM VỎ TRONG SẢN XUẤT Ô TÔ.**

Mã số: B2022-TNA-26

Xác nhận của cơ quan chủ trì

Chủ nhiệm đề tài

TS. Hồ Ký Thanh

Thái Nguyên – Năm 2024

DANH SÁCH THÀNH VIÊN THAM GIA ĐỀ TÀI

STT	Họ và tên	Đơn vị công tác	Vai trò
1	TS. Hồ Ký Thanh	Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên	Chủ nhiệm
2	TS. Vũ Văn Đam	Đại học Thái Nguyên	Thư ký
3	TS. Chu Ngọc Hùng	Trường Đại học Kinh tế - Công nghệ Thái Nguyên	Thành viên
4	ThS. Ngô Quốc Huy	Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên	Thành viên
5	TS. Ngô Minh Tuấn	Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên	Thành viên
6	TS. Trần Thế Long	Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên	Thành viên
7	ThS. Hà Bách Tứ	Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên	Thành viên
8	ThS. Trần Anh Đức	Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên	Thành viên
9	ThS. Nguyễn Thuấn	Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên	Thành viên
10	TS. La Ngọc Tuấn	Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh	Thành viên

ĐƠN VỊ PHỐI HỢP CHÍNH

Công ty TNHH Chế tạo máy Thái An – Tổ 6, Phường Tích Lương, TP. Thái Nguyên, tỉnh Thái Nguyên.

MỤC LỤC

MỤC LỤC	i
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU.....	iv
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ	vi
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT	xi
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU	xii
THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU	xiii
MỞ ĐẦU	1
1. Tính cấp thiết của đề tài.....	1
2. Mục tiêu nghiên cứu	2
3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu:.....	3
4. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu:.....	3
5. Nội dung và kết quả nghiên cứu:.....	4
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ LĨNH VỰC NGHIÊN CỨU	5
1.1. Gia công biến dạng dẻo theo bước (Incremental Sheet Forming - ISF)	5
1.2. Rung động siêu âm và các ứng dụng phổ biến của rung động siêu âm.....	11
1.2.1. Rung động siêu âm và phương pháp tạo rung động siêu âm.....	11
1.2.2. Các thành phần chính của hệ thống công tác siêu âm	14
1.2.3. Ứng dụng của rung động siêu âm trong sản xuất, đời sống	17
1.3. Các nghiên cứu ứng dụng của rung động siêu âm trong gia công biến dạng dẻo và gia công biến dạng dẻo theo bước	18
1.3.1. Các nghiên cứu khai thác rung động siêu âm trợ giúp gia công áp lực	18
1.3.2. Gia công biến dạng dẻo theo bước có rung động siêu âm trợ giúp (Ultrasonic-assisted Incremental Sheet Forming – UISF).....	22
1.4. Kết luận Chương 1.....	24
CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT.....	26
2.1. Các thông số cơ bản khi gia công biến dạng theo bước	26
2.1.1. Thông số hình học và thông số công nghệ	26
2.1.2. Mối quan hệ giữa các thông số hình học - thông số công nghệ và ảnh hưởng đến quá trình biến dạng dẻo	27
2.1.3. Các thành phần lực tác dụng lên tấm và dụng cụ	33

2.2. Rung động siêu âm hỗ trợ gia công biến dạng dẻo theo bước	35
2.3. Cơ sở thiết kế dụng cụ biến dạng dẻo.....	38
2.4. Kết luận Chương 2.....	39
CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ, CHẾ TẠO HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM.....	41
3.1. Yêu cầu của hệ thống thí nghiệm	41
3.2. Thiết kế, chế tạo bộ công tác siêu âm phục vụ nghiên cứu đề tài	41
3.2.1. Lựa chọn bộ phát rung.....	41
3.2.2. Lựa chọn bộ nguồn phát điện siêu âm.....	43
3.2.3. Lựa chọn máy gia công	45
3.2.4. Thiết kế, chế tạo dụng cụ biến dạng dẻo	47
3.2.5. Lựa chọn cảm biến đo lực	52
3.2.6. Thiết kế các chi tiết, cụm chi tiết kẹp chặt phôi	53
3.2.7. Lắp đặt, hoàn thiện hệ thống thí nghiệm và mô hình đo các thông số	56
3.2.8. Thử nghiệm hệ thống.....	57
3.3. Kết luận Chương 3.....	60
CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU, ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM VÀ CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN CÁC THÀNH PHẦN LỰC BIẾN DẠNG Dẻo VÀ CHẤT LƯỢNG TẠO HÌNH SẢN PHẨM DẠNG TẮM VỎ TẠO HÌNH BẰNG CÔNG NGHỆ UISF	61
4.1. Lựa chọn phôi nghiên cứu	61
4.2. Thí nghiệm khảo sát, đánh giá ảnh hưởng của rung động siêu âm đến chất lượng bề mặt sản phẩm và thành phần lực tạo hình.....	62
4.2.1. Xây dựng mô hình thực nghiệm phục vụ nghiên cứu	62
4.2.2. Thiết kế thí nghiệm.....	63
4.2.3. Kết quả thí nghiệm khảo sát, đánh giá ảnh hưởng của rung động siêu âm đến chất lượng bề mặt sản phẩm và thành phần lực tạo hình	64
4.3. Thí nghiệm khảo sát, đánh giá ảnh hưởng các thông số công nghệ đến các thành phần lực tạo hình khi gia công theo biên dạng được thiết kế trước	71
4.3.1. Chuẩn bị phôi thí nghiệm và xây dựng mô hình thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng các tham số đến các thành phần lực tạo hình	72
4.3.2. Kết quả thí nghiệm khảo sát mối quan hệ giữa các thành phần lực biến dạng với	

các thông số tạo hình khi gia công bằng ISF	74
4.4. Xây dựng bài toán tối ưu giảm thành phần lực trong tạo hình sản phẩm tấm, vỏ bằng công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước có sự hỗ trợ của rung động siêu âm	76
4.4.1. Cơ sở xây dựng bài toán tối ưu.....	76
4.4.2. Xây dựng mô hình tiến dụng cụ	77
4.4.3. Thiết kế thí nghiệm.....	78
4.4.4. Kết quả dữ liệu lực biến dạng dẻo theo thời gian.....	79
4.4.5. Kết quả thí nghiệm so sánh	82
4.4.6. Đánh giá ảnh hưởng của thông số công nghệ đến lượng giảm F_y , F_z	84
4.4.7. Kết quả tối ưu	89
4.5. Đánh giá chất lượng sản phẩm sau khi tạo hình bằng phương pháp UISF	96
4.5.1. Kết quả thực nghiệm gia công một số sản phẩm điển hình.....	96
4.5.2. Kết quả đánh giá sai số hình dạng và kích thước sản phẩm.....	99
4.5.3. Kết quả đánh giá biến mỏng thành tấm sau khi tạo hình	101
4.6. Kết luận Chương 4.....	102
KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT	104
Kết luận.....	104
Đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo.....	104
TÀI LIỆU THAM KHẢO	106

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 2.1. Góc tạo hình cực đại của một số vật liệu khi tạo hình bằng ISF	29
Bảng 2.2. Bước tiến dụng cụ biến dạng theo phương dọc trục khi tạo hình bằng ISF .	30
Bảng 2.3. Tốc độ tiến dụng cụ biến dạng khi tạo hình bằng ISF	30
Bảng 2.4. Đường kính dụng cụ biến dạng dẻo khi tạo hình bằng ISF	32
Bảng 2.5. Tốc độ quay dụng cụ biến dạng dẻo khi tạo hình bằng ISF.....	32
Bảng 2.6. Tóm tắt các thông số công nghệ trong thực nghiệm tạo hình bằng UISF ...	37
Bảng 3.1. Thông số của bộ phát rung siêu âm YP-5525-4Z	42
Bảng 3.2. Thông số của bộ phát rung siêu âm Herrmann KHS20-IP50-L	43
Bảng 3.3. Thông số kỹ thuật của nguồn phát điện siêu âm.....	44
Bảng 3.4. Thông số kỹ thuật của máy tiện Takisawa TSL-550	45
Bảng 3.5. Các thông số kỹ thuật máy phay CNC sau khi cải tạo.....	46
Bảng 3.6. Thông số kỹ thuật của cảm biến lực Kistler 9257B.....	53
Bảng 4.1. Thành phần các nguyên tố hóa học của hợp kim nhôm Al 5052.....	61
Bảng 4.2. Một số tính chất cơ học của hợp kim nhôm Al 5052.....	61
Bảng 4.3. Thiết kế thí nghiệm Taguchi đánh giá ảnh hưởng của rung động siêu âm đến chất lượng bề mặt tạo hình bằng UISF	64
Bảng 4.4. Thông số thí nghiệm đánh giá ảnh hưởng của rung động siêu âm đến chất lượng bề mặt tạo hình bằng UISF	64
Bảng 4.5. Kết quả so sánh theo cặp (Paired T-Test)	66
Bảng 4.6. Thông số thí nghiệm khảo sát các thành phần lực biến dạng theo biên dạng được thiết kế trước.....	74
Bảng 4.7. Các mức thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng của rung động siêu âm đến các thành phần lực biến dạng khi gia công bằng UISF và ISF	79
Bảng 4.8. Thiết kế thí nghiệm tối ưu CCD và các mức tham số đầu vào	79
Bảng 4.9. Kết quả thí nghiệm so sánh Paired T-Test thành phần lực F_y	82
Bảng 4.10. Kết quả thí nghiệm so sánh Paired T-Test thành phần lực F_z	83
Bảng 4.11. Kết quả thống kê 2 mức thí nghiệm đối với F_y	84
Bảng 4.12. Kết quả thống kê 2 mức thí nghiệm đối với F_z	85
Bảng 4.13. Kết quả thí nghiệm xác định lượng giảm thành phần lực F_y (RF_y , %) khi	

tạo hình bằng UISF so với tạo hình bằng ISF với chiều dày tấm $t = 0.5\text{mm}$	89
Bảng 4.14. Kết quả thí nghiệm xác định lượng giảm thành phần lực F_y (RFy, %) khi tạo hình bằng UISF so với tạo hình bằng ISF với chiều dày tấm $t = 1.0\text{mm}$	90
Bảng 4.15. Kết quả thí nghiệm xác định lượng giảm thành phần lực F_z (RFz, %) khi tạo hình bằng UISF so với tạo hình bằng ISF với chiều dày tấm $t = 0.5\text{mm}$	91
Bảng 4.16. Kết quả thí nghiệm xác định lượng giảm thành phần lực F_z (RFz, %) khi tạo hình bằng UISF so với tạo hình bằng ISF với chiều dày tấm $t = 1.0\text{mm}$	91
Bảng 4.17. Kết quả thí nghiệm lượng giảm RFy (%), RFz (%) trung bình của 5 hành trình.....	92
Bảng 4.18. Kết quả lời giải tối ưu đối với mức giảm thành phần lực RFz (%)	95
Bảng 4.19. Kết quả lời giải tối ưu đối với mức giảm thành phần lực RFy (%)	95
Bảng 4.20. Các kích thước sản phẩm sau khi tạo hình bằng công nghệ UISF (phần hình nón cụt) với chiều dày phôi 1.0mm	99
Bảng 4.21. Các kích thước sản phẩm sau khi tạo hình bằng công nghệ UISF (phần hình nón cụt) với chiều dày phôi 0.5mm	100

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1.1. Các phương pháp tạo hình bằng công nghệ ISF.....	5
Hình 1.2. Các kiểu quỹ đạo dụng cụ biến dạng dẻo	6
Hình 1.3. Các thông số hình học của quá trình gia công ISF	6
Hình 1.4. Một số sản phẩm điển hình gia công bằng phương pháp ISF	7
Hình 1.5. Các thiết bị thường được sử dụng trong phương pháp gia công ISF	8
Hình 1.6. Các sai lệch hình dạng thường gặp trong công nghệ ISF	9
Hình 1.7. Mô hình tiến dụng cụ biến dạng và ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt	9
Hình 1.8. So sánh ưu, nhược điểm giữa ISF và dập vuốt, dập thủy tĩnh.....	10
Hình 1.9. So sánh giữa đường cong FLC giữa các phương pháp biến dạng.....	10
Hình 1.10. Hiệu ứng áp điện	13
Hình 1.11. Bộ tạo rung siêu âm: (a) dùng tấm piezo nhiều lớp; (b) kết cấu Sandwich	13
Hình 1.12. Mô hình liên kết nguyên tử	14
Hình 1.13. Cấu tạo một hệ thống gia công có rung động siêu âm trợ giúp (1) Nguồn phát rung siêu âm; (2) Bộ chuyển đổi siêu âm; (3)-(4) Đầu khuếch đại biên độ rung; (5) Dụng cụ gia công.	15
Hình 1.14. Kết cấu một bộ phát rung siêu âm kiểu Langevin.....	15
Hình 1.15. Khuếch đại biên độ rung động của Booster nối tiếp Horn.....	16
Hình 1.16. Rung động siêu âm trợ giúp một số phương pháp gia công cắt gọt.....	17
Hình 1.17. Rung động siêu âm trợ giúp các phương pháp gia công áp lực	18
Hình 1.18. Sơ đồ thực nghiệm (a) và biểu đồ lực kéo theo thời gian (b) khi kéo thép các bon cao có rung động siêu âm trợ giúp	18
Hình 1.19. Lực dập trong quá trình dập vuốt thông thường và dập vuốt có rung động siêu âm (tần số 20 kHz, biên độ 5 μ m) hỗ trợ, phôi dập có đường kính 39mm.....	19
Hình 1.20. Khả năng biến dạng dẻo của dập vuốt thông thường và dập vuốt có rung động siêu âm hỗ trợ.	19
Hình 1.21. Đường cong lực - biến dạng khi chôn có rung động siêu âm hỗ trợ và khi chôn thường thép C35e: (a) $v_{Press} = 30$ mm/min; (b) $v_{Press} = 300$ mm/min.	20
Hình 1.22. Đường cong lượng giảm lực – chuyển vị khi ép chảy hợp kim ZK60Mg có rung động siêu âm trợ giúp.....	20
Hình 1.23. Ảnh hưởng của rung động siêu âm đến lực ép (a) và ma sát (b) khi ép chảy.	

Tốc độ ép $v_{press} = 40\text{mm/s}$	21
Hình 1.24. Ảnh chụp bộ công tác siêu âm (a) và kết quả thống kê giá trị lực mỗi hành trình tiến dụng cụ có và không có rung động siêu âm trợ giúp (b).	22
Hình 2.1. Các thông số hình học và thông số công nghệ khi gia công bằng phương pháp biến dạng dẻo theo bước ISF	26
Hình 2.2. Quan hệ giữa các thông số hình học và thông số công nghệ trong ISF.	27
Hình 2.3. Mô hình đường cong giới hạn biến dạng dẻo (FLD).	31
Hình 2.4. Phân biệt giữa vùng biến dạng an toàn và vùng phá hủy (a); ảnh hưởng của đường kính dụng cụ (b) và bước tiến Δz (c) đến đường cong FLD.	31
Hình 2.5. Mô hình phân tích lực gây nên biến dạng dẻo của phôi.	33
Hình 2.6. Mô hình tác dụng lực của dụng cụ biến dạng dẻo lên phôi.	34
Hình 2.7. Mô hình xác định lực dọc và ngang cực đại của máy khi gia công ISF	34
Hình 2.8. Mô hình biến dạng dẻo theo phương pháp UISF	35
Hình 2.9. Mô hình xác định các thành phần ứng suất, biến dạng khi thực hiện biến dạng dẻo theo phương pháp UISF	36
Hình 2.10. Mô hình dao động của dụng cụ biến dạng theo phương pháp UISF	36
Hình 2.11. Phân bố biến dạng trên bộ phát rung	38
Hình 2.12. Mạch đo trở kháng siêu âm (a) và một ví dụ về kết quả đo (b)	39
Hình 3.1. Trung tâm gia công siêu âm (a) và bộ dụng cụ gia công siêu âm (b)	41
Hình 3.2. Ảnh chụp bộ phát rung siêu âm thương mại thương mại YP-5525-4Z.....	42
Hình 3.3. Kết cấu bộ phát rung siêu âm thương mại Herrmann KHS20-IP50-L.....	43
Hình 3.4. Nguồn phát điện siêu âm MPI_ WG3000W	44
Hình 3.5. Nguồn phát điện siêu âm	44
Hình 3.6. Hệ thống thiết bị thí nghiệm được gá đặt trên máy tiện	45
Hình 3.7. Ảnh chụp máy phay CNC sau khi cải tạo có lắp đặt bộ công tác siêu âm	46
Hình 3.8. Một số dạng dụng cụ biến dạng dẻo trong công nghệ ISF	47
Hình 3.9. Giả thiết phân bố biến dạng trên bộ phát rung khi lắp thêm dụng cụ biến dạng: 1- Bộ phát rung; 2,3- Đầu horn; 4- Dụng cụ biến dạng; 5- Gá kẹp.....	49
Hình 3.10. Kích thước dụng cụ biến dạng dẻo dùng cho bộ phát rung YP-5525-4Z ...	49
Hình 3.11. Mô hình kiểm tra ổn định của dụng cụ biến dạng dẻo	50
Hình 3.12. Kết quả quét tần số cộng hưởng của hệ thống siêu âm sử dụng bộ phát rung YP-5525-4Z.....	51

Hình 3.13. Kết cấu dụng cụ biến dạng dẻo dùng cho bộ phát rung KHS20-IP50-L.....	51
Hình 3.14. Kết quả quét tần số cộng hưởng của hệ thống công tác siêu âm sử dụng bộ phát rung KHS20-IP50-L	52
Hình 3.15. Cảm biến lực ba thành phần KISTLER 9257B.....	52
Hình 3.16. Bản vẽ đồ gá kẹp phôi trên máy tiện.....	54
Hình 3.17. Ảnh chụp hệ thống thí nghiệm gia công UISF và ISF trên máy tiện	54
Hình 3.18. Bản vẽ 3D thiết kế bộ gá kẹp phôi trên máy phay	55
Hình 3.19. Bản vẽ 2D thiết kế bộ gá kẹp phôi trên máy phay	55
Hình 3.20. Ảnh chụp hệ thống thí nghiệm UISF và ISF lắp ráp trên máy phay	56
Hình 3.21. Mô hình đo sử dụng trong thí nghiệm UISF và ISF.....	57
Hình 3.22. Các thành phần lực (F_x , F_y , F_z (N)) và cường độ dòng điện (i (A)) cấp cho transducer khi tạo hình tấm có chiều dày $t = 0.5\text{mm}$ ở điều kiện: $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $f = 1200\text{mm/ph}$; $h = 20\text{mm}$; $\phi = 45^\circ$; quỹ đạo xoắn ốc tạo thành hình nón cụt	58
Hình 3.23. Các thành phần lực F_x , F_y , F_z (N) và cường độ dòng điện i (A) cấp cho transducer khi tạo hình tấm có chiều dày $t = 1.0\text{mm}$ ở điều kiện: $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $f = 1200\text{mm/ph}$; quỹ đạo thẳng $L = 120\text{mm}$ tạo thành rãnh thẳng.....	58
Hình 3.24. Các thành phần lực F_x , F_y , F_z (N) và cường độ dòng điện i (A) cấp cho transducer trong khoảng 400s-500s khi tạo hình tấm có chiều dày $t = 0.5\text{mm}$ ở điều kiện: $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $f = 1200\text{mm/ph}$; $h = 20\text{mm}$; $\phi = 45^\circ$; quỹ đạo xoắn ốc	59
Hình 3.25. Các thành phần lực F_x , F_y , F_z (N) và cường độ dòng điện i (A) cấp cho transducer ở hành trình thứ 7 và hành trình thứ 8 (trong tổng số 10 hành trình) khi tạo hình tấm có chiều dày $t = 1.0\text{mm}$ ở điều kiện: $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $f = 1200\text{mm/ph}$; quỹ đạo thẳng $L = 120\text{mm}$ tạo thành rãnh thẳng	59
Hình 4.1. Mô hình thí nghiệm UISF trên máy tiện	62
Hình 4.2. Hệ thống thí nghiệm UISF trên máy tiện	62
Hình 4.3. Các thành phần lực F_x , F_z , F_y khi biến dạng dẻo ở điều kiện $n = 70\text{vg/ph}$; $\Delta z = 1.0\text{mm}$: (a) ISF và (b) UISF	65
Hình 4.4. Các thành phần lực F_x , F_z , F_y khi biến dạng dẻo ở điều kiện $n = 225\text{vg/ph}$; $\Delta z = 1.5\text{mm}$: (a) ISF và (b) UISF	65
Hình 4.5. Các thành phần lực F_x , F_z , F_y khi biến dạng dẻo ở điều kiện $n = 130\text{vg/ph}$; $\Delta z = 2.0\text{mm}$: (a) ISF và (b) UISF	65

Hình 4.6. Biểu đồ ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến thành phần lực biến dạng dẻo F_z : (a) UISF; (b) ISF	67
Hình 4.7. Biểu đồ ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến tỉ số SN của thành phần lực biến dạng dẻo F_z : (a) UISF; (b) ISF	67
Hình 4.8. Ảnh chụp bề mặt phôi trước khi gia công	68
Hình 4.9. Ảnh chụp vết gia công biến dạng dẻo bằng ISF (a) và UISF (b) với các thông số: $\Delta z = 1.0\text{mm}$; $n = 70 \text{ vg/ph}$, tần số $f = 28.3 \text{ kHz}$	69
Hình 4.10. Ảnh chụp vết gia công biến dạng dẻo bằng ISF (a) và UISF (b) với các thông số: $\Delta z = 1.5\text{mm}$; $n = 225 \text{ vg/ph}$, tần số $f = 28.3 \text{ kHz}$	69
Hình 4.11. Ảnh chụp vết tiếp xúc trên bề mặt phôi sau khi gia công bằng phương pháp ISF (thông số: $\Delta z = 1.5\text{mm}$; $n = 70 \text{ vg/ph}$, tần số $f = 0$).....	70
Hình 4.12. Ảnh chụp vết tiếp xúc trên bề mặt phôi sau khi gia công bằng phương pháp UISF (thông số: $\Delta z = 1.5\text{mm}$; $n = 70 \text{ vg/ph}$, tần số $f = 28.3 \text{ kHz}$).	70
Hình 4.13. Ảnh chụp sản phẩm gia công biến dạng dẻo bằng ISF (a) và UISF (b).....	71
Hình 4.14. Mô hình thí nghiệm và đo các thành phần lực biến dạng dẻo.....	72
Hình 4.15. Hai dạng quỹ đạo chuyển động của dụng cụ biến dạng dẻo	73
Hình 4.16. Các thành phần lực biến dạng dẻo khi tạo hình tấm bằng phương pháp ISF theo quỹ đạo contour ở điều kiện: $t = 0.5\text{mm}$; $\phi = 45^\circ$; $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $h = 40\text{mm}$	74
Hình 4.17. Các thành phần lực biến dạng dẻo khi tạo hình tấm bằng phương pháp ISF theo quỹ đạo xoắn không gian ở điều kiện: $t = 1.0\text{mm}$; $\phi = 55^\circ$; $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $h = 20\text{mm}$	75
Hình 4.18. Các thành phần lực biến dạng dẻo khi tạo hình tấm bằng phương pháp ISF theo quỹ đạo contour ở điều kiện: $t = 0.5\text{mm}$; $\Delta z = 0.2\text{mm}$; $\phi = 45^\circ$; $h = 40\text{mm}$	75
Hình 4.19. Mô hình tiến dụng cụ trong thí nghiệm tối ưu	78
Hình 4.20. Dữ liệu các thành phần lực F_x , F_y , F_z khi tạo hình ở điều kiện bật/tắt (on/off) dòng điện siêu âm, $t = 1.0\text{mm}$; $\Delta z = 1.5\text{mm}$; $f = 200\text{mm/ph}$: (a) 4 trong 5 hành trình; (b) hành trình 4 (lưu ý: path là hành trình)	80
Hình 4.21. Dữ liệu các thành phần lực F_x , F_y , F_z khi tạo hình ở điều kiện bật/tắt (on/off) dòng điện siêu âm: (a) $t = 0.5\text{mm}$, $\Delta z = 1.0\text{mm}$, $f = 200\text{mm/ph}$, hành trình 4; (b) $t = 0.5\text{mm}$, $\Delta z = 0.5\text{mm}$, $f = 700\text{mm/ph}$, hành trình 5.....	81
Hình 4.22. Đồ thị Paired T-Test so sánh lực biến dạng F_y giữa quá trình UISF và quá trình ISF với các tấm có chiều dày khác nhau: (a) dày 0.5mm ; (b) dày 1.0mm	82

Hình 4.23. Đồ thị Paired T-Test so sánh lực biến dạng Fz giữa quá trình UISF và quá trình ISF với các tấm có chiều dày khác nhau: (a) dày 0.5mm; (b) dày 1.0mm	83
Hình 4.24. Đồ thị ảnh hưởng (a) và ảnh hưởng tương tác (b) của các tham số đến lượng giảm lực biến dạng Fy nhờ rung động siêu âm trợ giúp quá trình ISF	85
Hình 4.25. Đồ thị ảnh hưởng (a) và ảnh hưởng tương tác (b) của các tham số đến lượng giảm lực biến dạng Fz nhờ rung động siêu âm trợ giúp quá trình ISF	86
Hình 4.26. Dữ liệu thống kê RFz_i (%) trong năm hành trình ở các điều kiện tạo hình: (a) $t = 0.5\text{mm}$, $\Delta z = 0.5\text{mm}$; (b) $t = 1.0\text{mm}$, $\Delta z = 0.5\text{mm}$	87
Hình 4.27. Dữ liệu thống kê RFy_i (%) trong năm hành trình ở các điều kiện tạo hình: (a) $t = 0.5\text{mm}$, $\Delta z = 1.5\text{mm}$; (b) $t = 1.0\text{mm}$, $\Delta z = 1.5\text{mm}$	88
Hình 4.28. Đồ thị bề mặt (a) và contour (b) lượng giảm RFy (%) của tấm dày 0.5mm	93
Hình 4.29. Đồ thị bề mặt (a) và contour (b) lượng giảm RFy (%) của tấm dày 1.0mm	93
Hình 4.30. Đồ thị bề mặt (a) và contour (b) lượng giảm RFz (%) của tấm dày 0.5mm	94
Hình 4.31. Đồ thị bề mặt (a) và contour (b) lượng giảm RFz (%) của tấm dày 1.0mm	94
Hình 4.32. Ảnh chụp sản phẩm sau khi tạo hình bằng UISF theo quỹ đạo hình vuông (sản phẩm dạng kim tự tháp cụt): chiều dày tấm $t = 0.5\text{mm}$ và bước tiến $\Delta z = 0.5\text{mm}$	96
Hình 4.33. Ảnh chụp sản phẩm sau khi tạo hình bằng UISF theo quỹ đạo hình vuông (sản phẩm dạng kim tự tháp cụt) với bước tiến $\Delta z = 0.5\text{mm}$	97
Hình 4.34. Ảnh chụp sản phẩm sau khi tạo hình bằng UISF theo quỹ đạo hình xoắn vít (sản phẩm dạng chóp cụt): chiều dày tấm $t = 0.5\text{mm}$ và bước tiến $\Delta z = 0.5\text{mm}$	97
Hình 4.35. Ảnh chụp sản phẩm sau khi tạo hình bằng UISF theo quỹ đạo hình xoắn vít (sản phẩm dạng chóp cụt): chiều dày tấm $t = 1.0\text{mm}$ và bước tiến $\Delta z = 0.5\text{mm}$	98
Hình 4.36. Mô hình đo các kích thước đánh giá độ chính xác tạo hình	99
Hình 4.37. Kết quả xác định phân bố chiều dày sản phẩm khi tạo hình theo các tham số tối ưu và các điều kiện: góc thành tường $\phi = 50^\circ$; chiều sâu tạo hình $h = 20\text{mm}$; chiều dày tấm ban đầu $t = 1.0\text{mm}$	101
Hình 4.38. Kết quả xác định phân bố chiều dày sản phẩm khi tạo hình theo các tham số tối ưu và các điều kiện: góc thành tường $\phi = 45^\circ$; chiều sâu tạo hình $h = 30\text{mm}$; chiều dày tấm ban đầu $t = 1.0\text{mm}$	101
Hình 4.39. Kết quả xác định phân bố chiều dày sản phẩm khi tạo hình theo các tham số tối ưu và các điều kiện: góc thành tường $\phi = 45^\circ$; chiều sâu tạo hình $h = 40\text{mm}$; chiều dày tấm ban đầu $t = 1.0\text{mm}$	102

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
<i>ISF</i>	Incremental sheet forming	Biến dạng dẻo theo bước (hoặc biến dạng dẻo cục bộ liên tục)
<i>UISF</i>	Ultrasonics-assisted Incremental sheet forming	Biến dạng dẻo theo bước (hoặc biến dạng dẻo cục bộ liên tục) có rung động siêu âm trợ giúp
<i>AA</i>	Aluminum Alloy	Hợp kim nhôm
<i>Al</i>	Aluminum Alloy	Hợp kim nhôm
<i>FLD</i>	Forming Limit Diagram	Đường cong giới hạn biến dạng dẻo
<i>FLC</i>	Forming Limit Curve	Đường cong giới hạn biến dạng dẻo
<i>RF_y</i>	Reduction of F_y force	Lượng giảm lực biến dạng theo phương ngang Oy khi tạo hình có rung động siêu âm trợ giúp so với khi tạo hình bằng ISF thông thường
<i>RF_z</i>	Reduction of F_z force	Lượng giảm lực biến dạng theo phương thẳng đứng/dọc trục Oz khi tạo hình có rung động siêu âm trợ giúp so với khi tạo hình bằng ISF thông thường

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị tính	Giải thích ý nghĩa
t_i	mm	Chiều dày ban đầu của phôi tấm
t_f	mm	Chiều dày sản phẩm
d	mm	Đường kính (hoặc đường kính đỉnh) dụng cụ biến dạng
ϕ	độ	Góc tạo hình/Góc thành tường
α	độ	Góc hợp bởi thành bên và đường tâm dụng cụ biến dạng
σ_y	MPa	Giới hạn chảy
σ_u	MPa	Giới hạn bền kéo
σ_n	MPa	Ứng suất kéo
σ_b	MPa	Ứng suất uốn
σ_p	MPa	Ứng suất nén do dụng cụ biến dạng tạo nên trên bề mặt
Δz	mm	Bước tiến dụng cụ theo phương Z
Δx	mm	Bước tiến dụng cụ theo phương X
F_z	N, kN	Thành phần lực biến dạng dẻo theo phương Z
F_y	N, kN	Thành phần lực biến dạng dẻo theo phương Y
F_x	N, kN	Thành phần lực biến dạng dẻo theo phương X
F_r	N, kN	Thành phần lực biến dạng dẻo theo phương hướng kính
F_t	N, kN	Thành phần lực biến dạng dẻo theo phương tiếp tuyến
$\varepsilon_1; \varepsilon_2; \varepsilon_3$	-	Các thành phần biến dạng chính
$\varepsilon_i; \varepsilon_\theta; \varepsilon_\phi$	-	Các thành phần biến dạng trong hệ tọa độ cầu
n	vg/ph	Tốc độ quay của trục chính
f	mm/ph	Tốc độ tiến dụng cụ biến dạng dẻo
$A; a$	μm	Biên độ rung
t	s	Thời gian
t	mm	Chiều dày
ω	rad/s	Vận tốc góc
RF_y	%	Lượng giảm lực theo phương ngang
RF_z	%	Lượng giảm lực theo phương thẳng đứng/dọc trục

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN**

THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

1. Thông tin chung:

- Tên đề tài: Nghiên cứu ứng dụng công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước (Incremental sheet forming - ISF) có sự trợ giúp của rung động siêu âm trong gia công chi tiết dạng tấm vỏ trong sản xuất ô tô.

- Mã số: B2022-TNA-26

- Chủ nhiệm: TS. Hồ Ký Thanh

- Cơ quan thực hiện: Đại học Thái Nguyên

- Thời gian thực hiện: Từ tháng 01/2022 đến tháng 6/2024

2. Mục tiêu nghiên cứu:

- Mục tiêu chung của đề tài: Làm chủ công nghệ, thiết kế chế tạo hệ thống thiết bị và thực nghiệm ứng dụng công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước (Incremental Sheet Forming - ISF) có sự trợ giúp của rung động siêu âm để triển khai sản xuất thực nghiệm nhằm đánh giá và hoàn thiện quy trình gia công đối với phương pháp gia công này.

- Mục tiêu cụ thể:

+ Thiết kế, chế tạo được một hệ thống thiết bị ứng dụng công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước các sản phẩm dạng tấm vỏ không dùng khuôn. Hệ thống này đồng thời tích hợp rung động siêu âm trợ giúp nhằm ứng dụng công nghệ gia công mới nhất hiện nay.

+ Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả năng biến dạng, lực tạo hình cần thiết và độ chính xác tạo hình của sản phẩm tấm vỏ được gia công bằng hệ thống thiết bị được thiết kế, chế tạo bởi đề tài. Trên cơ sở đó, giải quyết bài toán tối ưu đa mục tiêu: lực biến dạng - chất lượng tạo hình.

+ Thử nghiệm gia công một vài dạng sản phẩm điển hình của các chi tiết dạng tấm vỏ trong ô tô bằng hệ thống thiết bị ứng dụng công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước được chế tạo bởi đề tài. Từ đó hoàn thiện 01 quy trình công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước có sự trợ giúp của rung động siêu âm cho 01 sản phẩm điển hình.

3. Kết quả đạt được:

Đề tài đã thực hiện thành công các mục tiêu đã đặt ra. Cụ thể là:

- Đề tài đã thực hiện đánh giá thực trạng và phân tích được các tồn tại của phương pháp gia công tấm vỏ hiện nay, cả trên thế giới và ở Việt Nam, trên cơ sở đó, làm rõ mục tiêu và định hướng nghiên cứu.

- Hoàn thành việc thiết kế, chế tạo 01 hệ thống thí nghiệm gia công biến dạng dẻo theo bước có trợ giúp của rung động siêu âm (ISM).

- Đã thực hiện khảo sát, đánh giá ảnh hưởng của rung động siêu âm đến các thành phần lực biến dạng và lượng giảm các thành phần lực biến dạng dẻo. Trong đó, lượng giảm lực biến dạng dẻo có thể đạt đến 70% khi có rung động siêu âm trợ giúp quá trình ISF.

- Đã xây dựng được bài toán tối ưu hóa lượng giảm lực biến dạng dẻo theo các thông số đầu vào cho các chiều dày tấm khác nhau.

- Trên cơ sở kết quả bài toán tối ưu hóa, đã đánh giá chất lượng bề mặt và độ chính xác tạo hình cho các chiều dày tấm vật liệu khác nhau.

4. Sản phẩm đạt được:

4.1. Sản phẩm khoa học:

Đạt yêu cầu so với đăng ký. Cụ thể là:

+ 01 bài báo trong danh mục ISI-Q2: Ngoc-Tuan La, Quoc-Huy Ngo, Van-Dam Vu, Thu-Ha Mai, and Ky-Thanh Ho; Optimization of ultrasonic assisted incremental sheet forming; *Materials*, 2024;

+ 01 bài báo trong danh mục Scopus: Ho Ky-Thanh, Ngoc-Tuan La, Ngoc-Hung Chu, Nhu-Huynh Vu, and Tat-Loi Mai; Applying Ultrasonic-Assisted Incremental Sheet Forming to Al 5052 Aluminum Alloy; *Engineering Proceedings*, 2023, 45(1), 8; <https://doi.org/10.3390/engproc2023045008>;

+ 01 bài báo trong danh mục Scopus-Q4: Ky-Thanh Ho, Quoc-Huy Ngo, Ngoc-Hung Chu, Van-Dam Vu, Ngoc-Tuan La; An Experimental Study on Incremental Sheet Forming of 5052 Aluminum Alloy; *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2024.

4.2. Sản phẩm đào tạo:

Đạt yêu cầu so với đăng ký. Cụ thể là:

+ Hỗ trợ đào tạo 01 thạc sĩ bảo vệ thành công theo hướng nghiên cứu của đề tài.

Họ và tên học viên: Hoàng Văn Bằng

Tên luận văn cao học: Ảnh hưởng của chiều dày tấm và chiều sâu tạo hình đến

lực tạo hình chính Fz trong gia công biến dạng dẻo theo bước có trợ giúp của rung động siêu âm.

Người hướng dẫn khoa học: TS. Hồ Ký Thanh

+ Hỗ trợ 01 nghiên cứu sinh thực hiện 01 chuyên đề tiến sĩ.

Họ và tên học viên: Mai Tất Lợi

Tên chuyên đề: Nghiên cứu ứng dụng rung động siêu âm trong gia công cơ khí.

Người hướng dẫn: TS. La Ngọc Tuấn

4.3. Sản phẩm ứng dụng:

Đạt yêu cầu so với đăng ký. Cụ thể là:

- Chế tạo hoàn thiện 01 hệ thống thiết bị gia công bằng ISM (gồm máy CNC 3 trục, dụng cụ biến dạng và hệ thống rung siêu âm) có hỗ trợ của rung động siêu âm, phục vụ tốt cho nghiên cứu và đào tạo. Các đặc trưng chính của máy:

+ 01 máy CNC 3 trục, công suất tổng khoảng 4.0 kW, chiều dài băng máy 1100mm, máy tích hợp đầu rung siêu âm có công suất từ 1000W trở lên.

+ Có khả năng gia công được đa dạng chủng loại chi tiết dạng tấm, vỏ (thép, nhôm...) đặc trưng của ngành ô tô, có quỹ đạo, độ rộng và độ sâu gân, gờ được lập trình điều khiển tự động.

+ Hệ thống thiết bị thí nghiệm sử dụng máy CNC cải tiến, bộ điều khiển X809D có khả năng lập trình hoặc import file đã lập trình trên máy tính qua cổng USB, máy có khả năng hiển thị đầy đủ các thông tin về chuyển động.

+ Máy có thể tích hợp với bộ thu thập thông tin hiển thị thông số rung động siêu âm, các thành phần lực, lưu trữ trên máy tính để phục vụ nghiên cứu.

- 01 bộ tham số tối ưu thể hiện mối quan hệ của các thông số công nghệ với mức độ giảm thành phần lực biến dạng.

- Đã hoàn thiện gia công một số sản phẩm đặc trưng (dạng rãnh, dạng nón cụt, dạng kim tự tháp cụt...). Chất lượng sản phẩm sau khi gia công:

+ Độ nhám bề mặt sản phẩm được tạo hình bằng UISF thấp (Rz dưới $1.25\mu m$), bề mặt không xuất hiện các vết nứt so với bề mặt được tạo hình bằng ISF thông thường, kể cả khi lượng tiến dụng cụ biến dạng được lựa chọn lớn đến $1.5mm$ (các nghiên cứu về UISF hiện nay thường chỉ khảo sát ở mức lượng tiến dụng cụ theo phương dọc trục khoảng $0.5mm$).

+ Sai lệch hình dạng hình học và kích thước của sản phẩm chóp cụt điền hình sau

khi tạo hình theo bộ tham số tối ưu cho thấy: sai lệch đường kính theo các phương đo đạt được dưới 1.0mm; sai lệch về góc tạo hình/góc thành tường đạt được dưới 1°, với cả hai chiều dày tấm nghiên cứu; biến mỏng thành dưới 40%.

+ Khả năng tạo hình nhờ rung động siêu âm được cải thiện đáng kể, có thể tạo hình với góc thành tường lớn đến 70° (trong khi các hợp kim nhôm cùng nhóm được gia công bằng ISF chỉ đạt khoảng 60°).

4.4. Sản phẩm khác:

Không

5. Hiệu quả:

- Về giáo dục, đào tạo: Bổ sung thêm 01 hệ thống thí nghiệm...cho đơn vị, phục vụ tốt công tác đào tạo và nghiên cứu khoa học; hỗ trợ cho nghiên cứu sinh, học viên cao học và sinh viên tham gia thực hiện các nội dung của đề tài và có thể sử dụng triển khai nghiên cứu các đề tài khác cùng định hướng; Nâng cao năng lực nghiên cứu của những người tham gia thực hiện đề tài;...

- Về kinh tế - xã hội: Kết quả nghiên cứu góp phần bổ sung cơ sở lý luận, thực tiễn tạo hình các sản phẩm dạng tấm, vò; giảm chi phí đầu tư thiết bị ban đầu để sản xuất các sản phẩm dạng tấm vò.

6. Khả năng áp dụng và phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu:

- Kết quả và nội dung nghiên cứu có thể áp dụng tốt trong lĩnh vực tạo hình sản phẩm dạng tấm vò.

- Chuyển giao trực tiếp kết quả đề tài cho đơn vị để phục vụ đào tạo, nghiên cứu khoa học, nâng cao chất lượng đội ngũ.

Thái Nguyên, ngày 29 tháng 5 năm 2024

Cơ quan chủ trì đề tài

Chủ nhiệm đề tài

TS. Hồ Ký Thanh

VIETNAM MINISTRY OF EDUCATION AND TRAINING
THAI NGUYEN UNIVERSITY

INFORMATION ABOUT RESEARCH RESULTS

1. General information:

- Project title: Research on the application of Incremental sheet forming (ISF) process with the assistance of ultrasonic vibrations in the forming of plate workpieces in automobile production.
- Grant number: B2022-TNA-26
- Coordinator: Dr. Ho Ky-Thanh
- Implementing Institution: Thai Nguyen University of Technology
- Duration: from 01/2022 to 6/2024

2. Objectives:

- General objectives of the project: Owning the technology, design and manufacture equipment systems and experiment with applying Incremental Sheet Forming (ISF) process with the assistance of ultrasonic vibrations to conducted experiments to evaluate and complete this forming process.

- Specific objectives:

- + Designing and manufacturing an equipment system that applies ISF process technology to shell plate products without using molds. This system also integrates assisted ultrasonic vibration to apply the latest machining technology today.
- + Experimental research to evaluate the effects of technological parameters on the deformability, required forming force and forming accuracy of shell plate products processed using designed and manufactured equipment systems by this project. On that basis, solve the optimization problem: deformation force - shaping quality.
- + Testing of machining some typical product types of shell parts using the equipment system applying ISF with the assistance of ultrasonic vibrations manufactured by the project. From that a step-by-step ISF process with the assistance of ultrasonic vibrations has been completed for a typical product.

3. Obtained results:

The project has successfully achieved the setup objectives. Details:

- The project has evaluated the current problems and analyzed the shortcomings of current shell plate processing methods, both in the world and in Vietnam, and on
-

that basis, determined the research objectives and directions.

- Completed the design and fabrication of the ISF process experimental system with the assistance of ultrasonic vibrations.

- Conducted and evaluated the effects of input parameters on the deformation force components and the reduction in deformation force components during ISF process with the assistance of ultrasonic vibrations. In particular, the deformation force reduction can reach 70% when ultrasonic vibration assists the ISF process compared with that in conventional ISF process.

- The problem of optimizing the deformation force reduction according to input parameters for different plate thicknesses has been developed.

- Based on the results of the optimization problem, the surface quality and shaping accuracy for different material sheet thicknesses were evaluated.

4. Products of the project:

4.1. Scientific products:

- + 01 ISI-Q2 paper: Ngoc-Tuan La, Quoc-Huy Ngo, Van-Dam Vu, Thu-Ha Mai, and Ky-Thanh Ho; Optimization of ultrasonic assisted incremental sheet forming; *Materials*, 2024;

- + 01 Scopus paper: Ho Ky-Thanh, Ngoc-Tuan La, Ngoc-Hung Chu, Nhu-Huynh Vu, and Tat-Loi Mai; Applying Ultrasonic-Assisted Incremental Sheet Forming to Al 5052 Aluminum Alloy; *Engineering Proceedings*, 2023, 45(1), 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2023045008>;

- + 01 Scopus-Q4 paper: Ky-Thanh Ho, Quoc-Huy Ngo, Ngoc-Hung Chu, Van-Dam Vu, Ngoc-Tuan La; An Experimental Study on Incremental Sheet Forming of 5052 Aluminum Alloy; *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2024.

4.2. Training products:

- Support the training of 01 master's degree holder to successfully defend the research direction of the project.

Name of student master: Hoang Van Bang

Thesis: The effects of sheet thickness and forming depth on the main forming force F_z in incremental sheet forming with the assistance of ultrasonic vibration.

Science advisor: Dr. Ho Ky-Thanh

- Support 01 graduate student to conduct 01 doctoral topic

Name of doctoral student: Mai Tat-Loi

Doctoral topic: Research on the application of ultrasonic vibration in mechanical processing.

Advisor: Dr. La Ngoc-Tuan

4.3. Application products:

- Complete fabrication of 01 ISM machining equipment system (including 3-axis CNC machine, deforming tools and ultrasonic vibration system) with assistance from ultrasonic vibration, serving well for research and training. Main features of the system:

+ A 3-axis CNC machine, total capacity of about 4.0 kW, machine table length of 1100mm, machine with integrated ultrasonic vibration transducer with capacity of 1000W or more.

+ The system is capable of processing a variety of sheet and shell parts (steel, aluminum...) typical of the automotive industry, with orbits, widths and depths of ribs and edges programmed for automatic control.

+ The experimental equipment system uses an improved CNC machine, the X809D controller has the ability to program or import programmed files on a computer via USB, the machine is capable of displaying full motion information.

+ The system can be integrated with an information collector that displays ultrasonic vibration parameters and force components and can be stored on a computer for research purposes..

- 01 set of optimal parameters showing the relationship of technological parameters with the degree of reduction in deformation force components for two types of thickness: 0.5mm and 1.0mm.

- Completed the processing of a number of typical products (groove shape, truncated cone shape, truncated pyramid shape...). Product quality after forming:

+ The surface roughness of products shaped with UISF is low (R_z below $1.25\mu\text{m}$), the surface does not appear cracks compared to the surface shaped with conventional ISF process, including the possibility of deformation when the step-down sizes selected up to 1.5mm (current UISF studies usually only investigate the axial tool feed of about 0.5mm).

+ The error in geometric shape and size of the truncated cone products after

forming according to the optimal set of parameters shows: the diameter error according to the measurement directions is less than 1.0mm; The error in forming angle/wall angle achieved is less than 1° , with both studied plate thicknesses; thinning to less than 40%.

+ The forming ability with ultrasonic vibration assistance is significantly improved, it is possible to form walls with wall angles as large as 70° (whereas other aluminum alloys in the same group processed with conventional ISF process only reach about 60°).

4.4. Other products:

None

5. Effectives:

- Education and training effectives: Adding 01 experimental system to the faculty, serving well the work of training and scientific research; Support for graduate students, graduate students and students participating in implementing the content of the topic and can be used to conduct research on other topics with the same orientation; Improve the research capacity of those participating in the project...

- Socio-economic effectives: Research results contribute to supplementing the theoretical basis and practice of shaping sheet and shell products; Reduce initial equipment investment costs to produce shell-shaped products.

6. Applicability and methods of transferring research results:

- The research results and content can be well applied in the field of forming shell products.

- Directly transfer project results to units to serve training, scientific research, and improve team quality.

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Gia công biến dạng dẻo theo bước (tiếng Anh là Incremental Sheet Forming, viết tắt là ISF) là một phương pháp gia công với nhiều tiềm năng ứng dụng thay thế cho công nghệ dập nguội, công nghệ chế tạo mô thay thế ứng dụng trong lĩnh vực vật liệu y sinh... nên đã thu hút rất nhiều nhà khoa học trên thế giới nghiên cứu. Nghiên cứu về công nghệ ISF đã và đang được triển khai theo nhiều định hướng, bao gồm cả mô phỏng và nghiên cứu thực nghiệm. Chẳng hạn: nghiên cứu về cơ chế biến dạng dẻo, cơ chế phá hủy và cải thiện khả năng biến dạng dẻo hay nghiên cứu xác định và tối ưu lực cần thiết để tạo hình; nghiên cứu đánh giá chất lượng tạo hình thông qua độ chính xác hình dạng hình học của sản phẩm hoặc nâng cao hiệu suất tạo hình và giảm năng lượng tiêu hao, tăng độ nhám bề mặt của sản phẩm cả ở dạng vĩ mô và vi mô; nghiên cứu sự phù hợp các vật liệu tấm kim loại khác nhau nhằm đa dạng ứng dụng của công nghệ, chẳng hạn các loại thép các bon thấp dạng tấm, các loại tấm hợp kim nhôm biến dạng...; nghiên cứu ứng dụng rung động siêu âm trợ giúp gia công biến dạng dẻo theo bước nhằm giảm lực biến dạng dẻo, tăng độ chính xác tạo hình, cải thiện điều kiện biến dạng dẻo hoặc nâng cao chất lượng sản phẩm....

Trong khi đó, rung động siêu âm đã và đang được khai thác, ứng dụng ngày càng phổ biến trong nhiều lĩnh vực sản xuất công nghiệp, chẳng hạn: trợ giúp quá trình gia công cắt gọt, tẩy rửa siêu âm, hàn siêu âm, công nghệ chế biến thực phẩm, hoạt động kiểm tra khuyết tật của sản phẩm, kỹ thuật chẩn đoán hình ảnh - siêu âm trong y tế.... Trong lĩnh vực gia công cơ khí, các nghiên cứu về quá trình cắt gọt có rung động siêu âm trợ giúp cho thấy nhiều ưu điểm nổi bật, chẳng hạn: giảm lực cắt và nhiệt cắt do đó góp phần tăng tuổi bền dụng cụ; hiện tượng lẹo dao giảm; chất lượng bề mặt sản phẩm sau gia công được cải thiện; đồng thời cho phép dễ dàng cắt gọt được nhiều loại vật liệu khó gia công như thép sau nhiệt luyện, thép không gỉ, hợp kim độ bền cao, giảm thiểu sử dụng dung dịch trơn nguội.... Bên cạnh trợ giúp gia công cắt gọt, rung động siêu âm còn được triển khai nghiên cứu ứng dụng khá phổ biến trong lĩnh vực gia công áp lực, chẳng hạn hỗ trợ quá trình dát nguội và dập vuốt kim loại tấm; hỗ trợ quá trình rèn nóng và nguội vật liệu kim loại; hỗ trợ quá trình ép chảy, cả ở trạng thái nóng và trạng thái nguội. Nhờ có sự trợ giúp của rung động siêu âm, lực cần thiết để biến dạng

đeo vật liệu giảm, khả năng biến dạng dẻo của vật liệu tăng, chất lượng bề mặt sản phẩm được cải thiện... Những ưu điểm này được lý giải do hiện tượng giảm ma sát tiếp xúc giữa dụng cụ gia công và phôi (còn gọi là ma sát ngoài), đồng thời ma sát giữa các hạt tinh thể cũng giảm (còn gọi là ma sát trong). Nhờ những ưu điểm nổi trội này mà thời gian gần đây, nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới đã bước đầu thử nghiệm ứng dụng rung động siêu âm trợ giúp quá trình gia công biến dạng dẻo theo bước vật liệu tấm (tiếng Anh là Ultrasonic assisted Incremental Sheet Forming, viết tắt là UISF).

Ở Việt Nam, thời gian gần đây đã có một số công bố về nghiên cứu ứng dụng rung động siêu âm trợ giúp gia công cơ khí. Chẳng hạn, nhóm nghiên cứu của Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - Đại học Thái Nguyên ứng dụng rung động siêu âm khi khoan lỗ và khoan lỗ sâu; nghiên cứu ứng xử cơ - điện của thiết bị rung siêu âm, nghiên cứu ứng dụng rung động siêu âm trong gia công xung điện. Hoặc nhóm nghiên cứu của Đại học Bách Khoa Hà Nội ứng dụng rung động siêu âm trong gia công áp lực... Tuy vậy, các nghiên cứu về ứng dụng rung động siêu âm trợ giúp quá trình gia công biến dạng dẻo hầu như khá hiếm. Các nghiên cứu triển khai công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước mới đang ở dạng tiềm năng. Vì vậy, việc Bộ Giáo dục và Đào tạo lựa chọn, cho phép triển khai đề tài KHCN cấp Bộ “Nghiên cứu ứng dụng công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước (Incremental sheet forming - ISF) có sự trợ giúp của rung động siêu âm trong gia công chi tiết dạng tấm vỏ trong sản xuất ô tô” không chỉ khai thác thế mạnh về ứng dụng rung động siêu âm hiện có ở trong nước, mà còn mở ra một hướng nghiên cứu mới với tiềm năng cao, có nhiều triển vọng thực tế.

2. Mục tiêu nghiên cứu

- Mục tiêu chung: Làm chủ công nghệ, thiết kế chế tạo hệ thống thiết bị và thực nghiệm ứng dụng công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước (Incremental Sheet Forming - ISF) có sự trợ giúp của rung động siêu âm để triển khai sản xuất thực nghiệm nhằm đánh giá và hoàn thiện quy trình gia công đối với phương pháp gia công này.

- Mục tiêu cụ thể:

+ Thiết kế, chế tạo được một hệ thống thiết bị ứng dụng công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước các sản phẩm dạng tấm vỏ không dùng khuôn. Hệ thống này đồng thời tích hợp rung động siêu âm trợ giúp nhằm ứng dụng công nghệ gia công mới nhất hiện nay.

+ Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả

năng biến dạng, lực tạo hình cần thiết và độ chính xác tạo hình của sản phẩm tấm vỏ được gia công bằng hệ thống thiết bị được thiết kế, chế tạo bởi đề tài. Trên cơ sở đó, giải quyết bài toán tối ưu đa mục tiêu: lực biến dạng - chất lượng tạo hình.

+ Thử nghiệm gia công một vài dạng sản phẩm điển hình của các chi tiết dạng tấm vỏ trong ô tô bằng hệ thống thiết bị ứng dụng công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước được chế tạo bởi đề tài. Từ đó hoàn thiện 01 quy trình công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước có sự trợ giúp của rung động siêu âm cho 01 sản phẩm điển hình.

3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu:

- **Đối tượng nghiên cứu:** Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến các thành phần lực biến dạng và chất lượng sản phẩm sau khi tạo hình bằng phương pháp ISF có sự trợ giúp của rung động siêu âm.

- **Phạm vi nghiên cứu:** Nghiên cứu chủ yếu được bằng thực nghiệm trong phòng thí nghiệm với đối tượng thực.

4. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu:

- **Cách tiếp cận:** Vấn đề nghiên cứu được dự kiến giải quyết bằng các cách tiếp cận sau:

+ Tham khảo, kế thừa và phát triển các mô hình thực nghiệm từ các kết quả nghiên cứu đã công bố;

+ Thiết kế chế tạo thiết bị thực nghiệm; Thiết lập hệ thống thí nghiệm; Thu thập và phân tích số liệu; Khái quát hóa kết quả; Công bố khoa học.

+ Áp dụng kiến thức cơ học biến dạng, kỹ thuật phân tích thống kê để xử lý số liệu thực nghiệm.

- Phương pháp nghiên cứu:

+ Phương pháp tổng quan tài liệu sử dụng để nghiên cứu lý thuyết về biến dạng dẻo cục bộ để xác định mối quan hệ giữa tốc độ biến dạng và mức độ biến dạng với lực cần thiết để biến dạng dẻo và độ chính xác tạo hình (mức độ đàn hồi ngược) trong gia công chi tiết dạng tấm, vỏ.

+ Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm và các phương pháp xử lý số liệu thí nghiệm được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến lực tạo hình chính và độ chính xác tạo hình (chất lượng tạo hình). Đồng thời, phương pháp nghiên cứu thực nghiệm được sử dụng để xây dựng và hoàn thiện quy trình công nghệ gia công sản phẩm tấm, vỏ điển hình trong các chi tiết ô tô. Trên cơ sở phân tích các

nghiên cứu về tạo hình sản phẩm dạng tấm vỏ bằng công nghệ ISF và UISF đã công bố, triển khai nghiên cứu thực nghiệm khảo sát đánh giá ảnh hưởng của các thông số và xây dựng, giải bài toán tối ưu.

5. Nội dung và kết quả nghiên cứu:

- Nội dung nghiên cứu:

+ Nghiên cứu tổng quan các công bố gần đây trong các lĩnh vực liên quan, trên cơ sở đó đánh giá thực trạng, tồn tại của công nghệ gia công biến dạng dẻo tấm trong thực tế;

+ Thiết kế chi tiết hệ thống thí nghiệm phục vụ nghiên cứu gia công biến dạng dẻo theo bước có sự trợ giúp của rung động siêu âm trong tạo hình các sản phẩm dạng tấm vỏ;

+ Chế tạo, lắp đặt hệ thống thí nghiệm gia công biến dạng dẻo theo bước có sự trợ giúp của rung động siêu âm gia công các sản phẩm dạng tấm vỏ;

+ Tiến hành thí nghiệm gia công biến dạng dẻo theo bước có sự trợ giúp của rung động siêu âm khi gia công các chi tiết dạng tấm vỏ, thu thập, xử lý số liệu thí nghiệm phục vụ nghiên cứu.

+ Hoàn thiện quy trình công nghệ gia công sản phẩm tấm vỏ điển hình.

- Kết quả nghiên cứu:

- Đã thực hiện đánh giá thực trạng và phân tích được các tồn tại của phương pháp gia công tấm vỏ hiện nay, cả trên thế giới và ở Việt Nam, trên cơ sở đó, làm rõ mục tiêu và định hướng nghiên cứu.

- Hoàn thành việc thiết kế, chế tạo hệ thống thí nghiệm gia công ISF có trợ giúp của rung động siêu âm.

- Đã thực hiện khảo sát, đánh giá ảnh hưởng của rung động siêu âm đến các thành phần lực biến dạng và lượng giảm các thành phần lực biến dạng dẻo. Trong đó, lượng giảm lực biến dạng dẻo có thể đạt đến 70% khi có rung động siêu âm trợ giúp quá trình ISF.

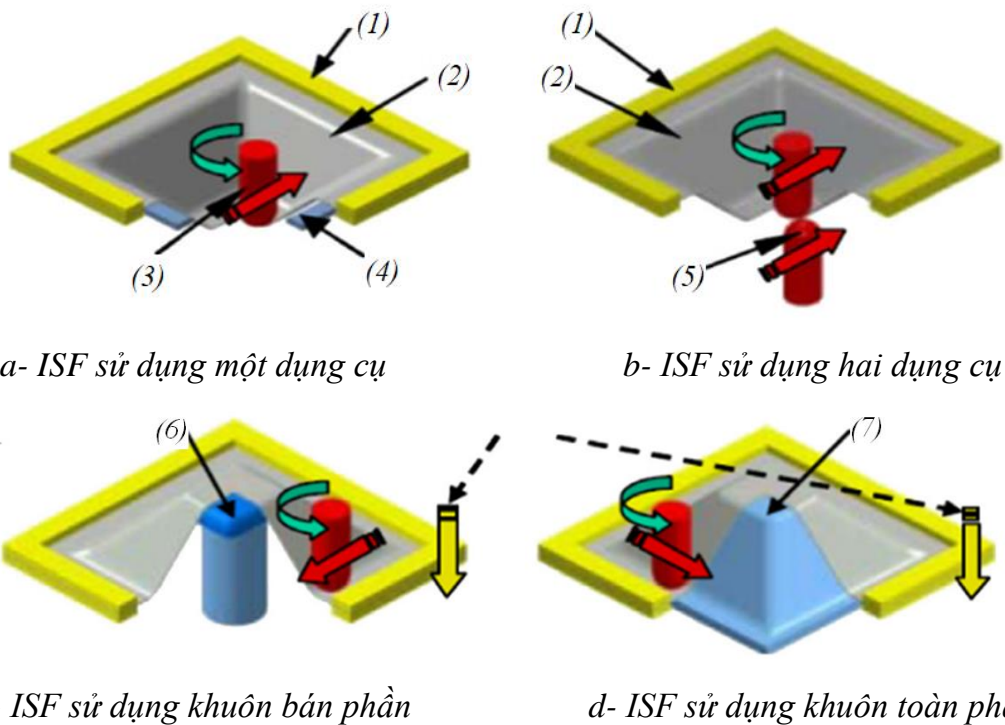
- Đã xây dựng được bài toán tối ưu hóa lượng giảm lực biến dạng dẻo theo các thông số đầu vào cho các chiều dày tấm khác nhau.

- Trên cơ sở kết quả bài toán tối ưu hóa, đã đánh giá chất lượng bề mặt và độ chính xác tạo hình cho các chiều dày tấm vật liệu khác nhau.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ LĨNH VỰC NGHIÊN CỨU

1.1. Gia công biến dạng dẻo theo bước (Incremental Sheet Forming - ISF)

Công nghệ gia công tạo hình sản phẩm kim loại tấm, vỏ bằng biến dạng dẻo theo bước (Incremental Sheet Forming, viết tắt là ISF), còn được gọi là biến dạng dẻo cục bộ liên tục, được công bố lần đầu tiên bởi Leszak Edward vào năm 1967 bởi patent US3342051 [1],[2]. Trong quá trình tạo hình, chỉ một phần kim loại tại vị trí tiếp xúc với dụng cụ biến dạng dẻo cục bộ và vùng biến dạng dẻo này di chuyển trên toàn bộ khu vực cần gia công cho đến khi hoàn thiện sản phẩm. Đây được xem là một phương pháp gia công lý tưởng để tạo hình sản phẩm dạng chấu lõm, rãnh, gờ từ phôi tấm mà không cần đến khuôn hoặc có thể sử dụng các loại khuôn đơn giản (xem minh họa trên Hình 1.1 và Hình 1.2) [1],[3],[4].

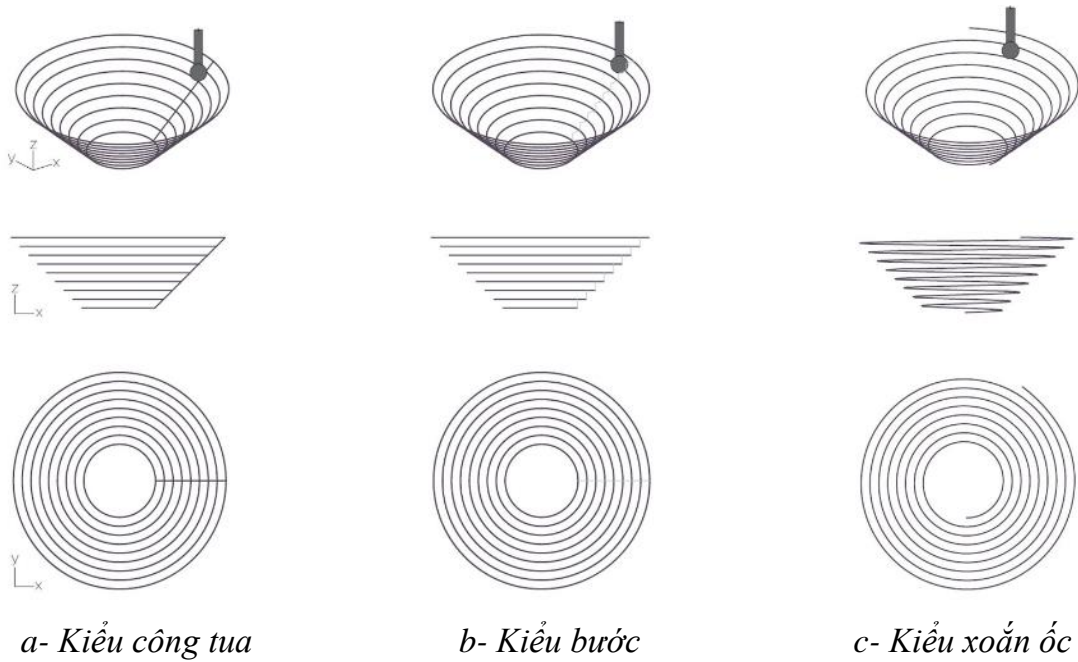


1- Chặn trên; 2- Sản phẩm; 3- Dụng cụ biến dạng dẻo; 4- Chặn dưới;
5- Chày đối áp (phương án hai dụng cụ); 6- Khuôn bán phần; 7- Khuôn toàn phần

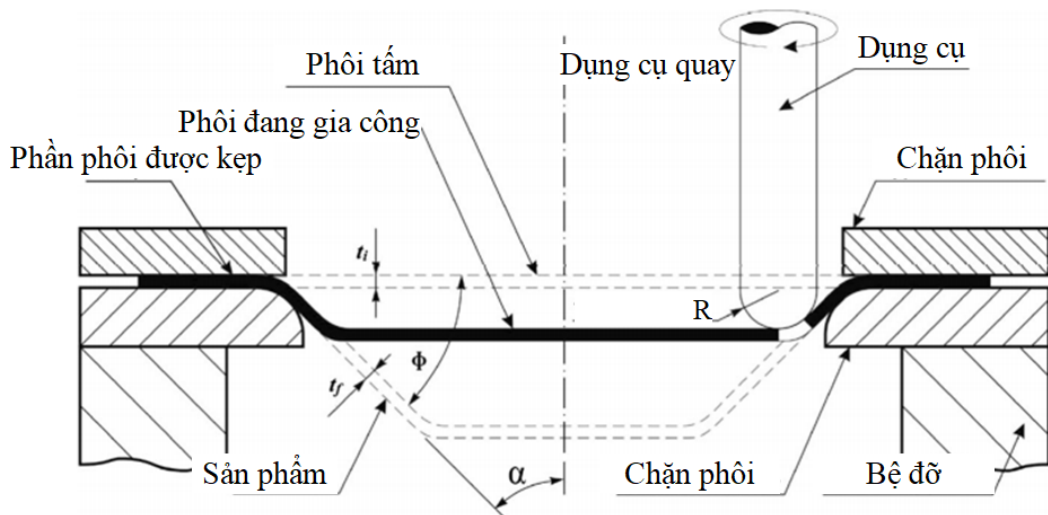
Hình 1.1. Các phương pháp tạo hình bằng công nghệ ISF

Quá trình biến dạng được thực hiện theo từng phần nên lực tạo hình cần thiết nhỏ hơn rất nhiều so với quá trình dập vuốt hoặc dập nổi, do vậy phương pháp ISF có nhiều triển vọng ứng dụng để thay thế cho công nghệ dập vuốt truyền thống. Các thông số hình học điển hình của công nghệ ISF sử dụng một dụng cụ biến dạng được

thể hiện trên Hình 1.3 [5]. Trong Hình 1.3, t_i là chiều dày phôi ban đầu; t_f là chiều dày sản phẩm; R là bán kính ở đỉnh dụng cụ; ϕ là góc tạo hình (góc thành tường). Trong quá trình tạo hình, dụng cụ biến dạng có thể quay quanh trục (tương tự quá trình phay trong gia công cắt gọt) hoặc không quay. Hình 1.4 giới thiệu một số dạng sản phẩm điển hình được tạo hình bởi công nghệ ISF [3],[6],[7],[8],[9].



Hình 1.2. Các kiểu quỹ đạo dụng cụ biến dạng dẻo



Hình 1.3. Các thông số hình học của quá trình gia công ISF

Trong khi phương pháp tiện miết (spinning) thường chỉ ứng dụng để tạo hình các sản phẩm tấm vỏ dạng đối xứng trục, phương pháp ISF có phạm vi sản phẩm đa dạng hơn, profile của sản phẩm phức tạp hơn (xem Hình 1.4).

So với công nghệ dập vuốt và dập nổi truyền thống, phương pháp ISF thể hiện

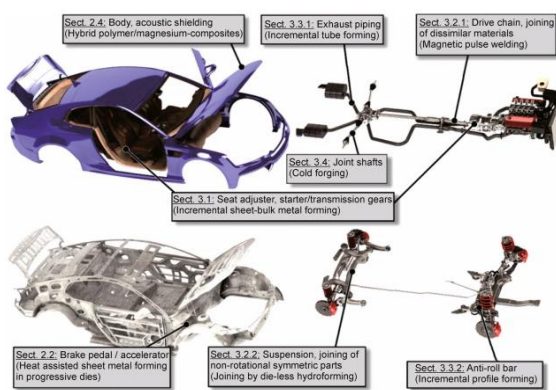
những ưu điểm vượt trội ở các khía cạnh sau:

(i) Lực cần thiết để biến dạng dẻo bằng phương pháp ISF nhỏ hơn nhiều so với phương pháp dập vuốt hoặc dập gân nổi truyền thống.



(a), (b) [3], [9]

(c) [7]



(d) [6]



(e) [8]



(f) [8]

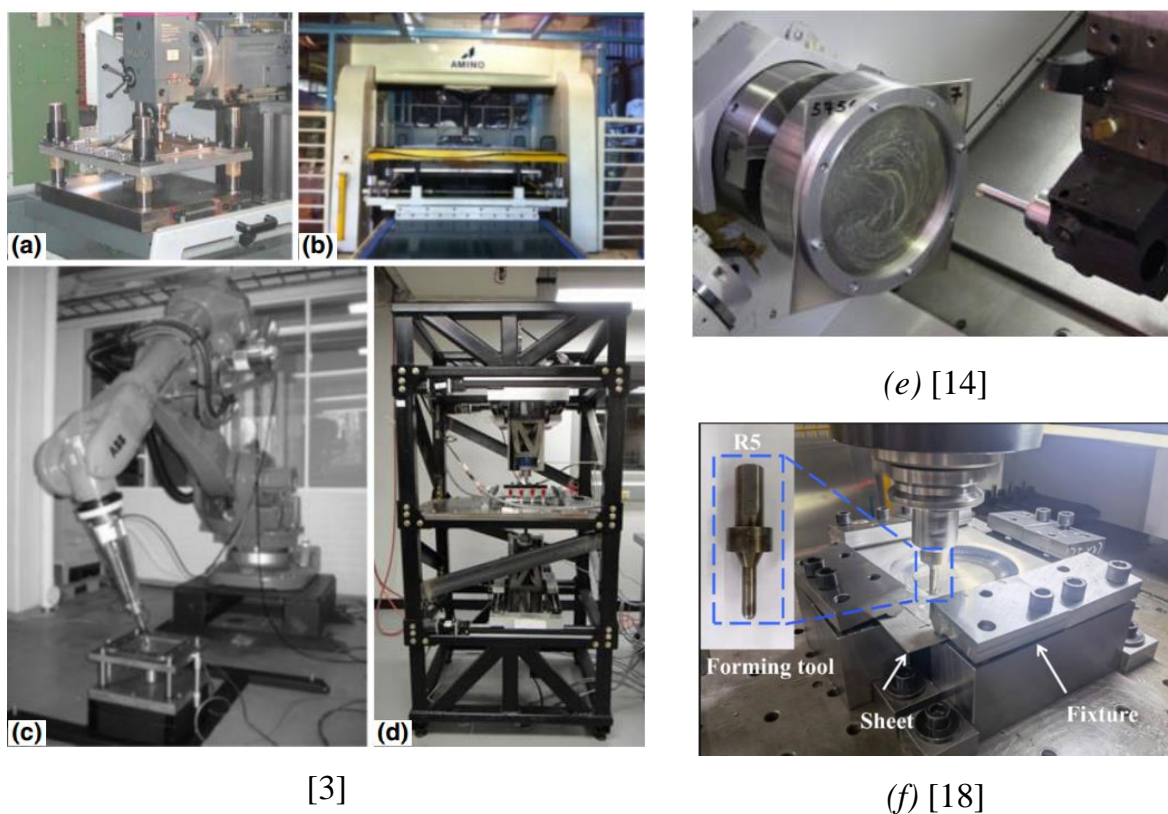
Hình 1.4. Một số sản phẩm điển hình gia công bằng phương pháp ISF

(ii) Vì phương pháp tạo hình bằng công nghệ ISF thường không dùng khuôn nên chi phí khuôn giảm [10], hoặc trong một số trường hợp có thể dùng khuôn bằng gỗ,

bằng nhựa [4],[9], bằng kim loại xốp [11] hoặc có thể tăng chiều dày tấm gia công [12]. Nhờ sự đa dạng này mà công nghệ ISF đặc biệt linh hoạt hơn so với các phương pháp dập truyền thống trong sản xuất thực tế [10].

(iii) Cải thiện khả năng biến dạng dẻo [10], nghĩa là tăng chiều sâu tạo hình của sản phẩm từ tấm phôi phẳng ban đầu [13].

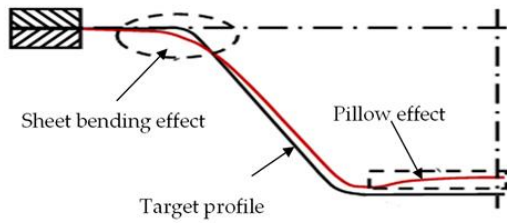
(iv) Thiết bị sử dụng để tạo hình bằng công nghệ ISF (xem minh họa trên Hình 1.5) có thể được lựa chọn linh hoạt hơn, từ nhỏ đến lớn tùy thuộc vào kích thước và biên dạng của sản phẩm cần tạo hình, chẳng hạn: máy tiện [14]; máy phay [3],[4],[15],[16],[17],[18],[19]; các trung tâm gia công hoặc máy chuyên dùng [20]; robot [21] hoặc các máy tự chế [3],[22]...



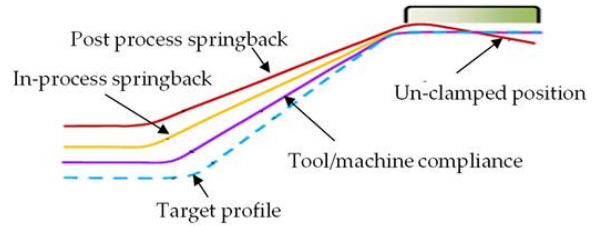
Hình 1.5. Các thiết bị thường được sử dụng trong phương pháp gia công ISF

Bên cạnh những ưu điểm, công nghệ gia công ISF cũng thể hiện những nhược điểm cần phải tiếp tục nghiên cứu như sau:

(i) Độ chính xác về hình dạng và kích thước chưa thực sự cao do biến dạng đàn hồi ngược của vật liệu sau khi tạo hình; do việc uốn rất mạnh tại vùng chuyển tiếp giữa khu vực gia công và khu vực mặt bích không được gia công (xem minh họa trên Hình 1.6 [23]). Đây là một trong những nhược điểm chính ngăn cản sự phát triển và thương mại hóa công nghệ ISF.



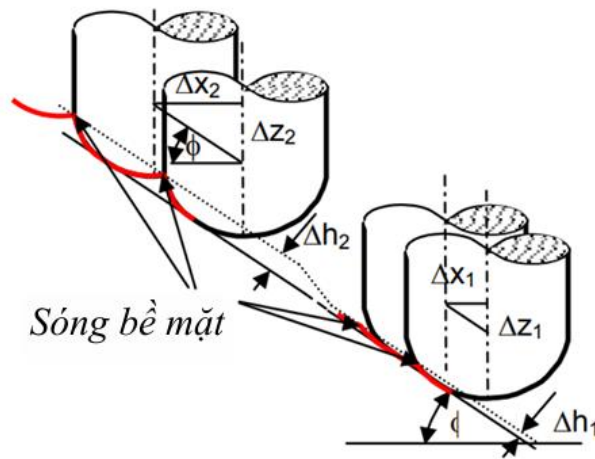
a- Sai lệch hình dạng tổng thể



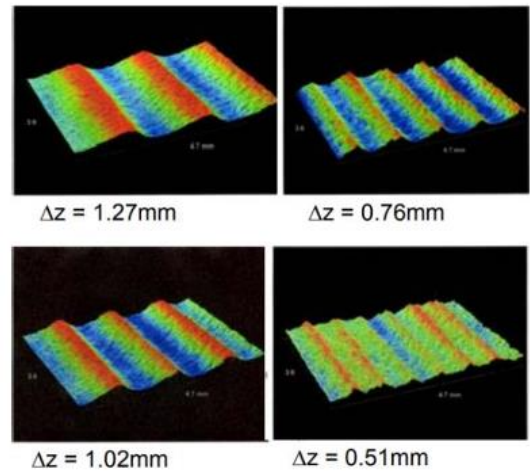
b- Sai lệch hình dạng tại thành sản phẩm

Hình 1.6. Các sai lệch hình dạng thường gặp trong công nghệ ISF

(ii) Chất lượng bề mặt sản phẩm chưa cao cũng là tồn tại lớn của công nghệ ISF. Bề mặt sản phẩm có thể xuất hiện các sóng nhấp nhô do quá trình di chuyển của dụng cụ biến dạng theo bước (xem minh họa trên Hình 1.7 [24]) tạo nên.



a- Mô hình tiến dụng cụ



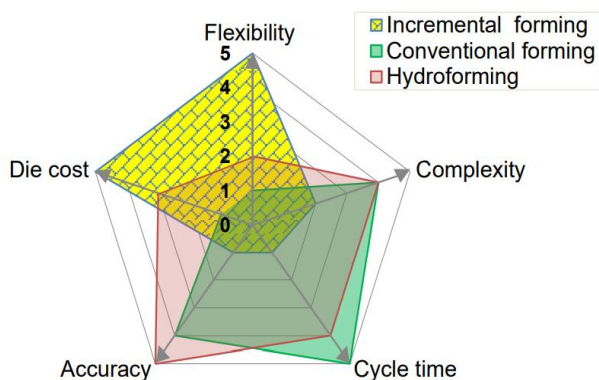
b- Sóng bề mặt sản phẩm

Hình 1.7. Mô hình tiến dụng cụ biến dạng và ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt

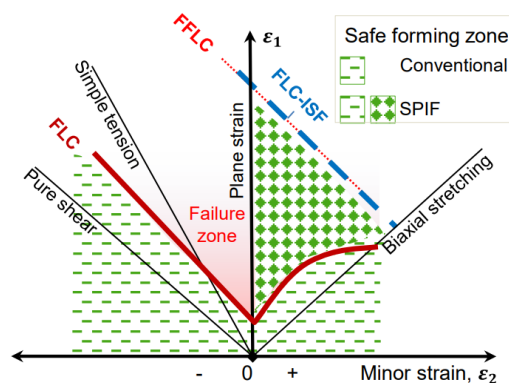
(iii) Hiệu suất gia công: Do đặc trưng cố hữu của biến dạng dẻo theo bước, thời gian gia công cần thiết để hoàn thiện sản phẩm thường lớn hơn thời gian gia công bằng phương pháp dập vuốt. Do vậy, phương pháp ISF thường được đánh giá là phù hợp với lượng sản xuất loạt nhỏ (dưới 1000 sản phẩm) [10].

(iv) Phương pháp ISF dựa trên biến dạng kéo là chính, do đó sự biến mỏng thành quá mức của sản phẩm sau khi được tạo hình cũng là một tiêu chí dùng để đánh giá chất lượng sản phẩm, đặc biệt là với các sản phẩm có góc thành tường lớn (từ 70° trở lên). Biến mỏng thành có thể làm giảm phạm vi kích thước và hình dạng sản phẩm được gia công bằng công nghệ ISF.

So sánh chi tiết giữa biến dạng dẻo theo bước ISF với công nghệ dập tấm truyền thống và công nghệ dập thủy tĩnh được thể hiện như trên Hình 1.8 và Hình 1.9 [10].



Hình 1.8. So sánh ưu, nhược điểm giữa ISF và dập vuốt, dập thủy tinh



Hình 1.9. So sánh giữa đường cong FLC giữa các phương pháp biến dạng

Vì những ưu điểm nổi trội, công nghệ ISF có tiềm năng công nghệ rất lớn trong sản xuất thực tiễn, ứng dụng để chế tạo các sản phẩm dạng tấm vỏ (xem thêm minh họa trên Hình 1.4) như thân, vỏ ô tô; đồ gia dụng; công nghệ tạo mẫu nhanh; chế tạo mô thay thế (xương mặt giả, xương hàm giả, xương đầu giả, xương chân giả...) trong lĩnh vực vật liệu y sinh... [3], [6],[9],[25],[26],[27],[28],[29].

Cho đến nay, nhiều giải pháp khác nhau đã được triển khai nghiên cứu để khắc phục các tồn tại của công nghệ ISF nhằm đưa công nghệ này vào ứng dụng thực tiễn một cách rộng rãi. Các nghiên cứu được triển khai theo nhiều định hướng, gồm cả mô phỏng và thực nghiệm. Chẳng hạn: (1) các nghiên cứu sâu về cơ chế biến dạng dẻo, cơ chế phá hủy nhằm cải thiện khả năng biến dạng dẻo và độ chính xác tạo hình [15],[30],[31],[32],[33],[34]; (2) các nghiên cứu mô hình dự đoán, xác định lực cần thiết để tạo hình [17],[35],[36],[37],[38],[39]; (3) các nghiên cứu lựa chọn các thông số công nghệ, thông số tạo hình phù hợp để cải thiện độ chính xác hình dạng hình học, tăng hiệu suất tạo hình và giảm năng lượng tiêu hao, cải thiện độ nhám bề mặt dạng dạng vĩ mô và vi mô [15],[40],[41],[22],[42],[43],[17],[44],[45],[46]... Các nghiên cứu cũng được triển khai trên nhiều loại vật liệu tấm khác nhau nhằm đa dạng ứng dụng của công nghệ ISF, chẳng hạn các loại thép các bon thấp dạng tấm, các loại tấm hợp kim nhôm biến dạng, các loại thép không gỉ, các loại polymer, hợp kim titan, vật liệu composite, tấm kép

Các nghiên cứu về lực biến dạng đóng vai trò đặc biệt quan trọng trong việc giải thích cơ chế biến dạng dẻo, dự đoán phá hủy/khả năng tạo hình, kiểm soát và tối ưu quá trình biến dạng bằng phương pháp ISF. Việc thay đổi giá trị của các tham số đầu vào như kích thước bước tiến dụng cụ theo phương dọc trục Δz , đường kính (đỉnh)

dụng cụ biên dạng d , góc thành tường ϕ , tốc độ quay dụng cụ n , tốc độ tiến dụng cụ f và độ dày tấm t kèm theo sự hóa bền vật liệu khi tạo hình... đều làm thành phần lực biến dạng cũng như chất lượng tạo hình sản phẩm thay đổi. Ngoài ra, việc cải thiện hiệu quả gia công ISF bằng cách giảm mức độ đàn hồi ngược và độ nhám bề mặt của sản phẩm là một thách thức quan trọng trong quá trình thử nghiệm công nghiệp hóa. Theo đó, nhiều công nghệ được khai thác nhằm giảm lực biến dạng đồng thời nâng cao khả năng tạo hình các sản phẩm tấm bằng phương pháp ISF đã được triển khai như biến dạng ở trạng thái nóng [47],[48],[49],[50],[51]; sử dụng từ trường trợ giúp biến dạng [52],[53]; và sử dụng rung động siêu âm trợ giúp [54],[55].

Trong đó, nghiên cứu ứng dụng rung động siêu âm trợ giúp gia công biến dạng dẻo theo bước (ultrasonic-assisted incremental sheet forming - UISF) thu hút được nhiều sự quan tâm, không chỉ ứng dụng cho các tấm vật liệu kim loại mà còn có thể ứng dụng gia công các tấm polymer nhằm giảm lực biến dạng dẻo, tăng độ chính xác tạo hình sản phẩm, cải thiện điều kiện biến dạng dẻo hoặc nâng cao chất lượng bề mặt sản phẩm... Các phân tích cụ thể về rung động siêu âm và ứng dụng của rung động siêu âm nói chung sẽ được trình bày tóm tắt trong mục 1.2 sau đây.

1.2. Rung động siêu âm và các ứng dụng phổ biến của rung động siêu âm

1.2.1. Rung động siêu âm và phương pháp tạo rung động siêu âm

Rung động siêu âm là một dạng dao động cơ học, có tần số vượt quá ngưỡng nghe của thính giác con người [2],[56]. Ngưỡng âm thanh mà con người nghe được thường có tần số từ 20 Hz đến 20 kHz. Ngưỡng tần số rung động thấp hơn và cao hơn các giá trị giới hạn trên lần lượt được gọi là ngưỡng hạ âm và siêu âm. Kỹ thuật về sóng siêu âm là một nhánh của lĩnh vực âm học, liên quan đến việc tạo và khai thác ứng dụng sóng siêu âm, thường trong phạm vi 20kHz đến 1 THz [2],[56]. Sóng siêu âm và ứng dụng của nó thực sự được quan tâm nghiên cứu, phát triển từ sau thế chiến thứ nhất (1918), sau khi Langevin phát minh ra bộ tạo rung siêu âm sử dụng vật liệu áp điện tinh thể thạch anh (Piezoelectric quartz crystals) [2],[56].

Rung động siêu âm đã và đang được ứng dụng phổ biến trong nhiều lĩnh vực của đời sống. Có thể chia các ứng dụng khai thác rung động siêu âm thành hai nhóm lớn: nhóm siêu âm có cường độ nhỏ, tần số cao và nhóm siêu âm có cường độ cao, tần số thấp [2]. Siêu âm cường độ, còn gọi là siêu âm công suất thấp, nhỏ thường có mật độ tập trung năng lượng khoảng từ 0.1 W/cm^2 đến 1.0 W/cm^2 , tần số thường cỡ vài MHz

trở lên. Loại siêu âm này thường được ứng dụng trong y học (chẩn đoán hình ảnh – còn gọi là siêu âm), kiểm tra khuyết tật không phá hủy (kiểm tra vết nứt, vết gãy, lỗ xóp, các khuyết tật không liên tục khác... trong lòng vật liệu).

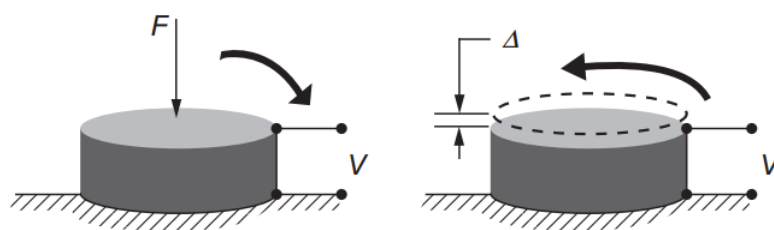
Siêu âm công suất lớn, còn gọi là siêu âm công suất, được ứng dụng trong các lĩnh vực kỹ thuật làm sạch, tẩy rửa, gia công cơ khí, hàn kim loại và chất dẻo, luyện kim bột.... Kỹ thuật này được sử dụng để thay đổi các đặc tính vật lý, hóa học, sinh học của vật liệu. Các ứng dụng của siêu âm công suất nói chung dựa trên nguyên tắc truyền các sóng siêu âm có cường độ cao, nhằm tạo bóng khí trong chất lỏng hoặc hình thành dòng chuyển động của vật chất trong chất rắn để truyền năng lượng siêu âm. Tùy theo yêu cầu mà tần số rung động có thể từ hàng chục kHz đến hàng trăm kHz. Khoảng biên độ rung động thường từ vài μm đến vài chục μm .

Có hai phương pháp chính tạo rung động với tần số siêu âm là: (a) phương pháp khai thác hiệu ứng từ giảo và (b) phương pháp khai thác hiệu ứng áp điện. Phương pháp từ giảo, được nhà khoa học Joule khám phá vào năm 1842, rung động siêu âm được tạo ra bằng cách chuyển đổi năng lượng của từ trường biến thiên thành năng lượng cơ học nhờ vào sự biến dạng của vật liệu.

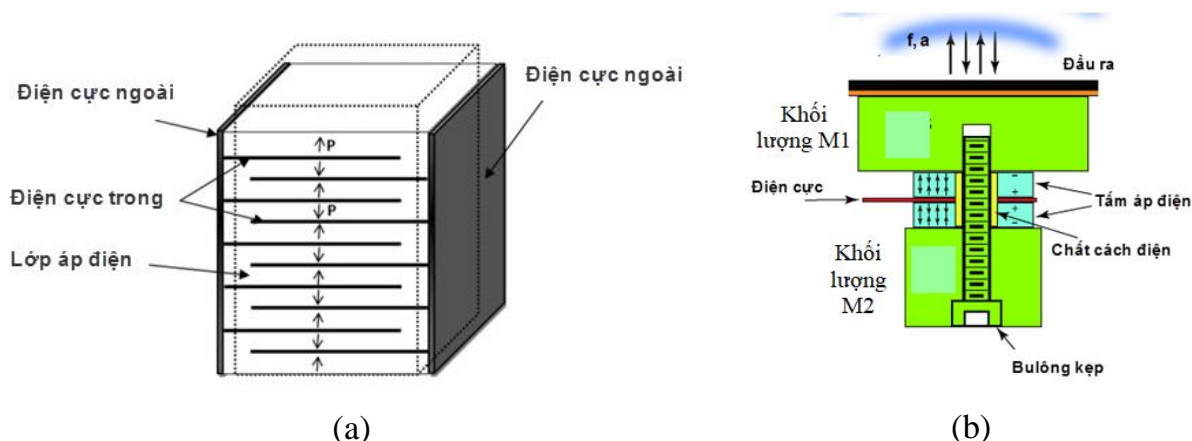
So với phương pháp từ giảo, phương pháp tạo ra rung động siêu âm nhờ hiệu ứng áp điện có nhiều ưu điểm vượt trội, chẳng hạn như: hiệu suất cao hơn, không bị ảnh hưởng của từ trường xung quanh, phát sinh nhiệt ít hơn, kết cấu đơn giản, độ cứng vững cao... Vì những ưu điểm này, các thiết bị ứng dụng siêu âm hiện nay chủ yếu sử dụng hiệu ứng áp điện để tạo ra rung động. Hiệu ứng áp điện (tiếng Anh là Piezoelectric phenomena) là một hiện tượng vật lý được phát hiện đầu tiên vào năm 1817, sau đó được anh em nhà Pierre và Jacques Curie nghiên cứu chi tiết vào những năm 1880. Vật liệu áp điện (PZT) là một loại vật liệu đặc biệt, có khả năng chịu nén rất cao, khi chịu tác dụng của một lực nó sẽ sinh ra một điện áp tại hai cực của tấm. Ngược lại, nếu ta đặt một điện áp thay đổi lên hai mặt tấm vật liệu sẽ gây nên biến dạng thay đổi trên vật liệu này, đặc biệt là biến dạng rất nhạy với giá trị điện áp đặt lên nó. Hình 1.10 mô tả ứng xử cơ - điện của tấm vật liệu áp điện [2].

Có hai kiểu kết cấu phổ biến để tạo rung động siêu âm nhờ hiệu ứng áp điện là: sử dụng các biến tử áp điện dạng tấm mỏng xếp chồng và dạng bản gồm xếp chồng kiểu "Sandwich". Kết cấu biến tử áp điện dạng tấm mỏng xếp chồng (xem minh họa trên Hình 1.11a) thường sử dụng cho thiết bị tạo rung động siêu âm có công suất nhỏ,

chị tải nhỏ, hoặc để điều khiển vị trí đối tượng một cách chính xác.



Hình 1.10. Hiệu ứng áp điện

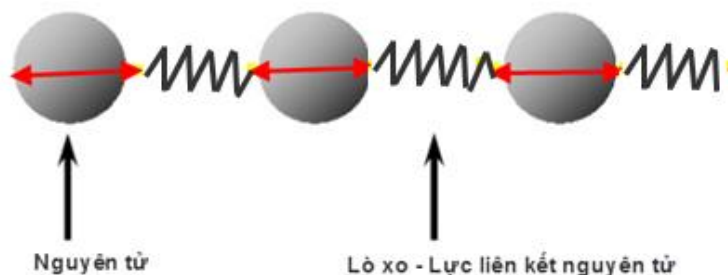


Hình 1.11. Bộ tạo rung siêu âm: (a) dùng tấm piezo nhiều lớp; (b) kết cấu Sandwich

Kết cấu bộ tạo rung động dạng bản gồm xếp chồng kiểu "Sandwich" do Langevin đề xuất vào năm 1918, gồm một số chẵn tấm vật liệu áp điện có chiều dày khoảng 5-10 mm, được kẹp giữa hai tấm kim loại (xem minh họa trên Hình 1.11b). Các tấm kim loại và vật liệu được gọi chung là các “biến tử”. Kết cấu bộ tạo rung kiểu này chỉ phát được rung động có biên độ lớn ở một vài giá trị tần số tương ứng với hiện tượng cộng hưởng của cơ hệ. Với kết cấu trúc, tần số làm việc của hệ biến tử không phụ thuộc vào kích thước ngang của tấm áp điện mà chỉ phụ thuộc vào chiều dày (hoặc chiều dài) của toàn cụm biến tử. Chính vì vậy, để thay đổi tần số của cụm biến tử theo mong muốn, chỉ cần thay đổi chiều dày của hai tấm kim loại mà không cần thay đổi chiều dày của tấm gốm áp điện. Đây là đặc tính quan trọng, giúp kết cấu này được sử dụng phổ biến hiện nay.

Rung động siêu âm được truyền trong môi trường dưới dạng sóng. Dạng quỹ đạo truyền sóng được xác định dựa vào khoảng thời gian biến dạng hoặc rung động trong các vật liệu mà nó truyền qua. Trong lòng bất kỳ vật liệu nào cũng chứa các nguyên tử được liên kết với nhau. Có thể mô tả liên kết giữa các nguyên tử dưới dạng gắn móc với nhau bởi các lò xo như minh họa trên Hình 1.12. Khi năng lượng siêu âm truyền đến sẽ làm các nguyên tử bị xô lệch khỏi vị trí cân bằng và làm cho các nguyên tử bên

canh mất cân bằng theo. Cứ như vậy, năng lượng rung động được truyền đến các vị trí khác trong lòng vật thể.



Hình 1.12. Mô hình liên kết nguyên tử

Do không có hạt vật chất nên trong môi trường chân không không có các nguyên tử đảm nhận vai trò truyền năng lượng. Vì vậy, sóng rung động không thể truyền qua môi trường chân không được. Các đại lượng đặc trưng đối với sóng rung động siêu âm bao gồm: tần số rung (f), biên độ rung (A), vận tốc (c) và chiều dài bước sóng (λ). Tần số rung f là số chu kỳ truyền sóng rung theo một đơn vị thời gian (thường tính là giây, s), với rung động siêu âm thì giá trị tần số rung ở ngưỡng siêu âm ($> 20\text{kHz}$). Biên độ rung động là giá trị lớn nhất của chuyển vị khi có rung động kích thích. Vận tốc truyền sóng phụ thuộc vào khối lượng riêng và mô đun đàn hồi của vật liệu truyền rung động. Chiều dài bước sóng được xác định trực tiếp từ vận tốc truyền sóng và tần số ($\lambda = c/f$).

1.2.2. Các thành phần chính của hệ thống công tác siêu âm

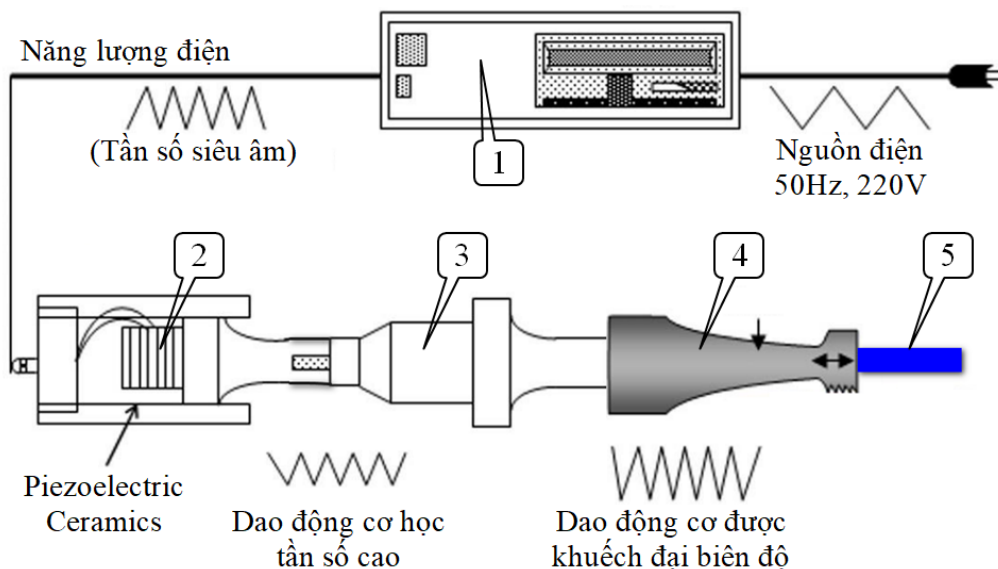
Thông thường, một hệ thống công tác siêu âm thường có hai thành phần được ghép nối với nhau, gồm bộ nguồn phát công suất siêu âm và bộ công tác siêu âm, như minh họa trên Hình 1.13.

Nguồn phát công suất siêu âm (1) là thiết bị phát nguồn điện thay đổi có tần số siêu âm, có điện áp và công suất lớn để cung cấp cho đầu phát rung. Bộ công tác siêu âm thường có cấu tạo gồm bộ chuyển đổi siêu âm (2), đầu khuếch đại biên độ rung siêu âm (3) và (4). Trong thực tế, bộ công tác siêu âm có thể chỉ có (3) hoặc chỉ có (4) hoặc có cả hai. Dụng cụ gia công (5) được gắn trên booster (3) hoặc sonotrode/horn (4) tùy theo từng trường hợp có hay không có (3) hoặc (4). Tương ứng với các ứng dụng khác nhau mà dụng cụ gia công được sử dụng khác nhau, có thể là dụng cụ cắt gọt, đầu hàn hoặc dụng cụ biến dạng dẻo (gia công áp lực), đầu gắn dụng cụ mổ y tế, đầu điện cực xung, đầu phun hạt mài...

1.2.2.1. Bộ chuyển đổi siêu âm

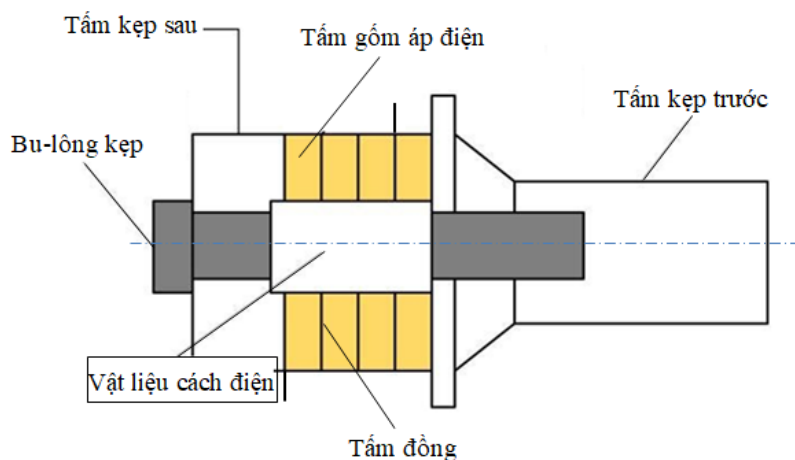
Bộ chuyển đổi siêu âm (2), còn gọi là bộ phát rung (tiếng Anh là ultrasonic

transducer/ convertor), là bộ phận không thể thiếu trong thiết bị tạo rung động siêu âm. Bộ phát rung siêu âm có chức năng chuyển đổi dao động điện thành dao động cơ học với tần số siêu âm. Chức năng này thường được thực hiện nhờ hiệu ứng áp điện (như mô tả ở mục 1.2.1 phía trên). Dao động cơ với tần số siêu âm dùng để trợ giúp các quá trình gia công, siêu âm chuẩn đoán, thăm dò, sục rửa ...



Hình 1.13. Cấu tạo một hệ thống gia công có rung động siêu âm trợ giúp
(1) Nguồn phát rung siêu âm; (2) Bộ chuyển đổi siêu âm;
(3)-(4) Đầu khuếch đại biên độ rung; (5) Dụng cụ gia công.

Bộ phát rung kiểu Langevin được sử dụng rộng rãi trong kỹ thuật tạo rung siêu âm nhờ hiệu quả phát rung và kết cấu đơn giản, kích thước nhỏ gọn, tiện lợi nên thường sử dụng cho các thiết bị siêu âm công suất lớn. Kết cấu bộ phát rung siêu âm kiểu Langevin được minh họa như trên Hình 1.14 [2].



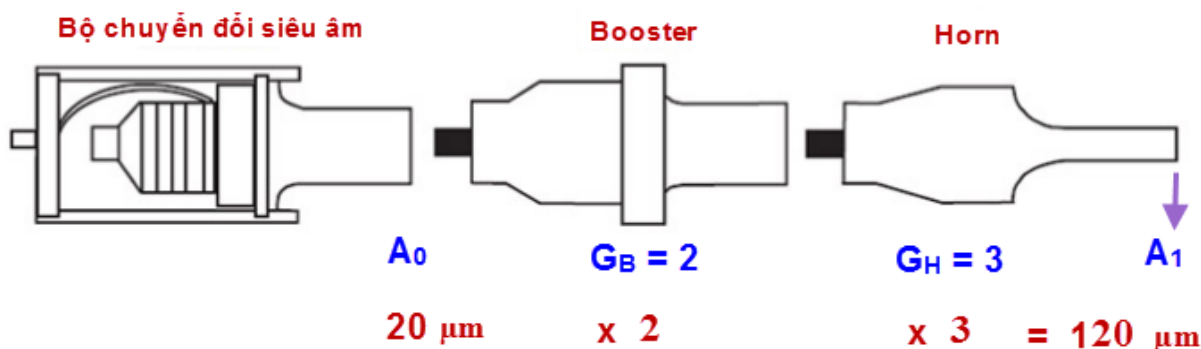
Hình 1.14. Kết cấu một bộ phát rung siêu âm kiểu Langevin

Bộ phát rung kiểu Langevin gồm hai khối kim loại có vai trò kẹp các tấm gốm áp

điện PZT ở giữa. Tấm kim loại phía sau (tail/back mass) có khối lượng riêng lớn (vận tốc truyền âm nhỏ) để chặn sóng âm. Tấm kim loại phía trước (head/ front mass), tiếp xúc với bộ khuếch đại (Booster), có khối lượng riêng nhỏ để truyền sóng âm về phía trước. Vật liệu và kích thước hai tấm này quyết định tần số làm việc của bộ chuyển đổi. Các tấm gốm áp điện PZT không có khả năng chịu kéo nên phải sử dụng bu lông kẹp để tạo biến dạng nén dư ban đầu. Khi có điện áp thay đổi tác dụng lên các tấm PZT, hiệu ứng áp điện sẽ làm tăng hoặc giảm biến dạng nén (xem minh họa trên Hình 1.10 phía trên).

1.2.2.2. Đầu khuếch đại biên độ rung

Bộ khuếch đại biên độ rung vừa có nhiệm vụ khuếch đại biên độ rung, vừa đóng vai trò làm gối đỡ cho cả đầu rung, đồng thời dẫn hướng rung động vào vùng cần tác động rung. Kích thước, khối lượng của bộ khuếch đại được xác định phụ thuộc vào vật liệu chế tạo và tần số rung của đầu rung đã có để đảm bảo cho hệ thống làm việc ở trạng thái cộng hưởng. Đầu khuếch đại thường được chế tạo từ nhôm (Al) hoặc titan (Ti) do các vật liệu này có trở kháng âm thấp, nhẹ, cơ tính tốt. Bộ khuếch đại biên độ rung siêu âm thường được gọi là Booster (chi tiết số (3) trên Hình 1.13). Trong nhiều trường hợp, có thể sử dụng thêm bộ phận nữa gọi là Horn (chi tiết số (4) trên Hình 1.13). Horn thực chất là một đầu truyền sóng đến dụng cụ gia công hoặc vừa truyền sóng vừa khuếch đại thêm biên độ.

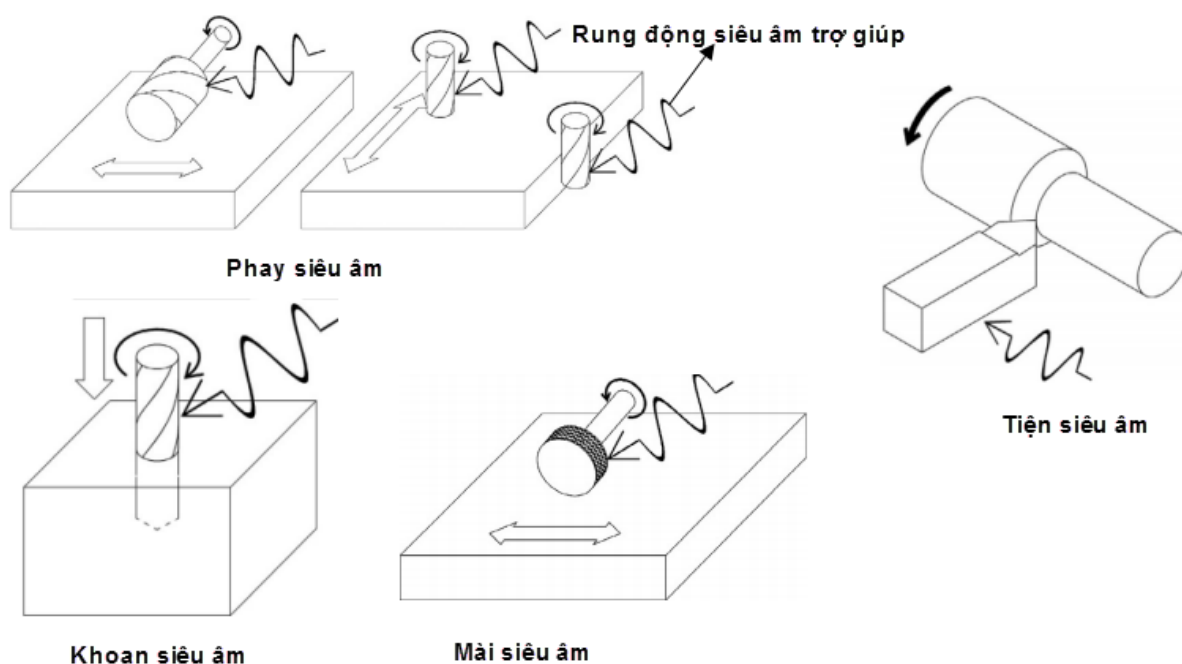


Hình 1.15. Khuếch đại biên độ rung động của Booster nối tiếp Horn

Có thể minh họa khả năng khuếch đại biên độ rung động của Booster nối tiếp Horn như Hình 1.15 [2]. Giả sử biên độ đầu ra của bộ chuyển đổi siêu âm là $A_0 = 20 \mu\text{m}$. Hệ số khuếch đại (Gain) của Booster là $G_B = 2$; của Horn là $G_H = 3$. Khi nối tiếp cả Booster và Horn để truyền rung động thì biên độ thu được ở đầu ra của Horn là $A_1 = A_0 \times G_B \times G_H = 20 \mu\text{m} \times 2 \times 3 = 120 \mu\text{m}$.

1.2.3. Ứng dụng của rung động siêu âm trong sản xuất, đời sống

Ngày nay, rung động siêu âm đã và đang được khai thác, ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực sản xuất, đời sống. Chẳng hạn như trong hàn (hàn siêu âm - Ultrasonic Welding) [2],[56]; trong tẩy rửa sản phẩm (gọi là tẩy, rửa siêu âm) [2],[56],[57]; trong kiểm tra, thăm dò khuyết tật sản phẩm (vết nứt, lỗ rỗng...) [2],[56]; trong y học siêu âm ứng dụng để chẩn đoán hình ảnh hoặc mổ [2],[56]. Bên cạnh đó, rung động siêu âm được sử dụng khá phổ biến để hỗ trợ các quá trình gia công cắt gọt, như gia công tiện, khoan, phay, mài, cắt dây... [2],[56],[58],[59],[60],[61]. Nhờ trợ giúp của rung động siêu âm, chất lượng quá trình gia công (giảm lực cắt, giảm nhiệt cắt, tăng tuổi bền của dụng cụ cắt) và chất lượng sản phẩm được cải thiện đáng kể (giảm độ nhám bề mặt), đặc biệt là đối với các loại vật liệu khó gia công như thép sau nhiệt luyện, các hợp kim niken, titanium, nhôm và các loại vật liệu composite.... Các ứng dụng rung động siêu âm trợ giúp quá trình gia công cắt gọt được minh họa trên Hình 1.16 [2].



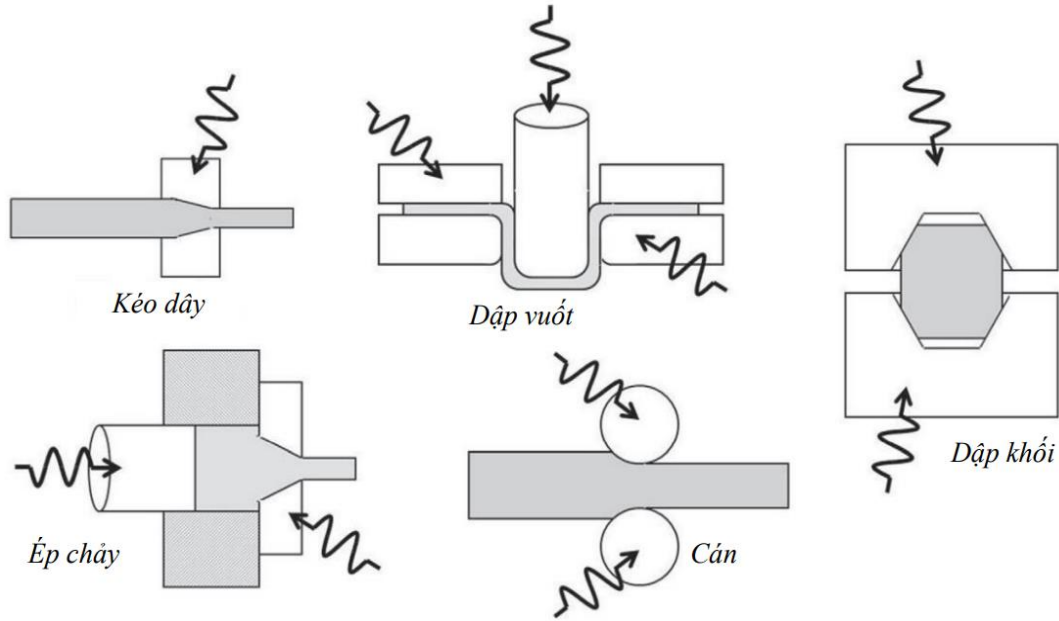
Hình 1.16. Rung động siêu âm trợ giúp một số phương pháp gia công cắt gọt

Bên cạnh đó, kể từ khi B. Langenecker [62] phát hiện hiệu ứng biến mềm vật liệu dưới tác dụng của rung động siêu âm vào năm 1955, nhiều nghiên cứu đã được triển khai để khai thác hiệu quả tích cực của rung động siêu âm trong gia công bằng biến dạng dẻo (gia công áp lực) [63]. Các nghiên cứu gần đây khai thác rung động siêu âm hỗ trợ quá trình gia công bằng biến dạng dẻo sẽ được trình bày cụ thể trong mục 1.3 sau đây.

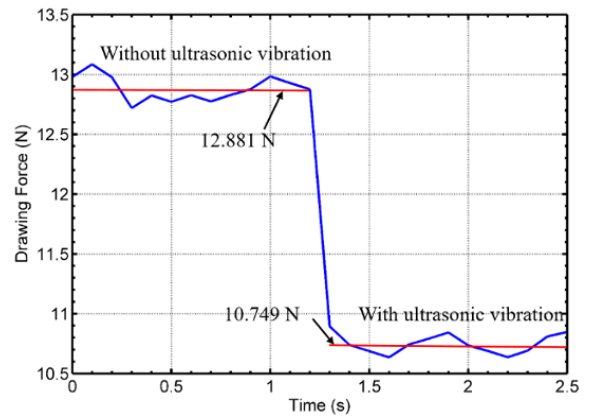
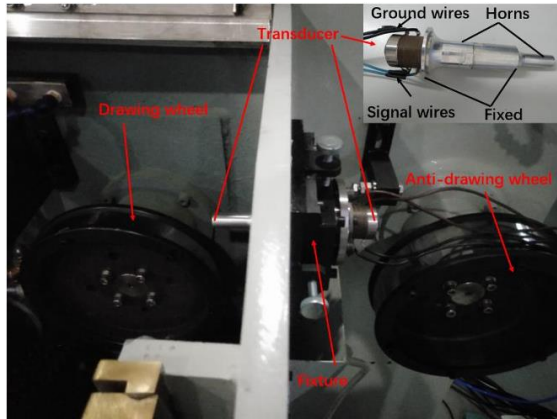
1.3. Các nghiên cứu ứng dụng của rung động siêu âm trong gia công biến dạng dẻo và gia công biến dạng dẻo theo bước

1.3.1. Các nghiên cứu khai thác rung động siêu âm trợ giúp gia công áp lực

Rung động siêu âm đã và đang được triển khai nghiên cứu ứng dụng khá phổ biến trong lĩnh vực gia công áp lực [2],[63],[64],[65]. Hình 1.17 [2] minh họa ứng dụng của rung động siêu âm trợ giúp các phương pháp gia công áp lực điển hình.



Hình 1.17. Rung động siêu âm trợ giúp các phương pháp gia công áp lực



(a)

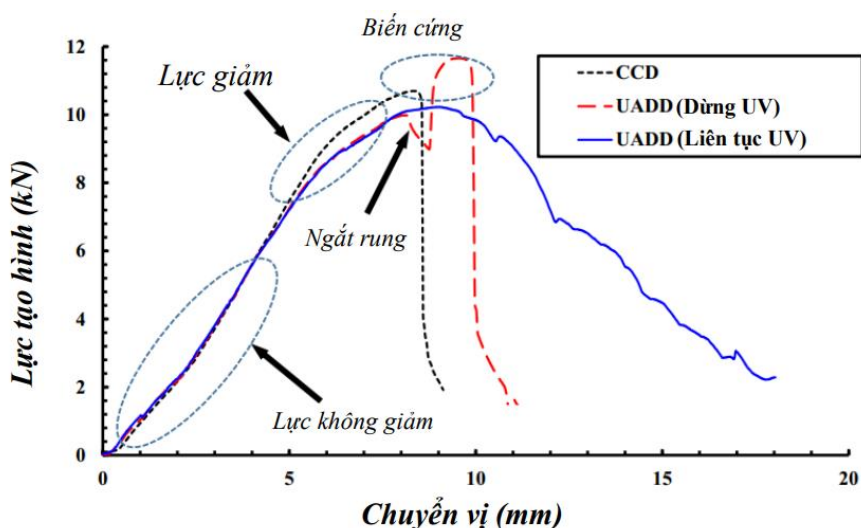
(b)

Hình 1.18. Sơ đồ thực nghiệm (a) và biểu đồ lực kéo theo thời gian (b) khi kéo thép các bon cao có rung động siêu âm trợ giúp

Hengqiang Cao và cộng sự [66] khai thác rung động siêu âm (rung ở tần 28,26kHz và biên độ 20 μ m) hỗ trợ kéo dây thép các bon cao. Kết quả cho thấy, nhờ rung động siêu âm mà lực kéo giảm khoảng 16,6% (xem Hình 1.18b), đồng thời khả năng biến dạng dẻo của dây thép tăng lên. trình bày. Kết quả giảm lực kéo nhờ rung

động siêu âm cũng được xác định qua mô phỏng bởi Shen Liu và cộng sự khi nghiên cứu ảnh hưởng của rung động siêu âm hỗ trợ kéo dây titan [67].

Khi nghiên cứu rung động siêu âm trợ giúp quá trình dập nguội, Ehsan Malekipour và cộng sự [68] nhận thấy, so với dập vuốt thông thường (CCD), lực dập vuốt khi rung động siêu âm (UADD) giảm đáng kể khi tăng chiều sâu vuốt (xem minh họa trên Hình 1.19). Tuy nhiên, nếu thực hiện rung động siêu âm gián đoạn, hiệu ứng biến cứng có thể làm cho tấm kim loại cứng hơn, và do đó lực dập tăng lên. Ngoài ra, kết quả nghiên cứu này cũng cho thấy, rung động siêu âm giúp cải thiện điều kiện biến dạng, do đó, có thể vuốt sâu hơn (xem minh họa trên Hình 1.20). Các kết quả tương tự cũng được công bố trong các tài liệu [69],[70],[71]. Trong các công bố này, ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến lực dập, lượng giảm lực dập, chất lượng quá trình tạo hình được nghiên cứu khá chi tiết.

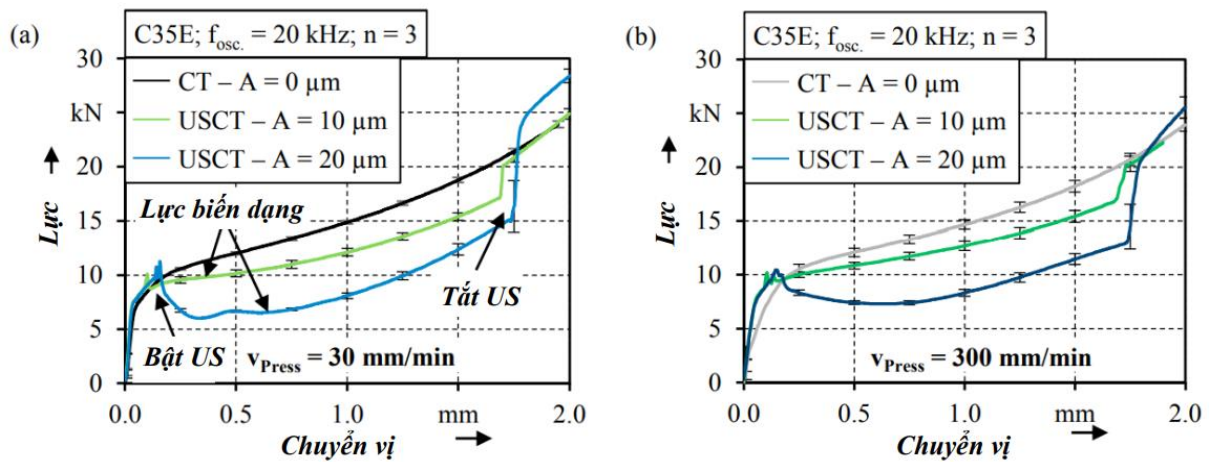


Hình 1.19. Lực dập trong quá trình dập vuốt thông thường và dập vuốt có rung động siêu âm (tần số 20 kHz, biên độ 5 μ m) hỗ trợ, phôi dập có đường kính 39mm

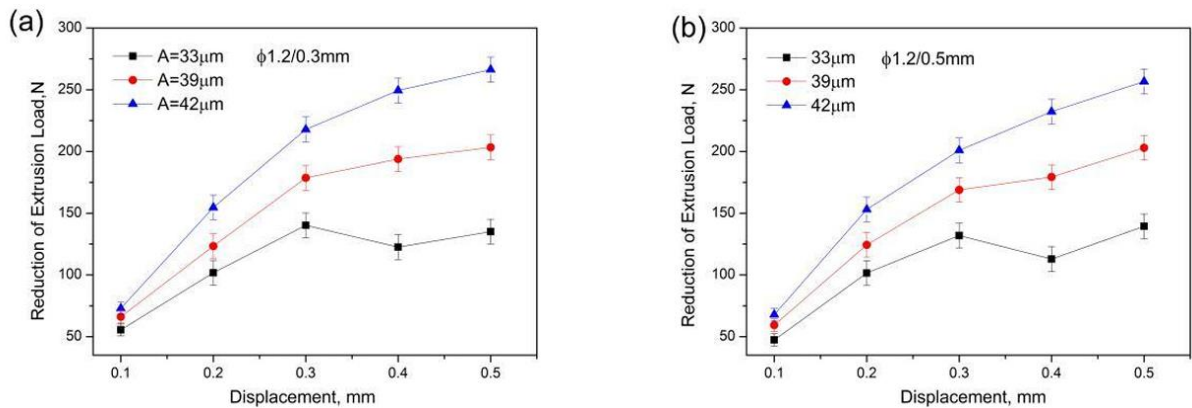


Hình 1.20. Khả năng biến dạng dẻo của dập vuốt thông thường và dập vuốt có rung động siêu âm hỗ trợ

Các kết quả nghiên cứu ứng dụng rung động siêu âm hỗ trợ quá trình dập khối thép C35E ở nhiệt độ thường [72] cho thấy, kể cả khi chèn ở tốc độ thấp và khi chèn ở tốc độ cao thì rung động siêu âm đều làm giảm đáng kể lực biến dạng dẻo (xem Hình 1.21). Từ Hình 1.21 có thể nhận thấy, hiệu quả giảm lực càng lớn hơn khi biên độ rung động lớn hơn. Bên cạnh đó, theo Zhendong Xie và cộng sự [73], tần số rung động, tần số rung động càng lớn thì ứng suất nén trong lòng vật liệu càng giảm. Điều này làm cải thiện khả năng biến dạng của phôi chèn. Kết quả giảm lực biến dạng dẻo nhờ rung động siêu âm trợ giúp quá trình chèn cũng được phát hiện khi chèn titan nguyên chất [74], khi chèn đồng đỏ [75],[65].



Hình 1.21. Đường cong lực - biến dạng khi chèn có rung động siêu âm hỗ trợ và khi chèn thường thép C35e: (a) $v_{Press} = 30$ mm/ph; (b) $v_{Press} = 300$ mm/ph

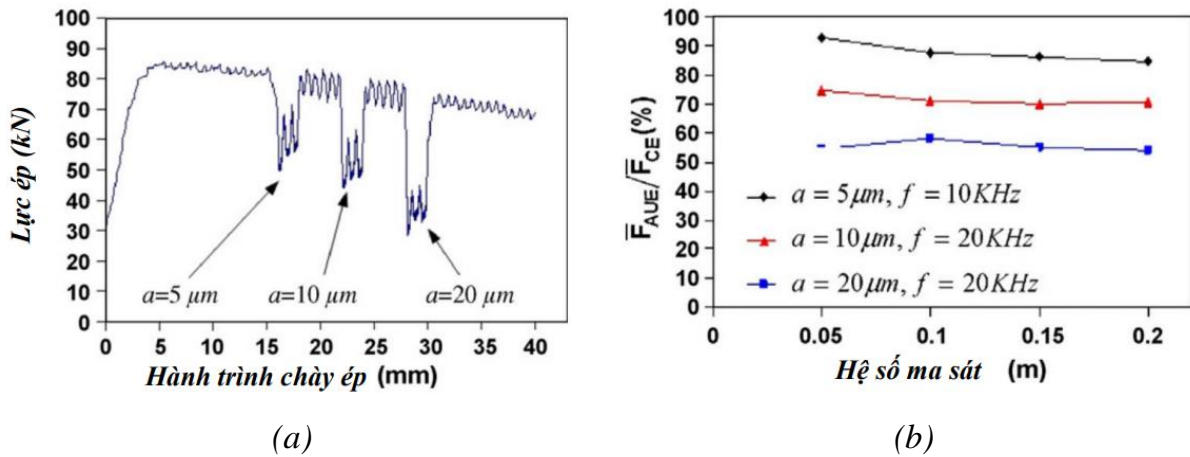


Hình 1.22. Đường cong lượng giảm lực – chuyển vị khi ép chảy hợp kim ZK60Mg có rung động siêu âm trợ giúp

Bên cạnh đó, rung động siêu âm còn được khai thác hỗ trợ quá trình ép chảy, cả ở trạng thái nóng và trạng thái nguội [76],[77],[65]. Yan Lou và cộng sự [76] nghiên cứu ép chảy nguội hợp kim ma-giê ZK60Mg kích cỡ nhỏ. Kết quả cho thấy, rung

động siêu âm làm giảm đáng kể lực ép (xem Hình 1.22). Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy, biên độ rung càng lớn thì lượng giảm lực càng lớn, lượng tăng nhiệt độ của phôi càng lớn. Bên cạnh đó, rung động siêu âm làm cho kích thước hạt tinh thể sau ép chảy đồng đều hơn.

Các kết quả nghiên cứu của Yan Lou và cộng sự [76] khá phù hợp với nghiên cứu của Akbari Mousavi và cộng sự khi mô phỏng quá trình ép chảy thép các bon trung bình 1050 (xem Hình 1.23a) [77]. Theo [77], rung động siêu âm không chỉ làm kim loại bị biến mềm mà còn góp phần làm giảm lực ma sát giữa phôi và khuôn ép chảy (xem Hình 1.23b). Ngoài ra, kết quả tương tự về giảm lực biến dạng, giảm ma sát cũng được Jiqiang Zhai và cộng sự [65] công bố khi ép chảy đồng nguyên chất, tuy nhiên, lượng giảm của các đại lượng này không lớn.



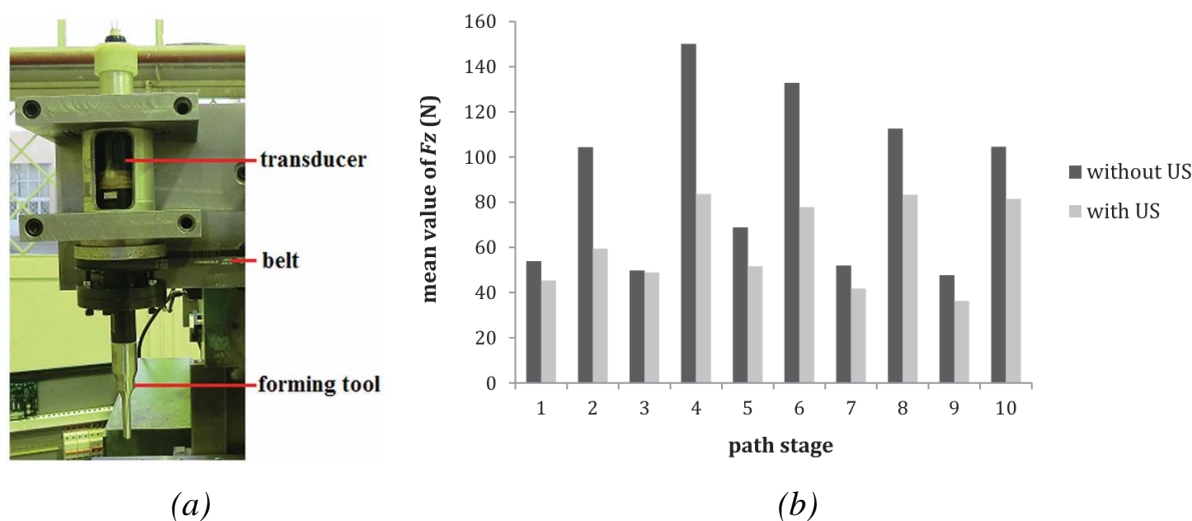
Hình 1.23. Ảnh hưởng của rung động siêu âm đến lực ép (a) và ma sát (b) khi ép chảy, tốc độ ép $v_{\text{press}} = 40 \text{mm/s}$.

Bên cạnh những ứng dụng trong rèn, dập nóng, dập tấm, kéo dây... như đã phân tích ở trên, thời gian gần đây nhiều nghiên cứu ứng dụng rung động siêu âm nhằm cải thiện chất lượng bề mặt sản phẩm cũng đã được thực hiện, chẳng hạn như trong quá trình lăn ép nhằm đánh bóng bề mặt [78],[79],[80]. Kết quả cho thấy, không chỉ chất lượng lớp bề mặt sản phẩm lăn ép được cải thiện mà ứng suất dư trên bề mặt xuất cũng có xu hướng thay đổi. Tuy nhiên, ảnh hưởng của ứng suất dư đến cơ tính tổng thể của sản phẩm không thực sự rõ rệt.

Ngoài ra, khoảng 10 năm trở lại đây, trước tiềm năng của công nghệ gia công ISF và những ưu điểm của rung động siêu âm, đã có nhiều nghiên cứu triển khai ứng dụng rung động siêu âm trợ giúp quá trình ISF (sau đây gọi tắt là UISF). Những nghiên cứu về quá trình biến dạng dẻo UISF sẽ được trình bày tóm tắt trong mục 1.3.2 sau đây.

1.3.2. Gia công biến dạng dẻo theo bước có rung động siêu âm trợ giúp (Ultrasonic-assisted Incremental Sheet Forming – UISF)

Trong khoảng thời gian một thập kỷ gần đây (từ năm 2015), nhiều nghiên cứu ứng dụng rung động siêu âm trợ giúp quá trình gia công ISF đã được triển khai. Có thể coi Mehdi Vahdati và cộng sự [54] là những nhà khoa học đầu tiên thực hiện quá trình này. Các tác giả thiết kế bộ công các siêu âm trong đó dụng cụ biến dạng có thể quay quanh trục (xem Hình 1.24a), phôi tấm hợp kim nhôm AA1050-O có chiều dày $t = 0,7\text{mm}$, bước tiến dụng cụ theo phương thẳng đứng $\Delta z = 0,5\text{mm}$ (không đổi), chiều dài hành trình tiến dụng cụ theo phương ngang $L = 50\text{mm}$ với tốc độ $f = 2000\text{mm/ph}$, tốc độ quay dụng cụ $n = 125\text{ vg/ph}$, đường kính dụng cụ $d = 5\text{mm}$. Trong công bố [54], nghiên cứu thực hiện bằng cách tạo rãnh thẳng, tổng cộng 10 hành trình. Kết quả cho thấy, lượng giảm lực biến dạng theo phương tiến dụng cụ (F_z) trung bình đạt khoảng 26,3% (xem Hình 1.24b). Ngoài ra, độ nhám bề mặt sản phẩm sau khi gia công bằng UISF so với ISF cũng được cải thiện đáng kể (R_z giảm 54,9% và R_a giảm 52,5%).



Hình 1.24. Ảnh chụp bộ công tác siêu âm (a) và kết quả thống kê giá trị lực mỗi hành trình tiến dụng cụ có và không có rung động siêu âm trợ giúp (b).

Hiệu quả của rung động siêu âm cũng đã được Saeid Amini và cộng sự [55] công bố với điều kiện thí nghiệm tương tự như trong [54]. Theo đó, lượng giảm lực F_z theo chiều tiến dụng cụ đạt đến 36% ở hành trình thứ 2-3. Ngoài ra, độ chính xác tạo hình của sản phẩm cũng như khả năng biến dạng dẻo của vật liệu khi gia công bằng UISF được cải thiện rõ rệt so với ISF.

Bên cạnh đó, với các điều kiện thí nghiệm tương tự [54],[55], kết quả nghiên cứu của M. Vahdati trong [81] cho thấy, rung động siêu âm làm giảm ma sát tiếp xúc giữa

dụng cụ biến dạng và phôi khoảng hơn 20%. Nhờ đó, thành phần lực biến dạng theo phương tiến dụng cụ biến dạng giảm.

Kết quả nghiên cứu bằng mô phỏng UISF và ISF biến dạng hai loại hợp kim nhôm AA1050, AA5052 của Yanle Li và cộng sự [82] cho thấy, tỉ lệ lực giảm phụ thuộc vào biên độ rung. Với hai loại đường kính dụng cụ ($d = 10\text{mm}$ và $d = 20\text{mm}$), biên độ rung càng lớn thì tỉ lệ lực giảm càng lớn, đồng thời, đường kính dụng cụ biến dạng dẽo lớn hơn thì tỉ lệ lực giảm lớn hơn. Ngoài ra, kết quả mô phỏng cũng cho thấy, biên độ rung càng lớn thì hiệu quả biến dạng càng lớn. Tuy vậy, công bố này mới chỉ dừng lại ở mô phỏng, chưa thực hiện thí nghiệm kiểm chứng.

Cũng nghiên cứu gia công UISF ứng dụng cho hợp kim nhôm AA-1050-O, Li Yanle và cộng sự [83] thực hiện trong điều kiện $\Delta z = 0,1\text{ mm}$ và $f = 800\text{ mm/ph}$, tạo rãnh thẳng với chiều dài $L = 50\text{mm}$, đường kính dụng cụ $d = 5\text{mm}$ và dụng cụ không quay trong suốt quá trình gia công. Kết quả cho thấy, tần số rung càng lớn thì diện tích vùng chảy dẽo càng lớn, đồng thời, tỉ lệ lực biến dạng giảm càng lớn. Điều này cho thấy, rung động siêu âm giúp cho quá trình chảy dẽo của vật liệu thuận lợi hơn. Ngoài ra, theo kết quả nghiên cứu này, rung động siêu âm làm giảm ứng suất, do đó giảm lực cần thiết gây biến dạng dẽo và cải thiện khả năng biến dạng dẽo của vật liệu.

Cũng nghiên cứu biến dạng tấm hợp kim nhôm AA-1050-O (dày 0,5mm và 1,0mm) bằng phương pháp UISF, Weidong Zhai và cộng sự [84] khảo sát bước tiến dụng cụ theo phương thẳng đứng trong phạm vi khá nhỏ ($\Delta z = 0,02-0,06-0,1-0,15-0,2\text{ mm}$), dụng cụ biến dạng dẽo có đường kính 5mm, dụng cụ không quay hoặc quay với tốc độ 1000vg/ph. Kết quả cho thấy, nhờ rung động siêu âm, lực biến dạng theo phương thẳng đứng giảm từ 20% đến 40%, trong khi đó lực biến dạng theo phương ngang giảm khoảng 60%. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy, tốc độ quay của dụng cụ hầu như không ảnh hưởng đến lượng giảm lực biến dạng dẽo. Bên cạnh đó, chất lượng bề mặt tăng khi tăng bước tiến dọc trục Δz khi có rung động siêu âm trợ giúp. Kết quả nghiên cứu cho thấy, rung động siêu âm giúp cải thiện điều kiện bôi trơn, do đó góp phần tăng chất lượng bề mặt và giảm lực biến dạng theo phương ngang.

Ngoài các nghiên cứu trên, nhiều nghiên cứu khác về quá trình gia công UISF cũng đã được triển khai với vật liệu là tấm hợp kim nhôm AA1050-O [85],[86],[87],[88],[89] hoặc hợp kim nhôm AA1060 [90]. Điểm chung của các nghiên cứu này là vật liệu nghiên cứu khá mềm, dẽo, dễ biến dạng. Do đó, hiệu quả giảm lực

biến dạng dẻo (xét theo giá trị lực thực tế cần thiết để biến dạng) là khá nhỏ. Ngoài ra, bước tiến dụng cụ theo phương thẳng đứng Δz khá nhỏ (thường tối đa đạt đến 0,5mm), nhỏ hơn rất nhiều so với bước tiến khi gia công bằng ISF thông thường [10],[3]. Điều này làm tăng thời gian biến dạng khi so với ISF thông thường, nghĩa là giảm hiệu suất tạo hình sản phẩm. Bên cạnh đó, phần lớn các nghiên cứu này thực hiện mô phỏng, kết quả nghiên cứu thực nghiệm kiểm chứng chỉ được thực hiện ở một số điều kiện xác định. Do đó, hiệu quả thực sự của rung động siêu âm đến việc giảm lực biến dạng chưa được đánh giá đầy đủ.

Đến nay, các nghiên cứu ứng dụng UISF tạo hình các vật liệu khó gia công hơn so với hợp kim nhôm AA1050 và AA1060 khá ít, có thể kể đến là các nghiên cứu tạo hình hợp kim nhôm AA5052 [91],[92], hợp kim nhôm AA6061-T6 [93] hoặc thép Q235 [94]. Tương tự các nghiên cứu về UISF đã được đề cập đến trên, trong thực nghiệm, các nghiên cứu này chủ yếu sử dụng bước tiến dọc trục khá nhỏ (thường dưới 1.0mm). Các nghiên cứu thực nghiệm để tìm ra bộ thông số tối ưu hầu như chưa có.

Qua phân tích các nghiên cứu trên về ISF và UISF cho thấy, quá trình gia công UISF giúp giảm mạnh thành phần lực biến dạng, giảm lực ma sát tiếp xúc giữa dụng cụ biến dạng và phôi. Đồng thời, rung động siêu âm cũng giúp khả năng biến dạng của vật liệu tăng, nghĩa là chiều sâu tạo hình h tăng và/hoặc góc thành tường ϕ tăng. Đồng thời, rung động siêu âm góp phần cải thiện đáng kể chất lượng bề mặt cũng như chất lượng tạo hình (độ chính xác hình dạng sản phẩm). Tuy vậy, hầu như các nghiên cứu hiện nay mới chỉ quan tâm đến các vật liệu dễ biến dạng dẻo. Đồng thời, bước tiến dụng cụ theo phương dọc trục khi nghiên cứu về UISF khá nhỏ khi so với ISF [10],[95], không giúp rút ngắn thời gian tạo hình sản phẩm (một nhược điểm cố hữu của phương pháp ISF). Do đó, việc nghiên cứu tăng bước tiến dụng cụ theo phương dọc trục có ý nghĩa lớn, giúp cải thiện thời gian gia công, tăng tính ứng dụng của UISF trong tạo hình các sản phẩm dạng tấm vỏ là nhiệm vụ có tính thời sự cấp thiết.

1.4. Kết luận Chương 1

- Công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước ISF có tiềm năng ứng dụng lớn, đặc biệt là sản xuất tấm vỏ phức tạp, hứa hẹn thay thế cho công nghệ dập nguội truyền thống phục vụ công nghệ sản xuất, chế tạo ô tô, đặc biệt là tạo mẫu nhanh các sản phẩm, rút ngắn thời gian thử nghiệm trước khi đưa vào sản xuất thực tế.

- Rung động siêu âm đã và đang được ứng dụng phổ biến trong sản xuất và đời

sống. Trong sản xuất, bên cạnh hỗ trợ gia công cắt gọt, gia công biến dạng dẻo truyền thống, gần đây rung động siêu âm đã bước đầu được nghiên cứu, ứng dụng trong lĩnh vực gia công biến dạng theo bước ISF.

- Qua phân tích các công bố gần đây cho thấy, nhờ có rung động siêu âm hỗ trợ quá trình biến dạng ISF mà lực biến dạng dẻo giảm mạnh, chất lượng tạo hình sản phẩm tăng. Tuy vậy, các nghiên cứu gần đây về rung động siêu âm hỗ trợ ISF thường có bước tiến theo phương dọc trục khá nhỏ, làm giảm thời gian gia công so với khi gia công bằng ISF thông thường. Ngoài ra, các nghiên cứu này hầu hết chỉ thực hiện bằng mô phỏng, sau đó thí nghiệm ở một số điều kiện xác định. Hầu như chưa có các nghiên cứu hoàn toàn mang tính thực nghiệm khai thác rung động siêu âm hỗ trợ gia công ISF. Do đó, để đánh giá và khai thác hết những tiềm năng ứng dụng của phương pháp gia công UISF, cần tiếp tục triển khai nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ (trong đó, cần khảo sát thực nghiệm với bước tiến dụng cụ theo phương dọc trục lớn hơn) đến quá trình tạo hình, đặc biệt là đến mức độ giảm lực biến dạng.

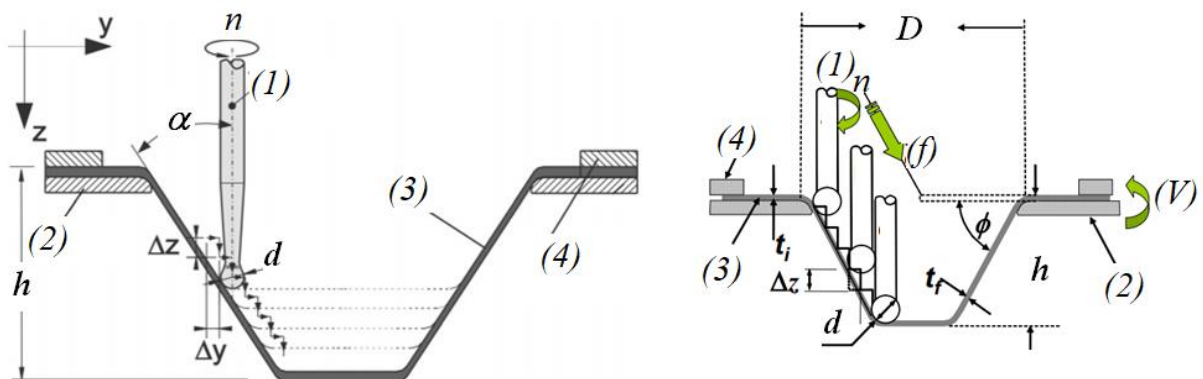
Cơ sở lý thuyết biến dạng dẻo ISF thông thường và UISF khi tạo hình sản phẩm phẩm kim loại dạng tấm, vỏ phục vụ cho quá trình nghiên cứu tiếp theo sẽ được trình bày trong chương 2 sau đây.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Các thông số cơ bản khi gia công biến dạng theo bước

2.1.1. Thông số hình học và thông số công nghệ

Các thông số hình học và thông số công nghệ của phương pháp gia công ISF được minh họa trên Hình 2.1 [5],[96]. Trước khi gia công, phôi tấm ban đầu (3) được kẹp chặt bởi tấm đỡ dưới (2) và tấm kẹp trên (4) bằng các bu-lông. Trong quá trình tạo hình, dụng cụ (1) tiến theo trục z với bước tiến Δz xác định để tạo nên quá trình biến dạng dẻo. Đồng thời, dụng cụ gia công thực hiện chuyển động f theo contour (quỹ đạo) biến dạng được thiết kế trước bởi các phần mềm CAM. Hết một hành trình biến dạng với chiều sâu Δz như trên, dụng cụ thực hiện chuyển động tiến ngang về phía tâm phôi một lượng Δx và sau đó tiếp tục biến dạng dẻo sâu thêm một lượng Δz (xem thêm minh họa trên Hình 1.2). Quá trình này được thực hiện liên tục cho đến khi hết chiều sâu cần tạo hình h . Lưu ý rằng, trong quá trình gia công ISF thông thường, dụng cụ biến dạng dẻo có thể chuyển động quay quanh trục (với tốc độ n) hoặc không quay. Các nghiên cứu trước đây cho thấy, dụng cụ biến dạng dẻo quay quanh trục chỉ có tác dụng cải thiện điều kiện tiếp xúc giữa bề mặt phôi và dụng cụ, hầu như không ảnh hưởng đến các thành phần lực tạo hình [10],[95],[84].



Hình 2.1. Các thông số hình học và thông số công nghệ khi gia công bằng phương pháp biến dạng dẻo theo bước ISF

Các thông số hình học (thông số tạo hình) và thông số công nghệ cơ bản của công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước gồm:

- Chiều dày ban đầu của phôi tấm: t_i (mm)
- Chiều dày sản phẩm (sau khi tạo hình): t_f (mm)
- Góc tạo hình/góc thành tường (wall angle): ϕ (độ)

- Chiều sâu tạo hình: h (mm)
- Đường kính (đỉnh) dụng cụ biến dạng: d (mm)
- Bước tiến dụng cụ biến dạng theo phương dọc trục: Δz (mm/vg)
- Bước tiến dụng cụ biến dạng theo phương hướng kính: Δy (mm/vg)
- Tốc độ quay của dụng cụ: n (vg/ph) hoặc ω (rad/s)
- Tốc độ tiến dụng cụ: f (mm/ph)

2.1.2. Mối quan hệ giữa các thông số hình học - thông số công nghệ và ảnh hưởng đến quá trình biến dạng dẻo

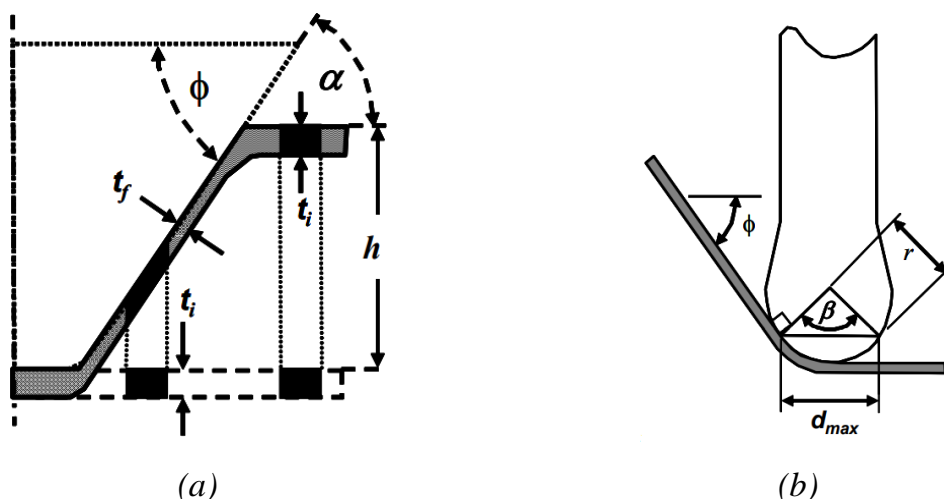
Giả sử quá trình biến dạng dẻo tấm xảy ra đồng đều, khi đó chiều dày ban đầu tấm t_i và chiều dày thành bên của sản phẩm sau khi tạo hình t_f có mối quan hệ hình học với nhau (Hình 2.2a [24],[97]) theo biểu thức sau:

$$t_f = t_i \times \sin \alpha = t_i \times \cos \phi \tag{2.1}$$

Nếu phôi tấm đã được biến dạng dẻo sơ bộ trước khi thực hiện quá trình gia công ISF thì mối quan hệ giữa chiều dày sản phẩm t_f với chiều dày phôi được xác định theo biểu thức [24] sau:

$$t_f = t_p \times \frac{\sin \phi_f}{\sin \phi_p} \tag{2.2}$$

Trong đó: t_p là chiều dày phôi sau khi tạo hình sơ bộ; ϕ_f là góc thành tường của sản phẩm và ϕ_p là góc thành tường của phôi đã được tạo hình sơ bộ.



Hình 2.2. Quan hệ giữa các thông số hình học và thông số công nghệ trong ISF.

Theo [97], giả sử đỉnh dụng cụ biến dạng dẻo có dạng chỏm cầu bán kính r , các thông số trong vùng biến dạng dẻo (xem Hình 2.2b) có mối quan hệ với nhau. Với mỗi góc thành tường ϕ xác định, sử dụng mối quan hệ hình sin ta sẽ có:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \times \cos\beta \quad (2.3)$$

Trong đó:

$$c = d_{\max}; a = b = r; \beta = 2\phi \quad (2.4)$$

Thay biểu thức (2.4) vào biểu thức (2.3) và rút ra được biểu thức:

$$d_{\max} = r\sqrt{2(1 - \cos\beta)} \quad (2.5)$$

Chiều dài cung tiếp xúc giữa đỉnh dụng cụ biến dạng dẻo và phôi gia công chiếu lên phương ngang được xác định theo biểu thức:

$$\bar{d} = \frac{d_{\max}}{2} \quad (2.6)$$

Cũng theo [97], nếu trong quá trình tạo hình dụng cụ biến dạng dẻo thực hiện chuyển động quay xung quanh trục của nó, tốc độ quay (ω) có thể được xác định theo biểu thức sau:

$$\omega = \frac{f}{\pi d} = \frac{f}{\pi \times r \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos 2\phi)}} \quad (2.7)$$

Trong đó: f là vận tốc tiến dụng cụ biến dạng dẻo.

Một trong những thông số ảnh hưởng lớn đến khả năng tạo hình sản phẩm bằng phương pháp ISF là góc thành tường ϕ . Theo J. Jeswiet và cộng sự [98], giữa góc thành tường cực đại ϕ_{\max} và chiều dày ban đầu t_i của phôi của một số hợp kim nhôm có mối quan hệ xác định với nhau theo biểu thức:

$$\text{Phôi nhôm AA 3003-O:} \quad \phi_{\max} = 8.5t_i + 60.7^\circ \quad (2.8)$$

$$\text{Phôi nhôm AA 5754-O:} \quad \phi_{\max} = 3.3t_i + 58.3^\circ \quad (2.9)$$

Với các loại vật liệu khác, góc tạo hình cực đại ϕ_{\max} của các sản phẩm gia công bằng phương pháp ISF được thống kê như trong Bảng 2.1.

Bên cạnh các thông số hình học đã mô tả trên, lượng tiến dụng cụ biến dạng dẻo theo phương dọc trục Δz luôn được coi là thông số quan trọng nhất của phương pháp gia công ISF. Lượng tiến dụng cụ Δz không chỉ ảnh hưởng đến lực biến dạng mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bề mặt gia công. Nếu coi đỉnh dụng cụ biến dạng dẻo có dạng chỏm cầu, mô hình di chuyển dụng cụ biến dạng dẻo khi gia công bằng phương pháp ISF được thể hiện như trên Hình 1.7a (xem Chương 1). Dễ dàng nhận thấy, sự phối hợp chuyển động của dụng cụ theo phương dọc trục (Δz) và hướng kính

(Δy) sau mỗi bước gia công để lại một sóng kim loại trên bề mặt sản phẩm. Kích thước sóng này càng lớn khi Δz và Δy càng lớn.

Bảng 2.1. Góc tạo hình cực đại của một số vật liệu khi tạo hình bằng ISF

STT	Vật liệu	Góc tạo hình cực đại ϕ (độ)	Chiều dày ban đầu t_i (mm)	Ghi chú
1	AA 1050 – O	67.5°	1.21	
2	AA 6114 – T4	60°	1.0	
3	Al 3003 – O	78.1°	2.1	
4	Al 3003 – O	72.1°	1.3	
5	Al 3003 – O	71°	1.21	
6	Al 3003 – O	67°	0.93	
7	Al 5754 – O	62°	1.02	
8	Al 5182 – O	63°	0.93	
9	AA 6111–T4P	53°	0.93	
10	Thép DC04	65°	1.0	
11	Đồng đỏ	65°	1.0	
12	Đồng thau	40°	1.0	
13	DDQ	70°	1.0	
14	HSS	65°	1.0	

Kết quả tổng hợp của McAnulty và cộng sự [95] cho thấy, trong khi một số nghiên cứu cho rằng bước tiến Δz tăng thì khả năng biến dạng dẻo tăng lên thì cũng có những công bố cho thấy Δz giảm sẽ giúp khả năng biến dạng dẻo tăng lên. Thông thường, giá trị của Δz trong hầu hết các nghiên cứu lựa chọn trong khoảng 0,1-2mm. Bảng 2.1 thống kê một số bước tiến Δz tương ứng với các loại vật liệu đã được công bố trong thời gian gần đây [95].

Tốc độ tiến dụng cụ f (mm/ph) cũng là một thông số có ảnh hưởng lớn đến quá trình tạo hình bằng phương pháp ISF. Phần lớn các nghiên cứu trước đây (được tổng hợp trong [95]) cho thấy, tốc độ tiến dụng cụ giảm thì khả năng biến dạng dẻo tăng. Bảng 2.3 [95] thống kê một số tốc độ tiến dụng cụ tương ứng với các loại vật liệu đã được công bố trong thời gian gần đây.

Bảng 2.2. Bước tiến dụng cụ biến dạng theo phương dọc trục khi tạo hình bằng ISF

STT	Vật liệu	Bước tiến Δz (mm)	Ghi chú
1	AA7075-O	0.2; 0.5	
2	PVC	0.2; 0.5	
3	PVA	0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1.0	
4	AA1050-O	0.3–2.0	
5	AA2024-O	0.08; 0.36; 0.78; 1.2; 1.48	
6	PVC	0.2; 0.6; 1.0; 1.4; 1.8	
7	AA1050-O	0.1; 0.3; 0.5	
8	AA1050-O	0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 0.9; 1.2; 1.9	
9	AA3003-O	0.127; 2.54	
10	AA5754	0.0508; 0.127; 0.254	
11	AA3003-O	0.2; 0.4; 0.6; 0.8	
12	PP	0.2; 1.0	
13	DC05	0.1; 0.5; 1.0; 3.0	

Bảng 2.3. Tốc độ tiến dụng cụ biến dạng khi tạo hình bằng ISF

STT	Vật liệu	Tốc độ tiến dụng cụ f (mm/ph)	Ghi chú
1	PVC	1500; 3000	
2	AA5754, Ti6Al4V	5000–500000	
3	AA3003-O	1270; 2540	
4	PP	1000, 3000	
5	Titan	1200; 2600; 4000	
6	AA2024-T4	600; 1200; 2100; 4500	
7	AA2024-O	373; 1200; 2437; 3674; 4500	
8	SS304	600; 1200	

Khi phôi biến dạng và được tạo hình với góc thành tường ϕ xác định, thành bên của phôi sẽ bị biến mỏng một lượng tương ứng. Theo [99], mức độ biến dạng gây nên sự biến mỏng thành được xác định như sau:

$$\varepsilon_t = \ln \frac{t_f}{t_i} = \ln \frac{1}{\cos \phi} \quad (2.10)$$

Thông thường, các nghiên cứu thường coi mức độ biến dạng gây biến mỏng

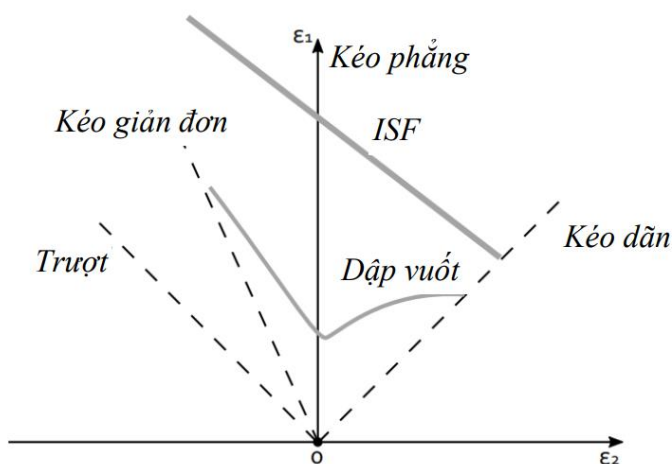
thành là một thành phần biến dạng chính, tức là:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \ln \frac{t_f}{t_i} = \ln \frac{1}{\cos \phi} \quad (2.11)$$

Từ đó, có thể sử dụng định luật thể tích không đổi để xác định các thành phần biến dạng chính còn lại.

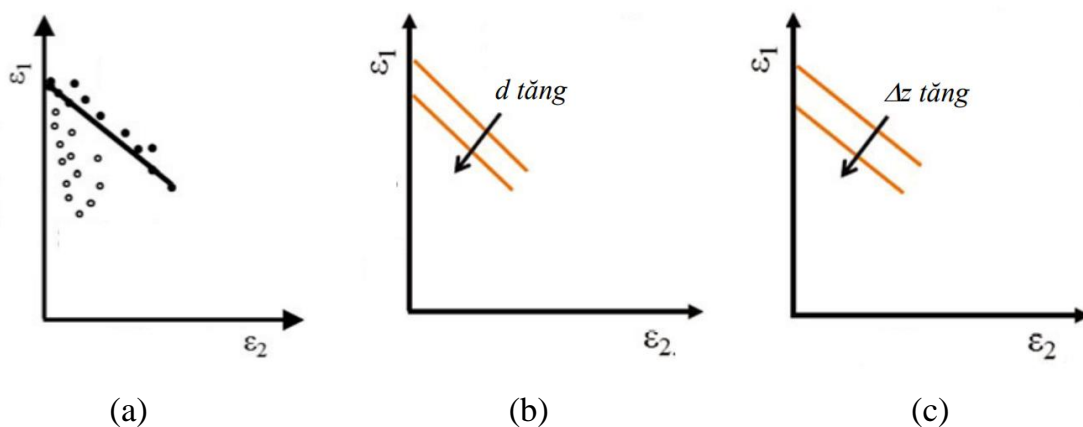
$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (2.12)$$

Các thành phần biến dạng chính ε_1 và ε_2 được sử dụng để xây dựng đường cong giới hạn biến dạng dẻo (FLD- Forming Limit Diagram). Mô hình xác định giới hạn biến dạng dẻo được mô tả như trên Hình 2.3 [99].



Hình 2.3. Mô hình đường cong giới hạn biến dạng dẻo (FLD).

Khi mức độ biến dạng thấp hơn đường cong giới hạn biến dạng dẻo tương ứng với mỗi phương pháp biến dạng thì sản phẩm không bị phá hủy, nứt, gãy (xem minh họa trên Hình 2.4a [13]).



Hình 2.4. Phân biệt giữa vùng biến dạng an toàn và vùng phá hủy (a); ảnh hưởng của đường kính dụng cụ (b) và bước tiến Δz (c) đến đường cong FLD.

Tổng hợp kết quả nghiên cứu công nghệ ISF cho thấy, đường kính và bước tiến

dụng cụ biến dạng dẻo theo phương dọc trục Δz có ảnh hưởng mạnh đến đường cong FLD. Khi đường kính và bước tiến dụng cụ biến dạng dẻo tăng, khả năng biến dạng dẻo của phương pháp ISF giảm (xem minh họa trên Hình 2.4b-c[13]).

Bảng 2.4. Đường kính dụng cụ biến dạng dẻo khi tạo hình bằng ISF

STT	Đường kính (mm)	Vật liệu	Ghi chú
1	4.7625; 12.7; 4; 6; 10; 2.5; 5	AA3003-O	
2	9.525; 12.7; 19.05	AA6451; AA5182; AA5754	
3	10; 15	POM; PE; PA; PVC; PC	
4	10; 16	DC05; PVC	
5	5; 10; 15; 10; 20; 24,5; 30	AA7075-O	
6	8; 12; 20; 30; 50	AA1050-H111	
7	8; 10; 12	PET; PA; PVC; PC	
8	5; 10; 15; 10; 12; 18; 20; 2,2; 3; 6,4	AA1050-O	
9	6; 8; 11; 14; 16; 7; 10,24; 13,5; 20	AA2024-O	
10	2.2; 3.6; 4.4; 5.4; 6.6; 7.8	AA2024-O; AA2024-T6; AA1060-O; AA1060-H24; AA5083-O; Steel DS; Cu H59	
11	6; 12	PP	
12	6; 14	SS304	

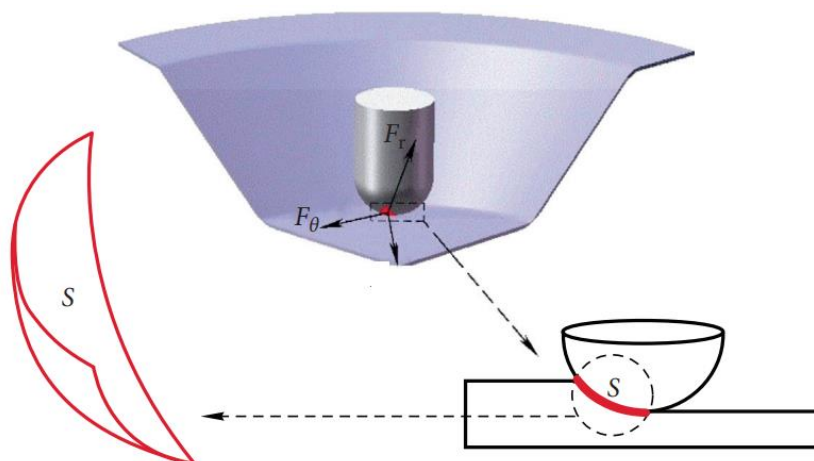
Bảng 2.5. Tốc độ quay dụng cụ biến dạng dẻo khi tạo hình bằng ISF

STT	Vật liệu	Tốc độ quay n (vg/ph)	Ghi chú
1	AA3003-O	100; 600	
2	PP	200; 700	
3	AA5052-H32	0; 250; 500; 750; 1000; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000; 7000	
4	AA1050-O, AA1050-H24, AA6082-T6	100; 2000; 4000; 6000; 8000; 10000	
5	PVC	1000; 2000	
6	PVC, PLA	0; 1250; 5000; 7000	
7	DC05	0; 40	

Bảng 2.4 tổng hợp một số các công bố [95] về việc lựa chọn đường kính dụng cụ biến dạng dẻo trong các nghiên cứu gần đây. Theo kết quả tổng hợp trong [95], ảnh hưởng của đường kính dụng cụ đến khả năng biến dạng không hoàn toàn có xu hướng như trên Hình 2.4a. Bên cạnh đó, các tác giả trong [95] cũng tóm tắt một số công bố gần đây về việc lựa chọn tốc độ quay của dụng cụ biến dạng dẻo (xem Bảng 2.5), rõ ràng, tốc độ thấp nhất có thể chọn là 0 vg/ph.

2.1.3. Các thành phần lực tác dụng lên tấm và dụng cụ

Như đã mô tả ở mục 2.1 và 2.2 phía trên, để tạo nên biến dạng của phôi, dụng cụ biến dạng phải tác dụng lên phôi một lực xác định. Tùy theo việc xây dựng hệ tọa độ mà các thành phần lực này có thể biểu diễn trong các hệ trục tọa độ khác nhau, chẳng hạn xây dựng trong hệ trục tọa độ Đề-các, hệ tọa độ trụ hoặc hệ tọa độ cầu [25],[99]. Nói chung, các mô hình phân tích lực này không chỉ ích trong nghiên cứu mô hình và mô phỏng, mà còn hữu ích trong việc xây dựng phương án thí nghiệm trong nghiên cứu. Hình 2.5 là một mô hình phân tích lực sử dụng hệ tọa độ cầu [100].



Hình 2.5. Mô hình phân tích lực gây nên biến dạng dẻo của phôi.

Trong nghiên cứu thực nghiệm, để đơn giản, mô hình xác định lực tác dụng của dụng cụ biến dạng lên phôi thường sử dụng theo hệ trục tọa độ của máy. Có thể coi mô hình tác dụng lực trong quá trình biến dạng dẻo như trên Hình 2.6 [24],[97].

Thành phần lực dọc trục của dụng cụ F_z có thể được xác định theo biểu thức thực nghiệm [25],[99] như sau:

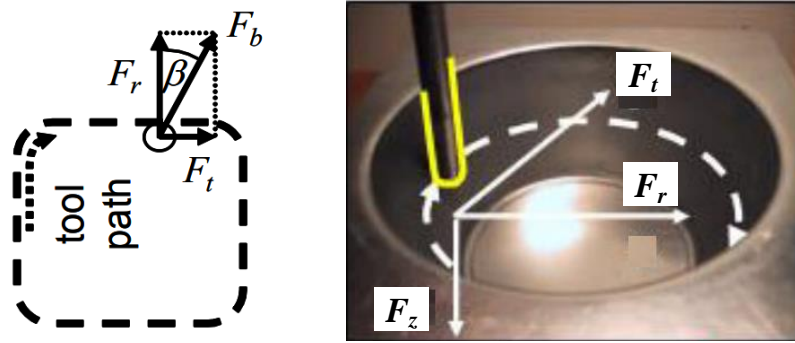
$$F_z = 0.0716 \times \sigma_u \times t_i^{1.57} \times d^{0.41} \times \Delta h^{0.09} \times \alpha \times \cos \alpha \quad (2.13)$$

Hoặc cũng có thể xác định gần đúng theo biểu thức [99]:

$$F_z \approx 3.8 \times \sigma_u \quad (2.14)$$

Trong đó: σ_u là giới hạn bền của vật liệu phôi tấm (MPa); t_i là chiều dày phôi tấm (mm); d là đường kính đỉnh dụng cụ gia công (mm); α là góc hợp bởi giữa phương của trục dụng cụ và thành sản phẩm, được xác định như trên Hình 2.1. Giữa Δh và Δz có mối quan hệ xác định theo biểu thức [99] sau:

$$\Delta z = 2 \sin \alpha \times \sqrt{\Delta h \times (d - \Delta h)} \quad (2.15)$$



Hình 2.6. Mô hình tác dụng lực của dụng cụ biến dạng dẻo lên phôi

Các thành phần lực hướng tâm F_r và lực tiếp tuyến F_t lần lượt được xác định theo các biểu thức [99] sau:

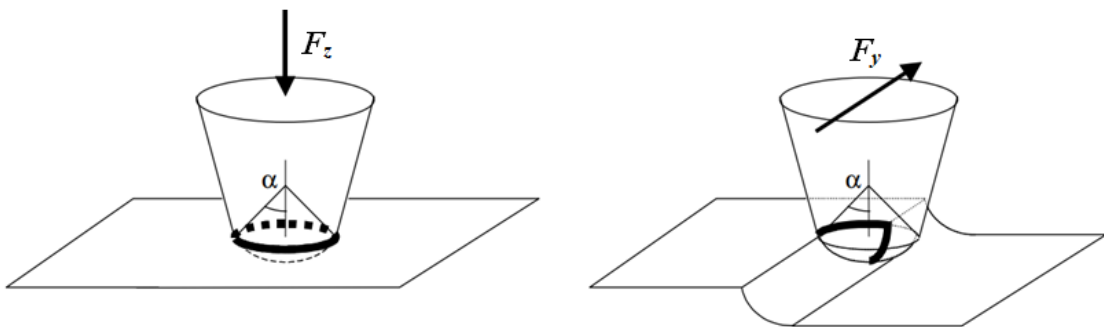
$$F_r = F_z \times \tan \left(\frac{\alpha + \beta - 17.2^\circ \times (0.1d)^{-c}}{2} \right) \quad (2.16)$$

$$F_t \approx F_r \times (360 \times \alpha^{-1.23} \times d^{-0.62}) \quad (2.17)$$

Trong đó: góc β được xác định như sau:

$$\beta = \arccos(1 - 2\Delta h / d) \quad (2.18)$$

Theo J. M. Allwood và cộng sự [101], để máy làm việc ổn định thì lực dọc F_z và lực ngang F_y được xác định trong trường hợp bất lợi nhất. Với lực dọc F_z , giá trị cực đại xảy ra khi quá trình biến dạng dẻo đạt đến cuối hành trình. Với lực ngang F_y theo chiều tiến của dụng cụ, giá trị cực đại xảy ra trong quá trình tiến tạo thành rãnh. Mô hình xác định các thành phần lực này được thể hiện trên Hình 2.7.



Hình 2.7. Mô hình xác định lực dọc và ngang cực đại của máy khí gia công ISF

Giả thiết rằng đầu dụng cụ có dạng cầu với bán kính r , tấm phôi gia công có chiều dày t_i , vật liệu phôi có giới hạn chảy là σ_y thì các thành phần lực này được xác định như sau [101]:

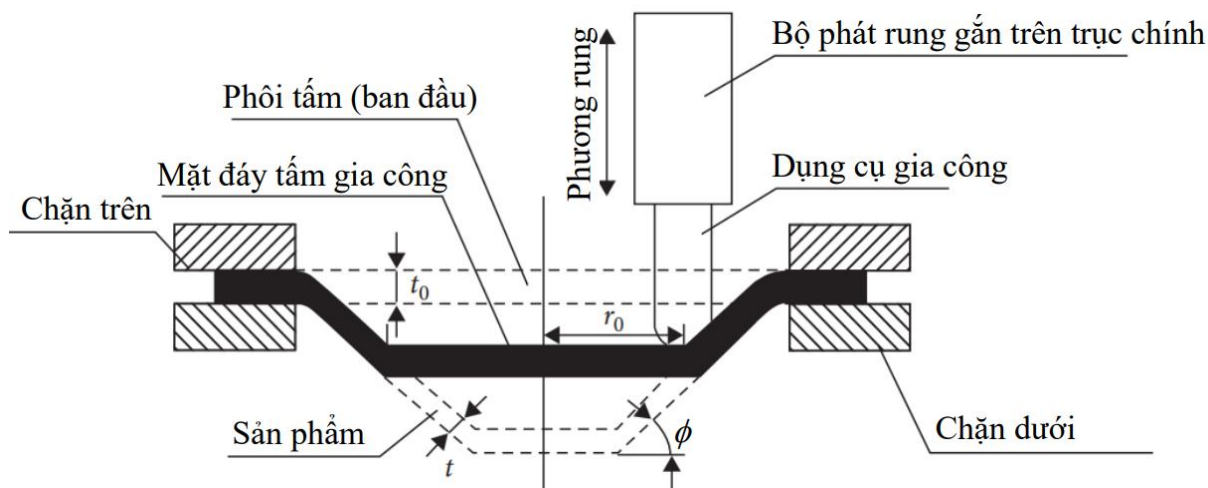
$$F_z = \pi \times r \times t \times \sigma_y \times \sin \alpha \quad (2.19)$$

$$F_y = r \times t \times \sigma_y \times (\sin \alpha + 1 - \cos \alpha) \quad (2.20)$$

Trong đó, α là góc tạo hình lớn nhất.

2.2. Rung động siêu âm hỗ trợ gia công biến dạng dẻo theo bước

Mô hình biến dạng dẻo theo bước có sự trợ giúp của rung động siêu âm USIF được thể hiện như trên Hình 2.8 [100]. Nói chung, mô hình này tương tự như mô hình gia công bằng ISF thông thường. Điểm khác biệt duy nhất khi gia công bằng UISF là dụng cụ biến dạng được gắn lên một nguồn phát rung siêu âm và sẽ rung động với tần số siêu âm trong quá trình tạo hình.



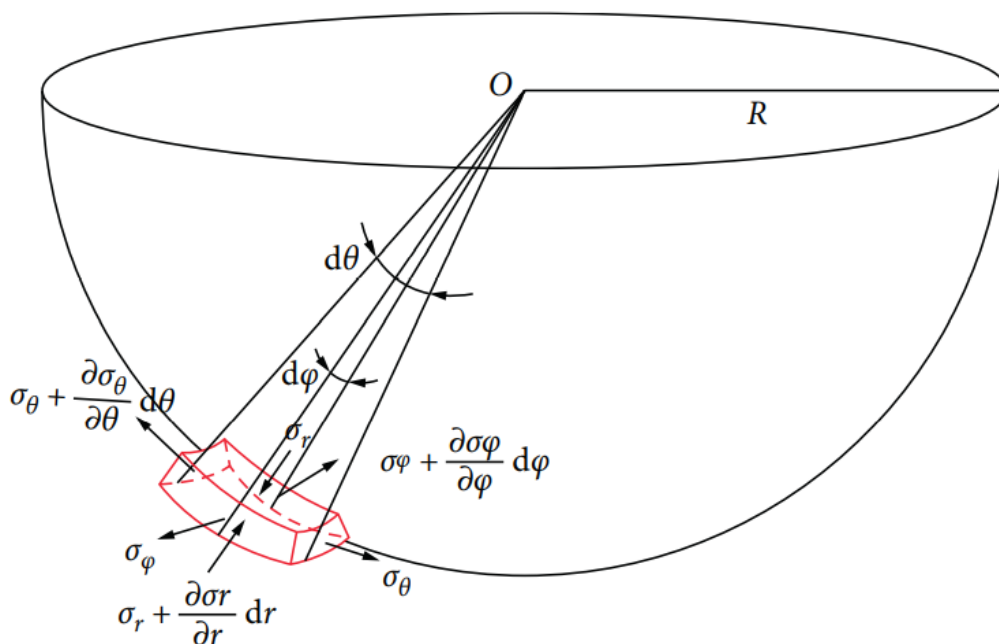
Hình 2.8. Mô hình biến dạng dẻo theo phương pháp UISF

Về bản chất, các thông số hình học, thông số công nghệ và việc xác định các thành phần ứng suất, biến dạng và lực tác dụng trong quá trình biến dạng dẻo của phương pháp UISF hoàn toàn tương tự so với phương pháp ISF. Tuy nhiên, do có rung động siêu âm trợ giúp nên quá trình gia công UISF còn có các thông số siêu âm (gồm tần số rung, biên độ rung và công suất siêu âm). Vì vậy, các thành phần các ứng suất, biến dạng và lực tác dụng cũng thay đổi theo tần số, biên độ và công suất siêu âm [100]. Mô hình xác định các thành phần lực và ứng suất, biến dạng khi thực hiện biến dạng dẻo theo phương pháp UISF được thể hiện trên Hình 2.9 [100]. Trong mô hình này, v_1 là vận tốc va chạm của đầu dụng cụ lên bề mặt phôi và v_2 là tốc độ tiến dụng cụ ($v_2 = f$). Hầu hết các nghiên cứu đều coi dao động siêu âm dạng sóng hình sin (ví dụ

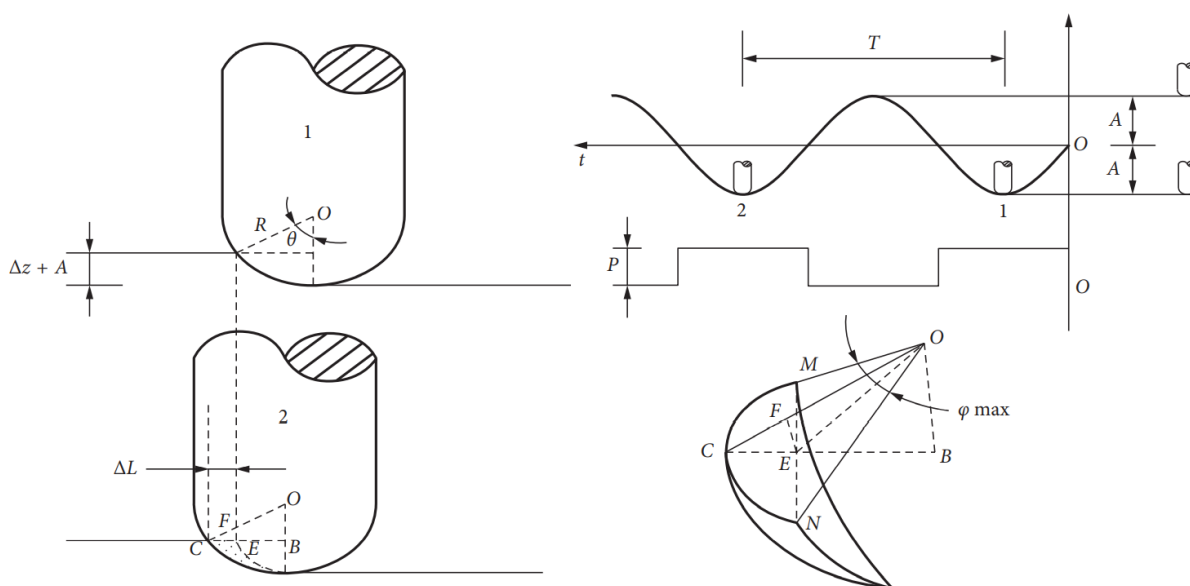
như trên Hình 2.10 [100]) thì v_I được xác định như sau:

$$v_I = \dot{z} = \frac{d[A \times \sin(2\pi ft)]}{dt} = 2\pi fA \times \cos(2\pi ft) \quad (2.21)$$

Trong đó, A là biên độ rung (mm); f là tần số rung (Hz). Khi đó, bên cạnh hiệu ứng biến mềm do rung động siêu âm thì hiệu quả giảm các thành phần lực biến dạng (F_z, F_y, F_x) nhờ rung động siêu âm có thể sẽ tuân theo quy luật hình sin như vận tốc va đập v_I .



Hình 2.9. Mô hình xác định các thành phần ứng suất, biến dạng khi thực hiện biến dạng dẻo theo phương pháp UISF

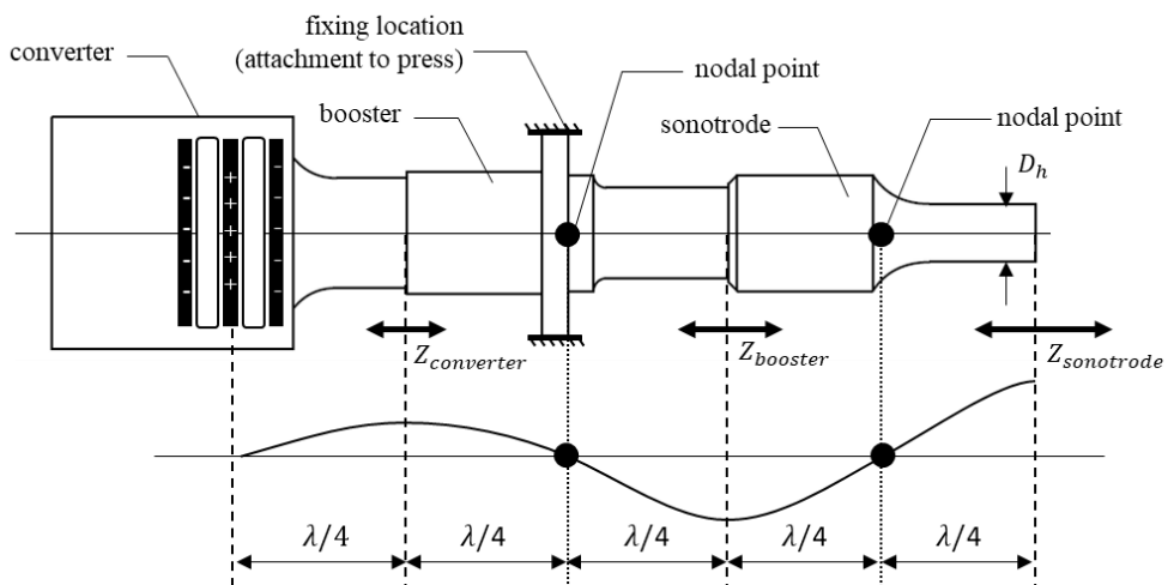


Hình 2.10. Mô hình dao động của dụng cụ biến dạng theo phương pháp UISF

Bảng 2.6. Tóm tắt các thông số công nghệ trong thực nghiệm tạo hình bằng UISF

STT	Vật liệu	t (mm)	Δz (mm)	d (mm)	f (mm/ph)	n (vg/ph)	Biên độ (μm)	Tần số (kHz)	Ghi chú
1	AA1050-O	0.7	0.5	10	2000	125	7.5	21.15	[54]
2	AA1050-O	0.7	0.5	10	2000	125	7.5	20	[81]
3	AL1050-O	0.7	0.5	10	2000	-	-	20.4	[55]
4	AA1050-O	0.5	0.1	5	800	0	2.5-5- 7-10	29	[83]
5	AA1050-O	0.5-1.0	0.02-0.06-0.1- 0.15-0.2	5	-	0- 1000	10	29	[84]
6	AA1050-O	0.5-1.0	0.2	5	-	-	5-10	-	[85]
7	AA1050-O	0.5	0.2	5	-	-	10	29	[86]
8	AA1050-O	0.5	0.2	5	-	-	5-10	29	[87]
9	AA1050-O	0.5	0.02-0.06-0.1- 0.15-0.2	5	3800	0	10	-	[88]
10	AW1050A	0.5	0.5	10	1200	-	-	25-35	[89]
11	Al 1060	1.0	1.0	10	-	-	2.04- 4.13- 6.14- 8.13- 10.17	25	[90]
12	AA1050	1,0	0.92	10- 20	6-18	-	3-6-9- 12-15- 18	21	[91]
13	AA5052	1,0	0.92	10- 20	6-18	-	3-6-9- 12-15- 18	21	[91]
14	AA5052	2,0	0.3	5	800	-	1.3-6.3- 15.9	-	[102]
15	AA6061-T6	0,7	0.1-0.2-0.3- 0.4	10	250-500- 750-1000	-	5-10- 15	20,48	[93]
16	Q235	1,0	1.0	10			5-10-20- 30-40- 50	20	[94]

2.3. Cơ sở thiết kế dụng cụ biến dạng dẻo

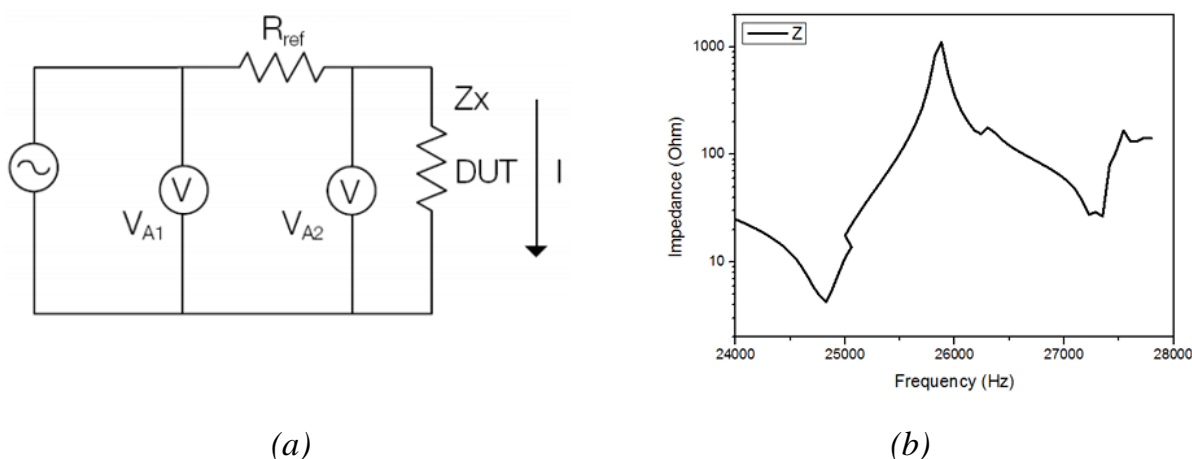


Hình 2.11. Phân bố biến dạng trên bộ phát rung

Hình 2.11 mô tả đồ thị phân bố rung động dọc trục của một bộ thiết bị siêu âm. Có thể nhận thấy, trên đồ thị phân bố xuất hiện các điểm "nodal point", tại đó biên độ rung $Z_{ult} = 0$. Khoảng cách giữa hai "nodal point" liên tiếp chính bằng một nửa bước sóng λ . Trong đó, chiều dài bước sóng được xác định trực tiếp từ vận tốc truyền sóng và tần số rung ($\lambda = c/f$). Thông thường, chiều dài của booster và sonotrode được thiết kế bằng $\frac{1}{2}$ bước sóng. Các đầu phát rung thương mại có thể có sẵn sonotrode hoặc không có (xem thêm mô tả tại mục 2.1.2 phía trên). Nếu lựa chọn đầu rung phát rung thương mại có sẵn đầu sonotrode như trên Hình 2.11, khi vận hành ở tần số thiết kế, biên độ rung động lớn nhất đạt được ở mặt đầu của sonotrode. Tuy nhiên, nếu bộ phát rung thương mại không có sẵn sonotrode, dụng cụ gia công có thể được thiết kế thay cho sonotrode và phải tuân thủ nguyên tắc chiều dài bằng $\frac{1}{2}$ bước sóng để nhận được biên độ rung cực đại tại đỉnh dụng cụ. Để đảm bảo bộ phát rung siêu âm làm việc theo đúng tần số thiết kế, chỉ được kẹp chặt tại các vị trí "nodal point" mà tại đó biên độ rung động $Z_{ult} = 0$. Với trường hợp gia công UISF, lực dọc trục có thể khá lớn, để đảm bảo bộ công tác siêu âm (gồm cả bộ phát rung và dụng cụ biến dạng) hoạt động ổn định, có thể kẹp chặt tại hai điểm "nodal point" nếu cần thiết.

Tần số làm việc của bộ chuyển đổi siêu âm Langevin thực chất là tần số cộng hưởng của nó, được kiểm tra cẩn thận và cung cấp từ chính nhà sản xuất. Đầu horn/sonotrode (nếu có) đóng vai trò quan trọng trong việc truyền, tập trung và khuếch

đại rung động siêu âm từ đầu dò vào dụng cụ. Do đó, các đặc điểm hình học của horn/sonotrode phải được xác định và kiểm tra cẩn thận. Bất kỳ thay đổi nào về kích thước của dụng cụ và/hoặc hình dạng lắp ráp cũng sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến tần số cộng hưởng và do đó đến hiệu suất làm việc của toàn bộ bộ công tác. Cần lưu ý rằng, quá trình chế tạo sẽ có một số sai số kích thước và hình dạng của dụng cụ biến dạng... sẽ làm thay đổi đáng kể tần số cộng hưởng của toàn hệ thống. Do vậy, để hoàn thiện bộ công tác siêu âm, gồm bộ chuyên đổi, bộ khuếch đại và dụng cụ biến dạng, phải kiểm tra tần số cộng hưởng của hệ thống. Một trong những phương pháp đơn giản nhất có thể được áp dụng thông qua tổng trở kháng điện của toàn bộ bộ công tác siêu âm. Được phổ biến và đơn giản nhất là trở kháng là đo bằng phương pháp V-I. Hình 2.12a là minh họa mạch đo sử dụng phương pháp V-I, Hình 2.12b là một ví dụ kết quả đo hệ thống công tác siêu âm [103].



Hình 2.12. Mạch đo trở kháng siêu âm (a) và một ví dụ về kết quả đo (b)

2.4. Kết luận Chương 2

- Trên cơ sở lý thuyết biến dạng dẻo tâm khi gia công bằng phương pháp biến dạng dẻo ISF thông thường dễ thấy các thông số hình học và thông số công nghệ có ảnh hưởng chính đến lực tạo hình chính, khả năng tạo hình cũng như chất lượng sản phẩm gia công là: giới hạn chảy σ_y và giới hạn bền σ_u của vật liệu gia công, bước tiến dụng cụ theo phương dọc trục Δz và bước tiến theo phương ngang Δx , đường kính dụng cụ biến dạng d , chiều dày phôi gia công ban đầu t , góc tạo hình (thành tường) ϕ , tốc độ quay của dụng cụ biến dạng... Đến nay, các nghiên cứu đã công bố chưa cho thấy sự thống nhất về ảnh hưởng của các thông số này.

- Khi gia công biến dạng dẻo cục bộ liên tục có sự hỗ trợ của rung động siêu âm, có thể coi rung động siêu âm tương tự như các xung lực gián đoạn tác dụng lên bề mặt

tám kim loại. Xung lực gián đoạn này có tác dụng giảm ma sát tiếp xúc giữa dụng cụ biến dạng dẻo và bề mặt tám (ma sát ngoài). Đồng thời, xung lực này còn làm giảm ma sát bên trong, thực chất là tăng khả năng chuyển động của lệch giúp quá trình biến dạng dẻo dễ dàng hơn (giảm lực và tăng khả năng biến dạng dẻo).

Đây là những cơ sở quan trọng để triển khai thiết kế, lựa chọn hệ thống thiết bị phục vụ nghiên cứu thực nghiệm của đề tài. Các tính toán, thiết kế, chế tạo hoặc lựa chọn thiết bị, dụng cụ cụ thể phục vụ thí nghiệm sẽ được trình bày cụ thể trong chương 3 sau đây.

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ, CHẾ TẠO HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM

3.1. Yêu cầu của hệ thống thí nghiệm

- Đảm bảo đủ cứng vững để làm việc, phù hợp với tải trọng công tác.
- Thiết bị công tác làm việc trong vùng tần số siêu âm (từ 20 kHz trở lên). Để đảm bảo tính sẵn có của dụng cụ nhằm nhân rộng trong sản xuất, tần số siêu âm có thể lựa chọn ở các khoảng 20kHz, 28kHz...
- Xác định được các thành phần lực biến dạng dẻo với lượng tiền dụng cụ xác định theo phương dọc Δz .
- Có thể thực hiện chuyển động tạo hình theo góc tạo hình (góc thành tường) ϕ , chiều sâu tạo hình h , biên dạng sản phẩm phù hợp yêu cầu định trước.
- Có khả năng điều khiển chuyển động theo các chiều của hệ trục tọa độ.

3.2. Thiết kế, chế tạo bộ công tác siêu âm phục vụ nghiên cứu đề tài

3.2.1. Lựa chọn bộ phát rung

Như đã trình bày trong chương 1 phía trên (xem thêm Hình 1.13), bộ phát rung và nguồn phát điện siêu âm đóng vai trò quan trọng nhất của hệ thống công tác siêu âm. Trên thế giới, việc chế tạo các bộ phát rung chuyên dụng tích hợp trên máy công tác, gọi là ultrasonics machine (ví dụ như Hình 3.1a) hoặc sản xuất bộ gá kẹp dụng cụ tích hợp rung động siêu âm và nguồn rung thương mại, phù hợp với nhiều loại máy công tác khác nhau (như Hình 3.1b) đã được nhiều hãng triển khai và đưa vào thực tế.

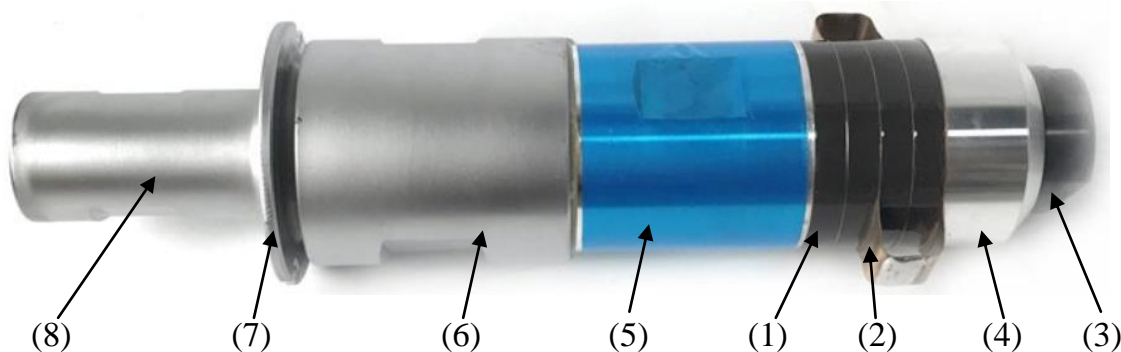


Hình 3.1. Trung tâm gia công siêu âm (a) và bộ dụng cụ gia công siêu âm (b)

Tuy nhiên, các thiết bị này thường rất đắt tiền nên chi phí đầu tư lớn. Ngoài ra, việc thay đổi tính năng để phù hợp với mục đích ứng dụng trong biến dạng dẻo gặp

nhieu khó khăn. Do vậy, việc lựa chọn phương án sử dụng các bộ phát rung (transducer) thương mại sẽ phù hợp hơn. Trong nghiên cứu đề tài, nhóm nghiên cứu lựa chọn bộ phát rung thương mại. Sau khi lựa chọn, thử nghiệm một số loại bộ phát rung siêu âm khác để đánh giá, nhóm nghiên cứu chọn 02 bộ phát rung thương mại trong nghiên cứu thực nghiệm. Cụ thể là:

(1) Bộ phát rung thương mại YP-5525-4Z (Trung Quốc). Theo công bố của nhà sản xuất, bộ phát rung này làm việc ở tần số rung danh nghĩa 20 kHz, công suất 2 kW. Hình 3.2 là ảnh chụp và Bảng 3.1 là thông số kỹ thuật của bộ phát rung này.



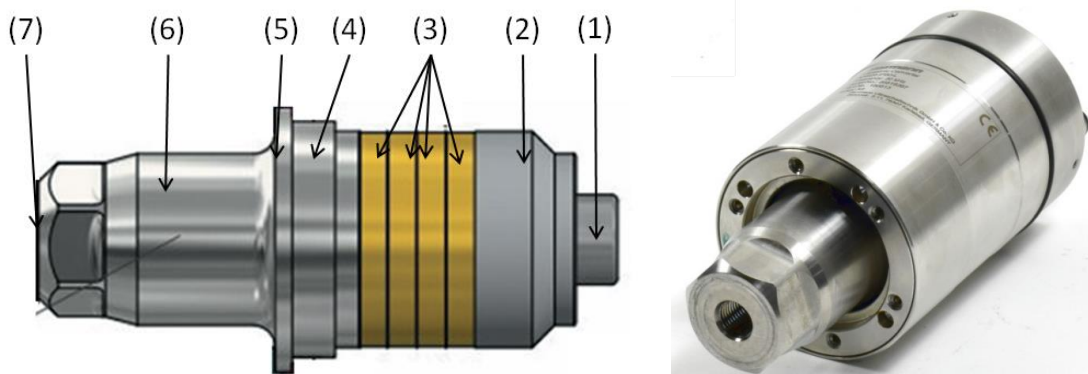
Hình 3.2. Ảnh chụp bộ phát rung siêu âm thương mại YP-5525-4Z.

Bảng 3.1. Thông số của bộ phát rung siêu âm YP-5525-4Z

Kí hiệu: YP-5525-4Z	Công suất định danh: 2000 W
Xuất xứ: Trung Quốc	Biên độ (tại đầu horn): 10 μ m
Tần số rung: 20 \pm 0,5 kHz	Điện dung: 13000 \div 14000 pF

Để dàng nhận thấy trên Hình 3.2, các tấm gốm áp điện (1) được xếp xen kẽ với các lá điện cực đồng (2) được kẹp chặt với tấm kim loại sau (4) và tấm kim loại trước (5) bởi bu-lông kẹp (3). Tấm trước và tấm sau của bộ phát rung được làm bằng hợp kim nhôm Al7075. Khi được cấp nguồn điện với tần số siêu âm, các tấm gốm áp điện sẽ liên tục thay đổi trạng thái nén - giãn và tạo nên rung động với tần số siêu âm. Booster (6) và đầu horn/sonotrode (8) được làm bằng hợp kim titan, đóng vai trò là bộ khuếch đại biên độ rung do các tấm gốm áp điện tạo ra khi được kích thích bằng nguồn điện có tần số siêu âm. Bộ đầu phát rung được thiết kế để đảm bảo, tại vành (7) biên độ rung động bằng không (gọi là "nodal point"). Đây là vị trí để kẹp nhằm cố định bộ phát rung trên bộ giá kẹp khi triển khai lắp ráp lên hệ thống máy gia công. Bộ phát rung này được sử dụng để đánh giá bước đầu về hiệu quả của rung động siêu âm đối với quá trình biến dạng dẻo UISF, có thể lắp ráp trên cả máy tiện và máy phay.

(2) Ngoài ra, để triển khai đề tài nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu sử dụng bộ phát rung siêu âm Herrmann KHS20-IP50-L (CHLB Đức). Theo công bố của nhà sản xuất, bộ phát rung này làm việc ở tần số rung danh nghĩa 20 kHz, công suất 4 kW. Hình 3.3 là hình vẽ kết cấu và ảnh chụp; Bảng 3.2 là thông số kỹ thuật của bộ phát rung này.



Hình 3.3. Kết cấu bộ phát rung siêu âm thương mại Herrmann KHS20-IP50-L

Trên Hình 3.3 bên trái, các tấm gốm áp điện (3) được xếp xen kẽ với các lá điện cực đồng và được kẹp chặt bởi tấm kim loại sau (2) và tấm kim loại trước (4) nhờ bu-lông kẹp (1). Tấm trước và tấm sau của bộ phát rung được làm bằng hợp kim nhôm thép không gỉ. Booster (6) được gia công liền khối với vành (7), trong lòng có lỗ ren để lắp ráp với horn/sonotrode hoặc có thể lắp trực tiếp dụng cụ biến dạng dẻo lên booster. Tại mặt đầu của vành (5), biên độ rung động bằng không ("nodal point"). Đây là vị trí để kẹp cố định bộ phát rung trên bộ giá kẹp khi triển khai lắp ráp lên hệ thống máy gia công. Hình 3.3 bên phải là ảnh chụp của bộ phát rung siêu âm thương mại Herrmann KHS20-IP50-L nguyên bản. Bộ phát rung này được sử dụng để phục vụ cho các nghiên cứu tối ưu hiệu quả của rung động siêu âm đối với quá trình biến dạng dẻo UIFS. Trong đề tài, hệ thống công tác siêu âm sử dụng bộ phát này chỉ được lắp ráp trên máy phay.

Bảng 3.2. Thông số của bộ phát rung siêu âm Herrmann KHS20-IP50-L

Kí hiệu: KHS20-IP50-L	Công suất định danh: 4000 W
Xuất xứ: CHLB Đức	Biên độ (tại đầu horn): 10 μ m
Tần số rung: 20 \pm 0,5 kHz	Điện dung: 13000 \div 14000 pF

3.2.2. Lựa chọn bộ nguồn phát điện siêu âm

Nguồn phát công suất siêu âm là thiết bị biến đổi dòng điện từ tần số thông thường (50-60 Hz) thành tần số siêu âm với điện áp và công suất lớn để cung cấp cho

đầu phát rung siêu âm. Trong nghiên cứu đề tài, chúng tôi lựa chọn và sử dụng 02 nguồn phát nguồn điện siêu âm. Cụ thể:

(1) Nguồn phát điện siêu âm MPI WG3000W vì tương thích với hầu hết các bộ phát rung hiện nay. Thiết bị này có phạm vi hoạt động trong dải tần số từ 19 kHz đến 100 kHz; có khả năng tự động dò tìm tần số cộng hưởng và chọn chế độ vận hành tối ưu cho mỗi bộ phát rung. Thiết bị này được sử dụng trong suốt quá trình thực nghiệm đề tài. Hình 3.4 là ảnh chụp nguồn phát siêu âm có mã hiệu MPI WG3000W. Thông số kỹ thuật của nguồn phát công suất siêu âm được trình bày trên Bảng 3.3.



Hình 3.4. Nguồn phát điện siêu âm MPI_WG3000W

Bảng 3.3. Thông số kỹ thuật của nguồn phát điện siêu âm

Ký hiệu:	MPI_WG 3000
Công suất (W):	3000
Tần số làm việc (kHz):	19 ÷ 40
Nguồn cấp:	216 ÷ 240 VAC, 50 ÷ 60 Hz
Kích thước (mm):	435 x 380 x 100
Khối lượng (kg):	10
Xuất xứ:	Thụy sĩ

(2) Nguồn phát điện siêu âm (Hình 3.5). Nguồn phát này có đặc điểm là chỉ có khả năng biến đổi từ tần số thông thường thành tần số 20 kHz. Tuy vậy, do các đầu phát rung được lựa chọn đều làm việc ở tần số 20 kHz nên hoàn toàn tương thích với hầu hết các bộ phát rung đã được lựa chọn.



Hình 3.5. Nguồn phát điện siêu âm

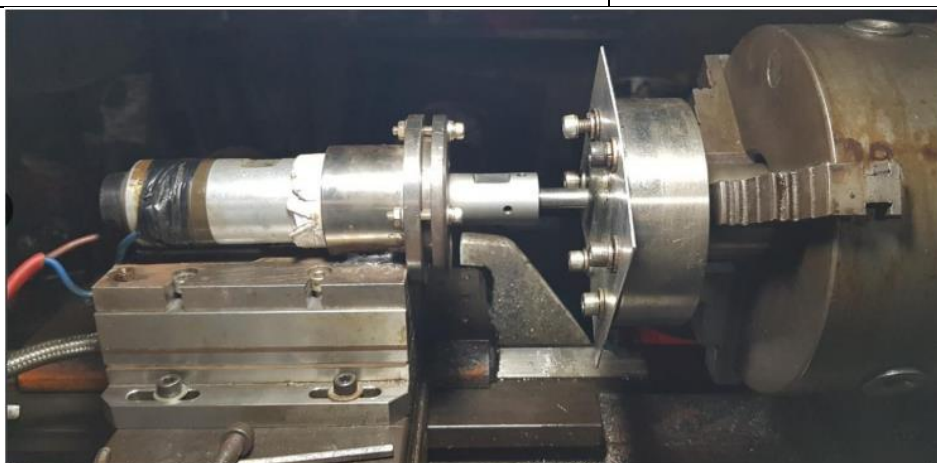
3.2.3. Lựa chọn máy gia công

Nhằm đánh giá hiệu quả của rung động siêu âm và khai thác khả năng sử dụng đa dạng các thiết bị của công nghệ UISF, Trong nghiên cứu, nhóm đề tài lựa chọn máy tiện và máy CNC để triển khai thực nghiệm. Cụ thể là:

(1) Sử dụng máy tiện: Trong quá trình khảo sát đề tài, nhóm nghiên cứu sử dụng máy tiện ren vít vạn năng Takisawa TSL-550 làm máy công tác. Các thông số kỹ thuật của máy thể hiện như trên Bảng 3.4. Khi thực hiện biến dạng dẻo UISF trên máy tiện, phôi gia công được kẹp chặt trên đồ gá được kẹp trên mâm cặp của máy (xem Hình 3.6). Trong khi đó bộ thiết bị siêu âm được gắn lên cảm biến đo lực 3 thành phần. Cảm biến lực 3 thành phần được cố định trên bàn xe dao của máy tiện. Hình 3.6 là ảnh chụp hệ thống thiết bị công tác siêu âm biến dạng dẻo và phôi đang chuẩn bị được kẹp chặt trên đồ gá gia công trên máy tiện Takisawa TSL-550. Hệ thống này được nhóm đề tài sử dụng trong các khảo sát sơ bộ khi thực hiện nghiên cứu.

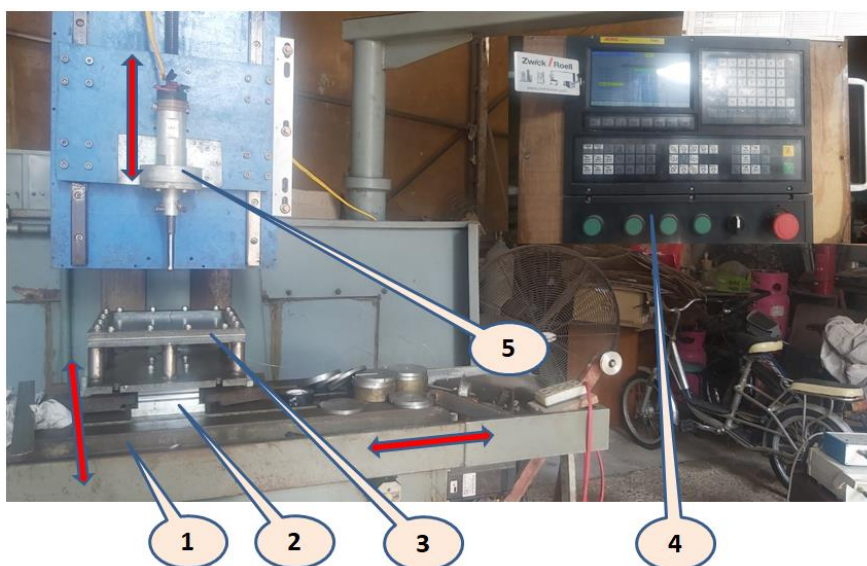
Bảng 3.4. Thông số kỹ thuật của máy tiện Takisawa TSL-550

Thông số	Takisawa TSL-550
Chiều dài chống tâm (mm):	550
Đường kính phôi gia công lớn nhất (mm):	360
Tốc độ trục chính (vg/ph):	70 - 1500 (6 cấp)
Tốc độ chạy dao dọc (mm/vg):	0.041 ÷ 2.2
Tốc độ chạy dao ngang (mm/vg):	½ tốc độ chạy dao dọc
Công suất (kW):	2.2
Kích thước (m):	1.622 x 0.72 x 1.1
Khối lượng (kg):	950



Hình 3.6. Hệ thống thiết bị thí nghiệm được gá đặt trên máy tiện

(2) Sử dụng máy phay gia công UISF được sử dụng nhiều hơn cả trong các nghiên cứu về công nghệ ISF và UISF. Trong quá trình triển khai đề tài, nhóm nghiên cứu đã thực hiện cải tạo máy phay NC đứng VHR AP của hãng Shizuoka (xem Hình 3.7). Trong đó, động cơ servo dẫn động cho 03 trục của máy nguyên bản được nhóm nghiên cứu thay thế bằng 03 động cơ điện hybrid server AC 03 pha, mỗi động cơ có mô men xoắn cực đại là 12Nm. Bên cạnh đó, để đảm bảo khả năng nội suy các biên dạng phức tạp, quá trình cải tạo máy, bộ điều khiển đã được thay bằng bộ điều khiển công nghiệp XC809. Bộ điều khiển công nghiệp cho phép lập trình NC trên máy hoặc có thể lập trình trên máy tính và nhập/import chương trình vào máy CNC qua cổng USB. Các thông số cụ thể của máy phay CNC sau khi cải tạo được trình bày cụ thể như trong Bảng 3.5.



1- Bàn máy; 2- Cảm biến đo lực 3 thành phần; 3- Kẹp phôi; 4- Bảng điều khiển;

5- Dụng cụ biến dạng dẻo

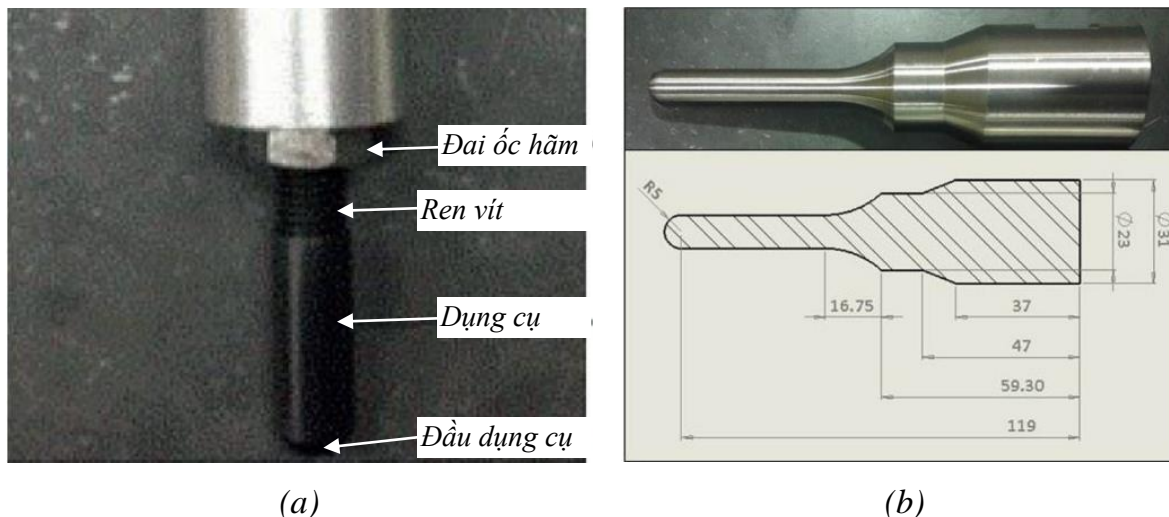
Hình 3.7. Ảnh chụp máy phay CNC sau khi cải tạo có lắp đặt bộ công tác siêu âm

Bảng 3.5. Các thông số kỹ thuật máy phay CNC sau khi cải tạo

Thông số	Giá trị
Hành trình trục X (mm):	700 (không đổi)
Hành trình trục Y (mm):	320 (không đổi)
Hành trình trục Z (mm):	400 (thiết kế lại, hành trình không đổi)
Động cơ trục X, Y, Z	Hybrid server 86CME120
Mô men xoắn động cơ (N.m):	12
Bộ điều khiển CNC:	XC809

3.2.4. Thiết kế, chế tạo dụng cụ biến dạng dẻo

Trong các nghiên cứu thực nghiệm trước đây về UISF, để kẹp chặt dụng cụ biến dạng dẻo lên khuếch đại (booster hoặc horn/sonotrode) của đầu phát rung, phương án lắp ráp bằng ren vít thường được sử dụng (như minh họa trên Hình 3.8 [54],[94],[91]).



Hình 3.8. Một số dạng dụng cụ biến dạng dẻo trong công nghệ ISF

Một số nghiên cứu sử dụng phương án dụng cụ biến dạng dẻo hình trụ tròn, đặt được kẹp chặt với đầu phát rung nhờ ren vít và đai ốc hãm (xem minh họa trên Hình 3.8a). Trong khi đó, một số khác sử dụng dụng cụ biến dạng dẻo đóng vai trò như một đầu horn/sonotrode khuếch đại thứ hai (xem minh họa trên Hình 3.8b). Đồng thời, hầu hết các nghiên cứu sử dụng kiểu dụng cụ biến dạng dạng hình trụ đặc, đầu có dạng chỏm cầu để tránh tập trung ứng suất gây rách tấm. Trong đề tài này, nhóm nghiên cứu sử dụng phương pháp lắp chặt dụng cụ biến dạng dẻo lên đầu horn/sonotrode nhờ ren vít (như trên Hình 3.6 và Hình 3.7). Ngoài ra, kết cấu dụng cụ được thiết kế tùy thuộc vào bộ phát rung. Với bộ phát rung YP-5525-4Z, dụng cụ biến dạng có kết cấu hình trụ đặc; với bộ phát rung KHS20-IP50-L, dụng cụ biến dạng có kết cấu như một đầu horn/sonotrode.

Như đã phân tích ở chương 2, đường kính dụng cụ biến dạng dẻo cần đủ lớn để đảm bảo ổn định dưới tác dụng của các thành phần lực biến dạng F_z , F_x , F_y . Đường kính càng lớn thì độ ổn định càng cao, tuy nhiên có thể ảnh hưởng không chỉ ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt mà có thể làm giảm khả năng biến dạng dẻo của tấm. Ngoài ra, đường kính dụng cụ (đặc biệt là kết cấu) có ảnh hưởng nhất định đến tần số cộng hưởng của bộ công tác siêu âm, đặc biệt là trường hợp thiết kế dụng cụ biến dạng đóng vai trò của một đầu horn/sonotrode [2],[56],[54],[55],[103].

Bên cạnh đường kính, chiều dài dụng cụ là một thông số rất quan trọng. Chiều dài không chỉ ảnh hưởng đến độ ổn định dưới tác dụng của lực tạo hình mà còn ảnh hưởng quyết định đến biên độ rung. Thông thường, mỗi bộ phát rung thương mại được nhà sản xuất thiết kế sẽ vận hành ở một tần số siêu âm xác định. Khi đó, rung động siêu âm (biên độ Z_{con} , xem trên Hình 2.1) sẽ được truyền từ bộ phát rung đến đầu horn/sonotrode Z_{son} (hoặc đầu dụng cụ). Với bộ phát rung thương mại, tại vị trí mặt đầu của đầu horn, biên độ rung Z_{son} đạt giá trị cực đại. Cơ sở thiết kế đường kính và chiều dài dụng cụ biến dạng được trình bày chi tiết sau đây.

(1) Thiết kế dụng cụ biến dạng dẻo cần đảm bảo các yêu cầu sau: (i) Đường kính phải đảm bảo tối thiểu bằng hoặc lớn hơn lỗ ren trên đầu horn để có thể lắp ráp và giảm thiểu tổn thất năng lượng siêu âm truyền từ bộ chuyển đổi đến dụng cụ; (ii) Vật liệu làm dụng cụ biến dạng dẻo phải vừa có tổn thất nhỏ, vừa có độ bền cao; (iii); Tần số dao động tự nhiên của dụng cụ phù hợp với tần số rung của bộ phát rung (danh nghĩa: 20 kHz); (iv) Rung động siêu âm tại đỉnh dụng cụ là rung dọc; (v) Chiều dài phù hợp để nhận được biên độ rung lớn nhất tại đỉnh dụng cụ biến dạng dẻo (bằng $\frac{1}{2}$ bước sóng). Ngoài các yêu cầu này, dụng cụ biến dạng phải đảm bảo cứng vững, ổn định để thực hiện quá trình thực nghiệm.

(2) Thiết kế dụng cụ biến dạng cho bộ phát rung YP-5525-4Z:

Với việc lựa chọn đầu rung phát rung thương mại có sẵn đầu horn/sonotrode như trên Hình 3.2, khi vận hành ở tần số $20 \pm 0,5$ kHz, biên độ rung động lớn nhất đạt được ở mặt đầu của horn (8), với biên độ rung $Z_{son} = 10 \mu\text{m}$. Đường kính lắp dụng cụ biến dạng trên đầu horn/sonotrode là 12mm, do đó nhóm đề tài đường kính dụng cụ là $d_{th} = 12\text{mm}$. Vật liệu làm dụng cụ trong trường hợp này được lựa chọn là thép C45, tôi cải thiện, đỉnh dụng cụ là bằng bi cầu (vật liệu ổ lăn) có đường kính $d_{tip} = 9\text{mm}$. Chiều dài dụng cụ khi đó được lựa chọn theo chiều dài L_1 như mô tả trên Hình 3.9. Để nhận được biên độ rung cực đại ở đỉnh dụng cụ, chiều dài $L_1 = \frac{1}{2} \lambda_{th}$. Vận tốc truyền sóng dọc c của thép C45 được xác định như sau:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{210000000000}{7850 * 9.81}} = 1656.6 \text{ m / s} \quad (3.1)$$

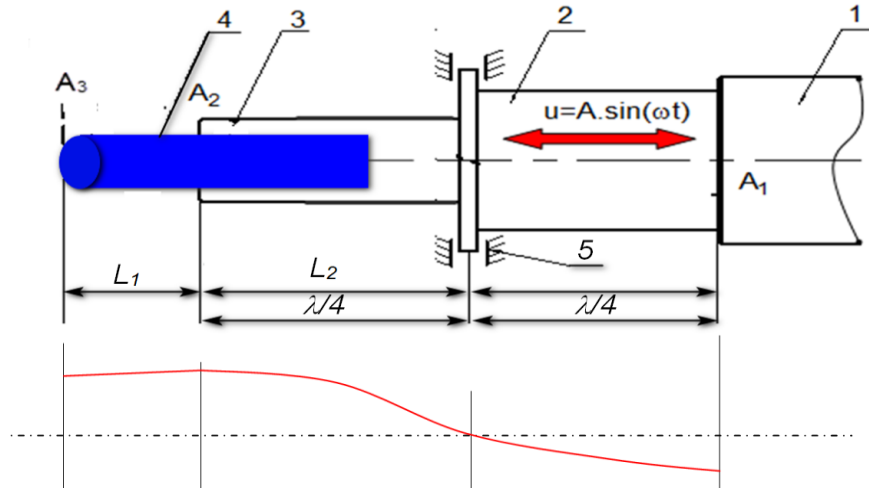
Trong đó: mô đun đàn hồi của thép C45 là $E = 210.10^9 \text{ N/m}^2$; khối lượng riêng của thép là $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$; gia tốc trọng trường $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Vận tốc góc tương ứng với tần số rung 20kHz của đầu rung thương mại là:

$$\omega = 2\pi f = 2 * 3.14 * 20000 = 125663.71 \text{ s} \quad (3.2)$$

Chiều dài bước sóng λ_{th} khi đó là:

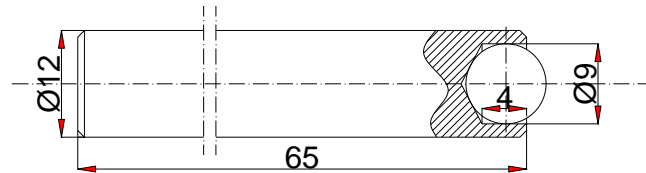
$$\lambda_{th} = \frac{c}{f} = \frac{1656.6}{125663.71} = 0.13m \quad (3.3)$$



Hình 3.9. Giả thiết phân bố biến dạng trên bộ phát rung khi lắp thêm dụng cụ biến

dạng: 1- Bộ phát rung; 2,3- Đầu horn; 4- Dụng cụ biến dạng; 5- Gá kẹp

Hình 3.20 là kết cấu dụng cụ biến dạng dẻo, đường kính $d_0 = 12\text{mm}$; chiều dài $L_1 = \lambda_{th}/2 = 65\text{mm}$.



Hình 3.10. Kích thước dụng cụ biến dạng dẻo dùng cho bộ phát rung YP-5525-4Z

Để xác định được lực biến dạng lớn nhất, giả sử chọn phôi gia công là hợp kim nhôm biến dạng Al 5052 ở trạng thái ủ, chiều dày 1.0mm. Đây là vật liệu khá phổ biến trên thị trường. Theo tiêu chuẩn sản xuất, hợp kim nhôm này có giới hạn chảy lớn nhất là $\sigma_y = 193\text{MPa}$. Giả thiết rằng quá trình biến dạng sẽ thực hiện với góc nghiêng thành bên $\phi = 2\alpha = 60^\circ$, áp dụng biểu thức (2.19) xác định được lực dọc F_z lớn nhất là:

$$F_{zmax} = 3.14 \times 4.5 \times 1.0 \times 193 \times \sin 30^\circ \approx 1.36\text{kN} \quad (3.4)$$

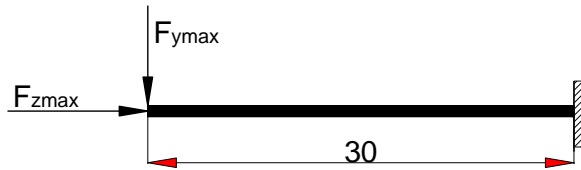
Nếu gia công thép các bon thấp, thép không gỉ SUS304 (thường giới hạn chảy thấp hơn 350MPa) với chiều dày và các thông số hình học tương tự thì lực biến dạng dọc trục lớn nhất F_{zmax} được tính như sau:

$$F_{zmax} = 3.14 \times 4.5 \times 1.0 \times 350 \times \sin 30^\circ \approx 2.47 kN \quad (3.5)$$

Tương tự F_{zmax} , sử dụng biểu thức (2.20) xác định lực tác dụng lên phương ngang F_{ymax} như sau:

$$F_{ymax} = 4.5 \times 1.0 \times 193 \times (\sin 30^\circ + 1 - \cos 30^\circ) \approx 0.55 kN \quad (3.6)$$

Theo mô hình tác dụng lực như trên Hình 2.7, khi dụng cụ được lắp vào đầu horn (kích thước đường kính $\phi 36mm$), có thể xem dụng cụ như một ngàm (như trên Hình 3.11) chịu tác dụng của hai thành phần lực chính là F_{zmax} và F_{ymax} .



Hình 3.11. Mô hình kiểm tra ổn định của dụng cụ biến dạng dẻo

Giả sử chỉ có thành phần lực F_{zmax} gây mất ổn định của dụng cụ, áp dụng công thức Euler, ta có:

$$F_{zmax} \leq F_{th} = \frac{n^2 \times \pi^2 \times E \times I_{min}}{l^2} \quad (3.7)$$

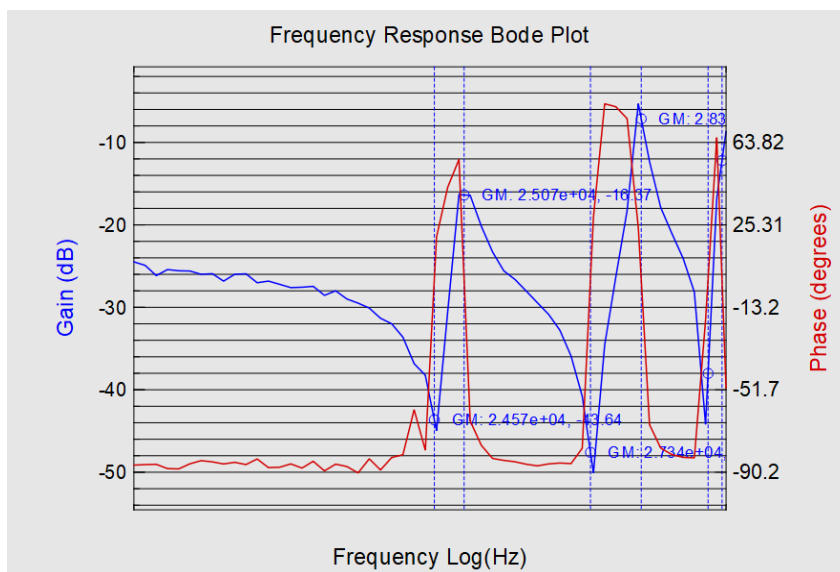
Trong đó, mô đun đàn hồi của thép có thể lựa chọn là $E = 2.15 \times 10^6$ MPa; $l = 65mm$ là chiều dài của đầu dụng cụ (phần nhô ra khỏi đầu horn); I_{min} là mô men quán tính tiết diện nhỏ nhất, ta có $I_{min} = 0.05 \times d_0^4 = 0.05 \times (12^4) = 1036.8mm^4$; chọn $n = 1$. Thay số vào biểu thức (3.3) nhận được:

$$F_{zmax} = 1,36 kN \leq F_{th} = \frac{3.14^2 \times 2.15 \times 10^6 \times 1036.8}{65^2} \approx 7 \times 10^3 kN$$

Rõ ràng, lực tác dụng dọc trục lớn nhất F_{zmax} khi biến dạng hợp kim nhôm Al 5052 nhỏ hơn rất nhiều so với lực gây mất ổn định F_{th} , nghĩa là dụng cụ biến dạng dẻo đảm bảo độ ổn định khi làm việc. Thậm chí, kể cả khi gia công thép các bon thấp thì điều kiện ổn định vẫn đảm bảo.

Sau khi chế tạo và lắp ráp, cần phải xác định tần số cộng hưởng thực sự của thiết bị. Trong quá trình thực hiện, nhóm đề tài sử dụng phương pháp V-I (Bridge method), như mô tả trên Hình 2.12a. Trong đó, thiết bị phát tín hiệu dao động được sử dụng là PicoScope 2000 Series. Sử dụng chương trình quét tín hiệu FRA-4PicoScope để xác định tần số cộng hưởng thực của hệ thống công tác, dải tần số quét được lựa chọn từ 20 kHz đến 35 kHz. Kết quả quét được thể hiện như trên Hình 3.12. Kết quả cho thấy,

hệ thống công tác siêu âm được thiết kế phục vụ biến dạng dẻo có cần số cộng hưởng khoảng 24.57-25.07 kHz hoặc khoảng 27.3-28.3 kHz.



Hình 3.12. Kết quả quét tần số cộng hưởng của hệ thống siêu âm sử dụng bộ phát rung YP-5525-4Z

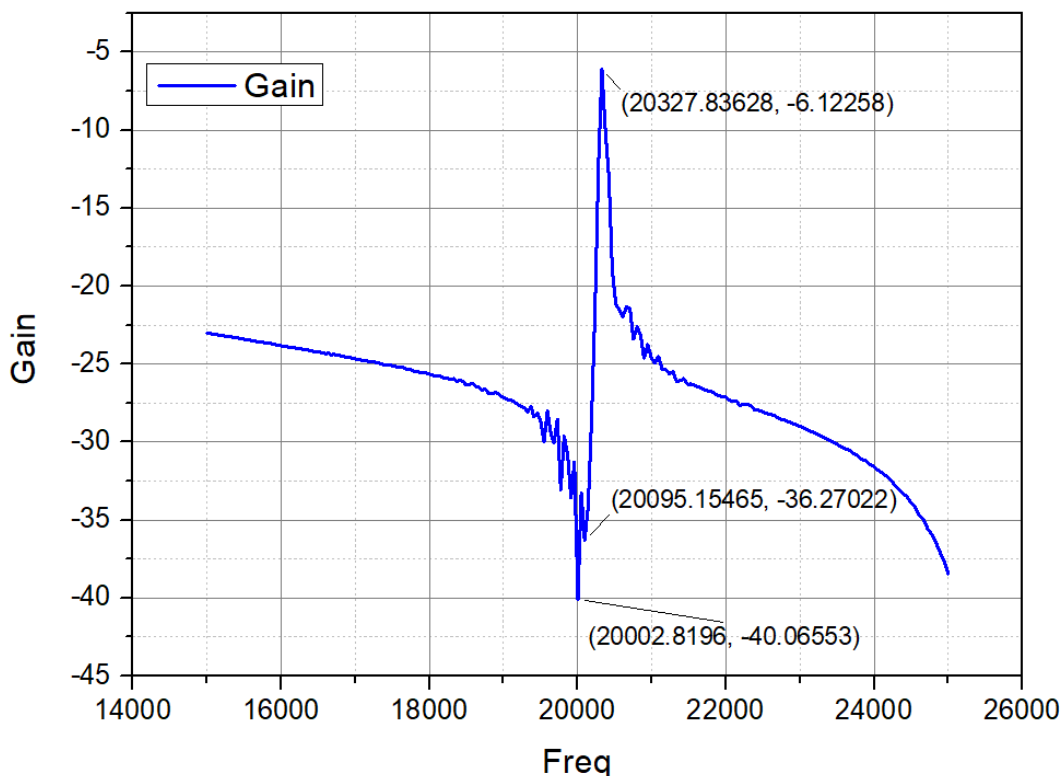
(3) Thiết kế dụng cụ biến dạng cho bộ phát rung KHS20-IP50-L:

Với việc lựa chọn đầu rung phát rung thương mại có sẵn đầu horn/sonotrode như trên Hình 3.3, khi vận hành ở tần số $20 \pm 0,5$ kHz, biên độ rung động lớn nhất đạt được ở mặt đầu của horn (6), với biên độ rung $Z_{son} = 10 \mu\text{m}$. Đường kính lắp dụng cụ biến dạng trên đầu horn/sonotrode là 12mm, lắp bằng ren. Với bộ phát rung này, nhóm đề tài lựa chọn kết cấu dụng cụ như một horn thứ hai. Trong đó, đường kính đoạn lắp vào horn bằng đúng đường kính horn ($\phi 32$), đường kính đoạn thân chọn $d_{th} = 14\text{mm}$, đỉnh được vê cầu. Vật liệu làm dụng cụ được lựa chọn là thép gió, tôi và ram thấp để cải thiện khả năng làm việc. Tương tự như quá trình thiết kế dụng cụ biến dạng dùng cho bộ phát rung YP-5525-4Z, quá trình thiết kế chiều dài được tính toán cẩn thận để đạt được biên độ dao động lớn nhất ở đỉnh dụng cụ .



Hình 3.13. Kết cấu dụng cụ biến dạng dẻo dùng cho bộ phát rung KHS20-IP50-L

Sau khi chế tạo và lắp ráp, cần phải xác định tần số cộng hưởng thực sự của thiết bị. Kết quả quét được thể hiện như trên Hình 3.14. Kết quả cho thấy, hệ thống công tác siêu âm được thiết kế phục vụ biến dạng dẻo có cần số cộng hưởng khoảng 20kHz-20.33 kHz, khá phù hợp với thông số thiết kế của bộ phát rung KHS20-IP50-L.



Hình 3.14. Kết quả quét tần số cộng hưởng của hệ thống công tác siêu âm sử dụng bộ phát rung KHS20-IP50-L

3.2.5. Lựa chọn cảm biến đo lực

Để xác định các thành phần lực khi biến dạng dẻo, sử dụng cảm biến đo lực ba thành phần Kistler 9257B (xem Hình 3.15). Các thông số kỹ thuật của cảm biến được trình bày trong Bảng 3.6.



Hình 3.15. Cảm biến lực ba thành phần KISTLER 9257B.

Bảng 3.6. Thông số kỹ thuật của cảm biến lực Kistler 9257B

Dải đo:	
Dải 1:	$F_x, F_y = -500\text{N} \div 500\text{N}; F_z = -1\text{kN} \div 1\text{kN}$
Dải 2:	$F_x, F_y = -1\text{kN} \div 1\text{kN}; F_z = -2\text{kN} \div 2\text{kN}$
Dải 3:	$F_x, F_y = -2\text{kN} \div 2\text{kN}; F_z = -5\text{kN} \div 5\text{kN}$
Dải 4:	$F_x, F_y = -5\text{kN} \div 5\text{kN}; F_z = -5\text{kN} \div 10\text{kN}$.
Quá dải:	$F_x, F_y, F_z: -7.5\text{kN}/7.5\text{kN}; F_z: 7.5\text{kN} \div 15\text{kN}$
Độ nhạy (dải 1):	$F_x, F_y = 10\text{mV/N}; F_z = 5\text{mV/N}$.
Độ tuyến tính:	+/-1% FS
Độ trễ:	+/-0.5% FS
Tần số:	$F_x, F_y = 2\text{kHz}; F_z = 3.5\text{kHz}$
Kích thước (mm):	170 x 100 x 60
Trọng lượng (kg):	7.3

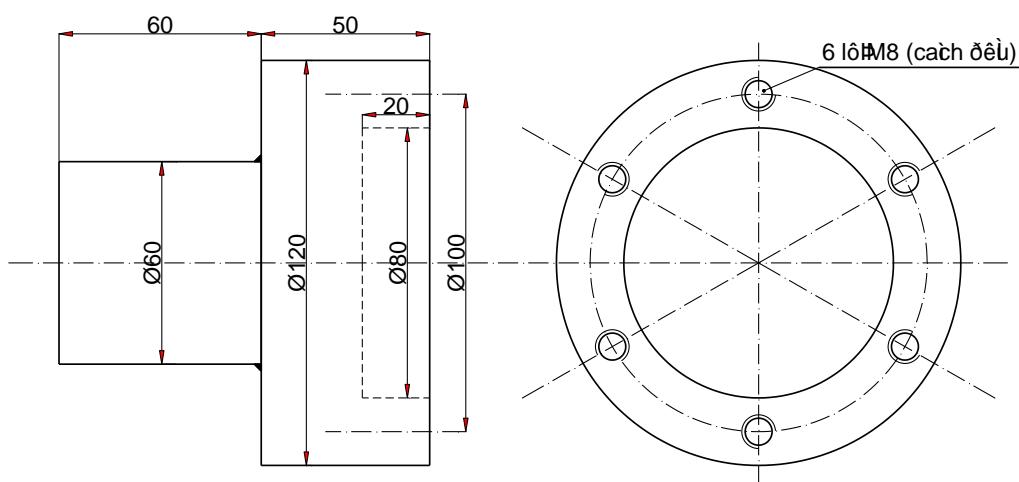
3.2.6. Thiết kế các chi tiết, cụm chi tiết kẹp chặt phôi

Như mô tả ở trên, mặc dù phương pháp UISF không phải sử dụng khuôn, tuy nhiên, do bản chất kéo-nén tại vùng phôi không (hoặc chưa) tiếp xúc với dụng cụ biến dạng dẻo khá phức tạp (như mô tả trên các hình như Hình 1.1 và Hình 1.3) có thể gây nhẵn sản phẩm nên việc kẹp chặt phôi khi gia công là vô cùng cần thiết. Nếu không có kẹp chặt, dưới tác dụng của lực biến dạng dẻo, tấm phôi sẽ bị kéo vào vùng gia công, nghĩa là ở vùng biến dạng dẻo sẽ có hiện tượng tăng chiều sâu h và giảm đường kính D của phôi gia công. Việc giảm đường kính D sẽ gây nên ứng suất nén làm nhẵn tấm sản phẩm. Việc tăng chiều sâu h sẽ làm giảm chiều dày của phôi tạo thành chiều dày của sản phẩm. Căn cứ vào loại máy cũng như kích thước lớn nhất gia công của máy công cụ sử dụng, nhóm đề tài lựa chọn các loại chiều dày phôi 0,5mm và 1,0mm; kích thước được giới hạn trong phạm vi lớn nhất 240 mm x 240mm, tùy thuộc vào việc thí nghiệm trên máy tiện hay máy phay. Trên cơ sở này, tác giả tiến hành thiết kế và chế tạo bộ gá kẹp phôi.

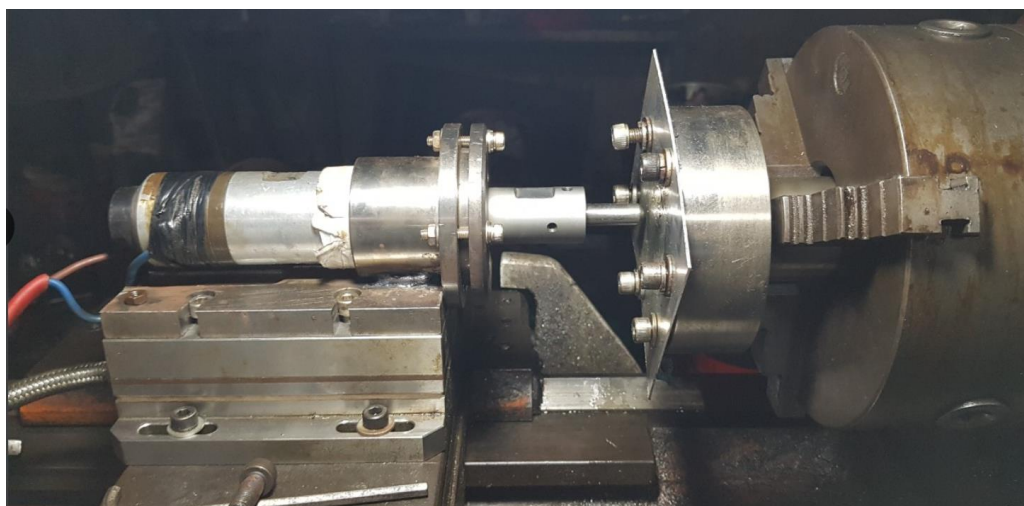
(1) Thiết kế bộ gá kẹp trên máy tiện:

Khi thực hiện biến dạng dẻo, phôi gia công được kẹp chặt trên đồ gá được thiết kế như trên Hình 3.16. Đồ gá gia công biến dạng dẻo được kẹp chặt trên mâm cặp của máy tiện. Nguyên lý gia công biến dạng dẻo UISF được thực hiện như sau (xem min

họa trên Hình 3.17): Phôi tấm gia công được kẹp chặt trên đồ gá bằng các bu-lông M6. Đồ gá được cặp trên mâm cặp máy tiện. Khi thực hiện biến dạng dẻo theo bước, trục chính của máy tiện quay còn hộp xe dao mang cảm biến và bộ thiết bị công tác siêu âm chuyển động tịnh tiến tạo nên bước tiến dọc (gọi là Δz). Tong thực nghiệm, dụng cụ gia công chỉ thực hiện chuyển động tịnh tiến, không thực hiện chuyển động quay. Đồng thời, do những hạn chế nhất định trong quá trình thực hiện, chuyển động theo phương ngang của bàn dao tạo nên bước tiến theo ngang (gọi là Δx) sẽ không được thực hiện.



Hình 3.16. Bản vẽ đồ gá kẹp phôi trên máy tiện

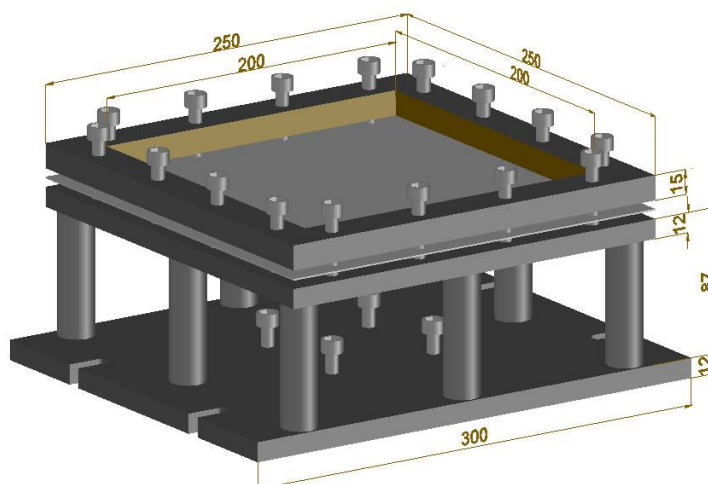


Hình 3.17. Ảnh chụp hệ thống thí nghiệm gia công UISF và ISF trên máy tiện

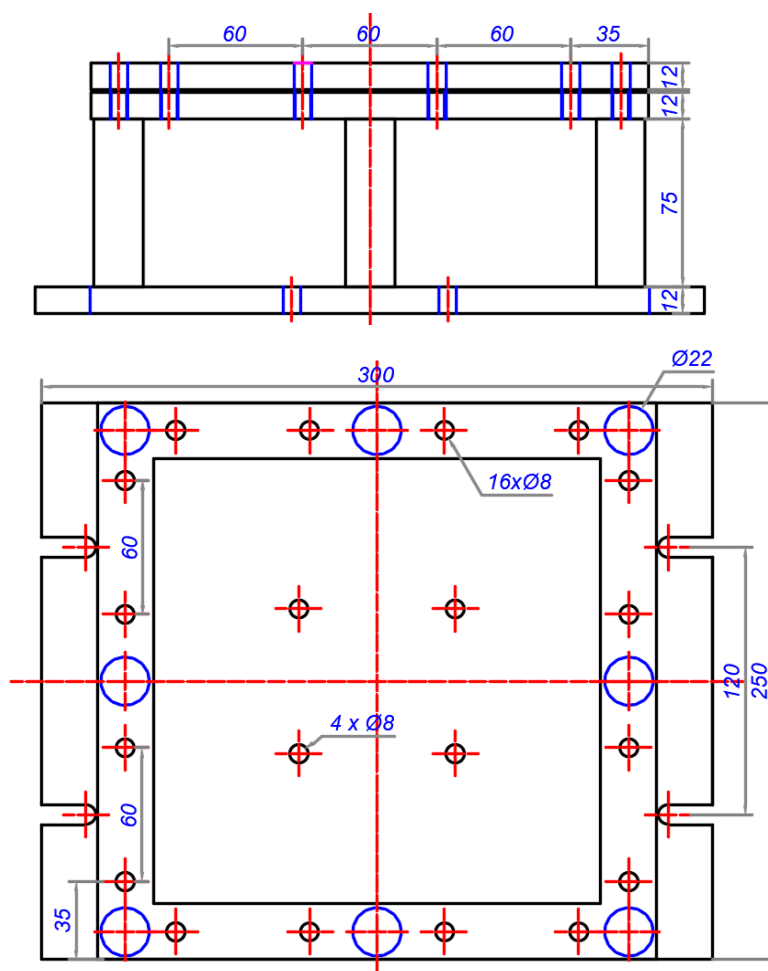
(2) Thiết kế bộ gá kẹp trên máy phay:

Các kích thước của khuôn bộ gá kẹp phôi khi tạo hình UISF trên máy phay CNC được thể hiện như trên Hình 3.18 và Hình 3.19. Trên Hình 3.18 và Hình 3.19, bộ gá kẹp phôi gồm khuôn dưới và tấm kẹp trên. Khuôn dưới gồm đế khuôn, tấm đệm dưới và các trụ đỡ. Đế khuôn được làm bằng thép tấm dày 12mm, có gia công các lỗ để cố

định vào cảm biến đo lực hoặc có thể kẹp chặt trực tiếp vào bàn máy.



Hình 3.18. Bản vẽ 3D thiết kế bộ gá kẹp phôi trên máy phay



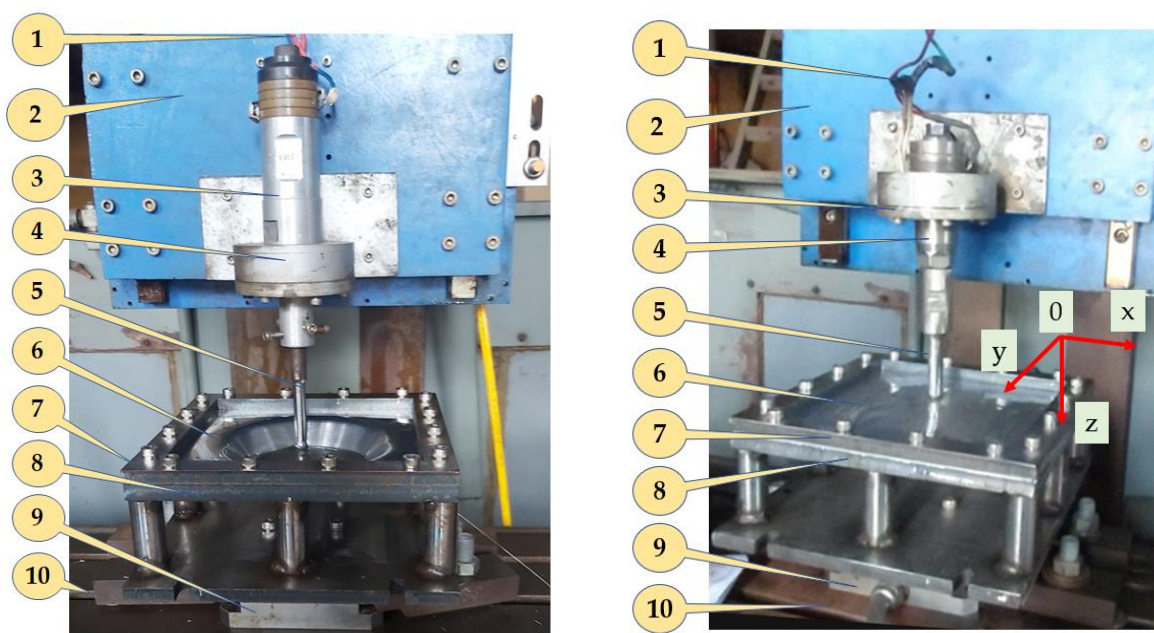
Hình 3.19. Bản vẽ 2D thiết kế bộ gá kẹp phôi trên máy phay

Để tạo hình sản phẩm có chiều sâu nhất định, khuôn có sử dụng tấm đệm dưới dày 12mm, tấm đệm dưới được cố định vào đế khuôn bằng 01 trụ đỡ nhờ phương pháp hàn. Trên tấm đệm dưới có gia công các lỗ ren M6 để cố định tấm phôi với tấm kẹp trên. Để kẹp chặt phôi, nhóm nghiên cứu thiết kế 01 tấm kẹp trên có chiều dày 12mm,

có gia công các lỗ tròn trơn để ghép với tấm đệm dưới của bộ khuôn kẹp. Nhằm đảm bảo kẹp chặt, nhóm nghiên cứu lựa chọn 16 bu-lông M6, khoảng cách giữa các bulong trên 01 hàng cố định là 60mm.

3.2.7. Lắp đặt, hoàn thiện hệ thống thí nghiệm và mô hình đo các thông số

Sau khi hoàn thành việc thiết kế, chế tạo các chi tiết, cụm chi tiết, tiến hành lắp ráp thành hệ thống máy gia công UISF. Với mô hình gia công trên máy tiện, ảnh chụp hệ thống công tác siêu âm được trình bày trên Hình 3.17 phía trên. Trong khi đó, hệ thống công tác siêu âm với các bộ phát rung YP-5525-4Z và KHS20-IP50-L được trình bày trên Hình 3.20 sau đây.



(a) Dùng bộ phát rung YP-5525-4Z

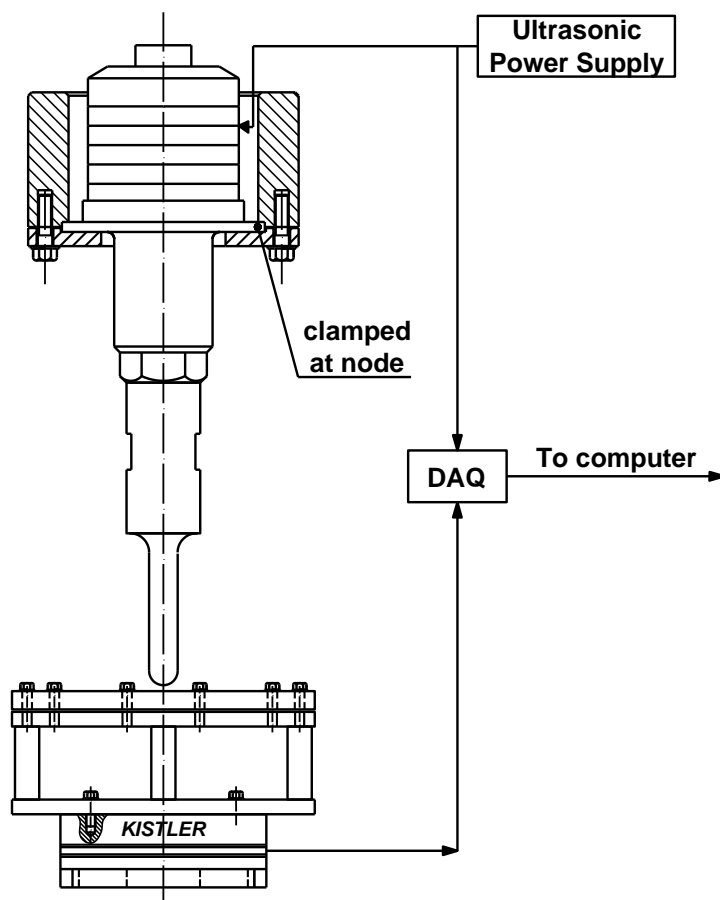
(b) Dùng bộ phát rung KHS20-IP50-L

Hình 3.20. Ảnh chụp hệ thống thí nghiệm UISF và ISF lắp ráp trên máy phay

Trong đó, nguồn điện siêu âm (1) từ máy phát công suất siêu âm được cấp cho bộ phát rung (4) để biến dao động điện thành dao động cơ học. Bộ phát rung (4) được cố định trên đầu máy phay (2) bởi ống kẹp (3) tại các "nodal point". Dụng cụ biến dạng dẻo (5) được kẹp chặt trên đầu horn/sonotrode bằng vít (Hình 3.20a) hoặc lắp ráp bằng ren (Hình 3.20b). Phôi gia công (6) được kẹp chặt nhờ tấm kẹp trên (7) và tấm đỡ dưới (8) bởi các bu-lông. Bộ gá kẹp được đặt cố định tại mặt trên của lực kế 3 thành phần (9). Lực kế 3 thành phần (9) được cố định trên bàn máy (10).

Quá trình làm việc, đầu máy phay (2) chuyển động lên xuống theo phương Oz trên hai ray trượt bi cố định trên thân máy phay (tạo nên bước tiến Δz). Trong khi đó, bàn máy di chuyển theo phương ngang Oy và Ox tạo nên chuyển động tiến dụng cụ

(feed rate) f . Để đo các đại lượng lực biến dạng dẻo trong quá tạo hình, sơ đồ đo được thiết lập như trên Hình 3.21 sau đây.



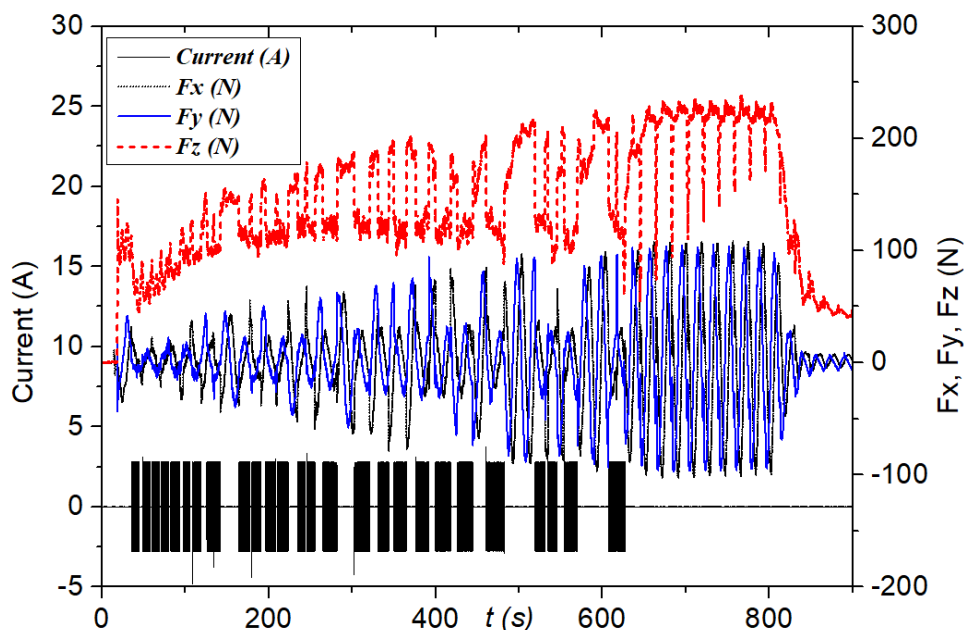
Hình 3.21. Mô hình đo sử dụng trong thí nghiệm UISF và ISF

Trong Hình 3.21, các thành phần lực biến dạng dẻo được đo trực tiếp bằng lực kế 3 thành phần Kistler 9257B. Trong khi đó, cường độ dòng điện cấp cho transducer được đo bằng cách sử dụng DAQ, số hiệu NI-6210 (hãng NI), đo điện áp của hai đầu điện trở 1Ω mắc nối tiếp với transducer.

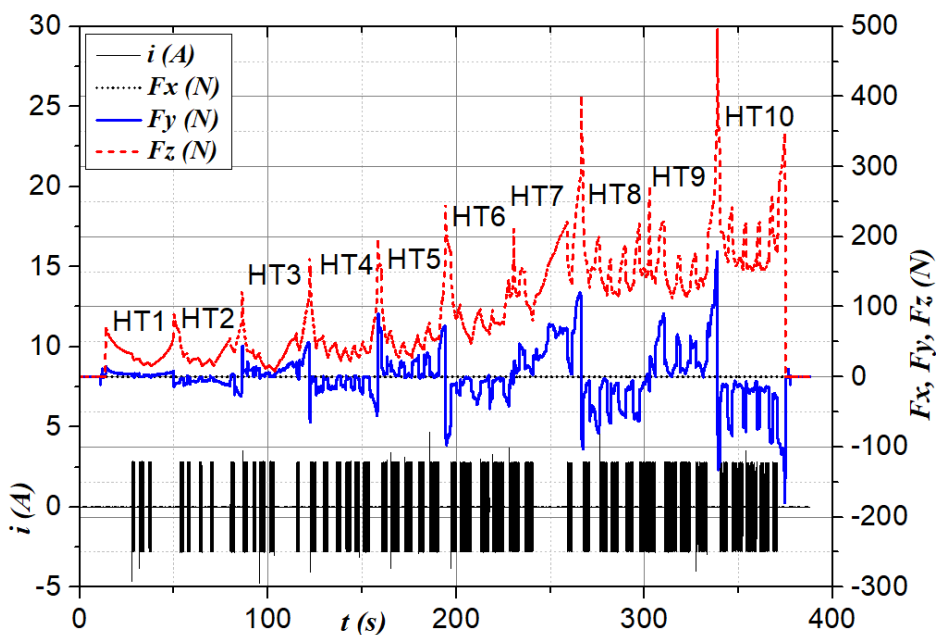
3.2.8. Thử nghiệm hệ thống

Sau khi hoàn thiện thiết bị, việc thực hiện thử nghiệm hệ thống để đánh giá khả năng làm việc là cần thiết. Thí nghiệm đánh giá khả năng làm việc của hệ thống được thực hiện theo hai cách: (1) tiến dụng cụ biến dạng theo quỹ đạo xoắn vít không gian với bước tiến $\Delta z = 0.5\text{mm}$ sau mỗi vòng tạo thành hình nón cụt với chiều sâu $h = 20\text{mm}$ với góc thành tường (góc tạo hình) là 45° , vận tốc $f = 1200\text{mm/ph}$. (2) tiến dụng cụ theo chiều ngang với bước tiến $\Delta z = 0.5\text{mm}$, chiều dài hành trình $L = 120\text{mm}$, vận tốc tiến $f = 1200\text{mm/ph}$. Hình 3.22 và Hình 3.23 là hai kết quả điển hình về các thành phần lực tạo hình F_x , F_y , F_z (N) và cường độ dòng điện i (A) cấp cho transducer khi

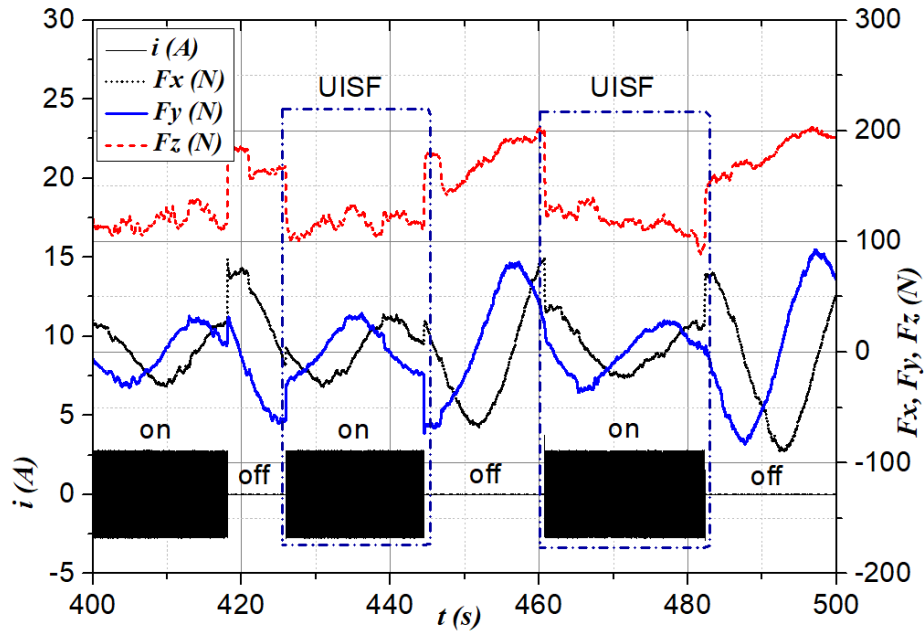
thực hiện tạo hình tấm với các chiều dày lần lượt là $t = 0.5\text{mm}$ và $t = 1.0\text{mm}$. Hình 3.24 và Hình 3.25 biểu thị một phần của các đồ thị lực, cường độ dòng điện trong quá trình tạo hình thử nghiệm, tương ứng với thời gian từ 400s đến 500s của Hình 3.22, và hành trình tạo hình thứ 7 và thứ 8 của Hình 3.23.



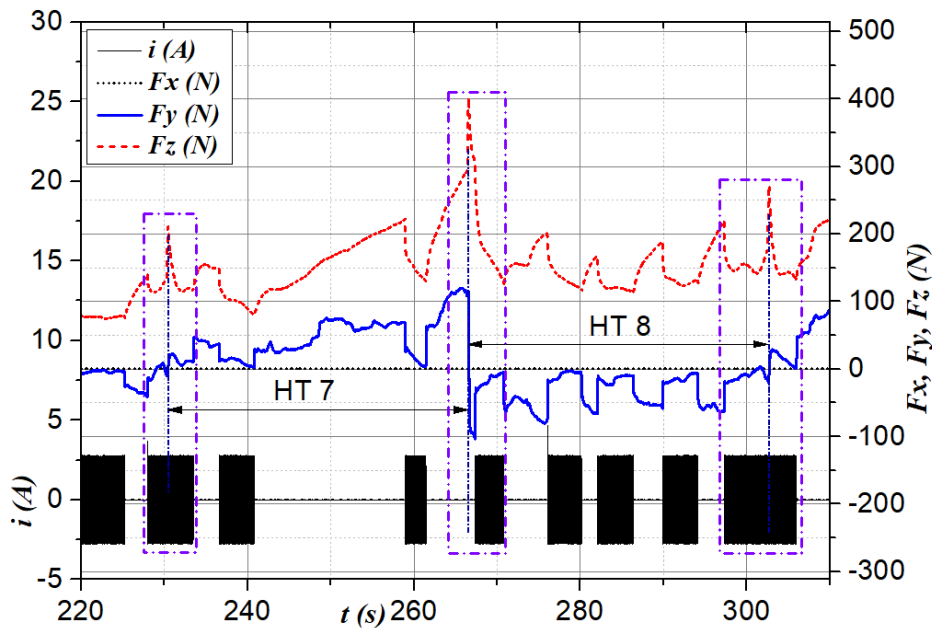
Hình 3.22. Các thành phần lực (F_x, F_y, F_z (N)) và cường độ dòng điện (i (A)) cấp cho transducer khi tạo hình tấm có chiều dày $t = 0.5\text{mm}$ ở điều kiện: $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $f = 1200\text{mm/ph}$; $h = 20\text{mm}$; $\phi = 45^\circ$; quỹ đạo xoắn ốc tạo thành hình nón cắt



Hình 3.23. Các thành phần lực F_x, F_y, F_z (N) và cường độ dòng điện i (A) cấp cho transducer khi tạo hình tấm có chiều dày $t = 1.0\text{mm}$ ở điều kiện: $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $f = 1200\text{mm/ph}$; quỹ đạo thẳng $L = 120\text{mm}$ tạo thành rãnh thẳng



Hình 3.24. Các thành phần lực F_x , F_y , F_z (N) và cường độ dòng điện i (A) cấp cho transducer trong khoảng 400s-500s khi tạo hình tấm có chiều dày $t = 0.5\text{mm}$ ở điều kiện: $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $f = 1200\text{mm/ph}$; $h = 20\text{mm}$; $\phi = 45^\circ$; quỹ đạo xoắn ốc



Hình 3.25. Các thành phần lực F_x , F_y , F_z (N) và cường độ dòng điện i (A) cấp cho transducer ở hành trình thứ 7 và hành trình thứ 8 (trong tổng số 10 hành trình) khi tạo hình tấm có chiều dày $t = 1.0\text{mm}$ ở điều kiện: $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $f = 1200\text{mm/ph}$; quỹ đạo thẳng $L = 120\text{mm}$ tạo thành rãnh thẳng

Trong Hình 3.22, Hình 3.23, Hình 3.24 và Hình 3.25, đường nét đứt màu đỏ biểu thị thành phần lực F_z , đường nét liền màu xanh biểu thị thành phần lực F_y , đường nét chấm màu đen biểu thị thành phần lực F_x và đường nét liền màu đen biểu thị thành

phần cường độ dòng điện i cấp cho transducer.

Kết quả trên Hình 3.22 cho thấy, khi tăng chiều sâu tạo hình h , các thành phần lực tạo hình đều có xu hướng gia tăng. Khi đạt đến chiều sâu tạo hình nhất định, cả ba thành phần lực tạo hình F_x , F_y , F_z không tăng mà ổn định ở một giá trị xác định. Tương tự như vậy, Hình 3.24 cho thấy, khi tăng số hành trình, nghĩa là chiều sâu tạo hình tăng, thì hai thành phần tạo hình F_z và F_y có xu hướng gia tăng. Trong khi đó, tại Hình 3.24, thành phần lực F_x (vuông góc với phương chuyển động của dụng cụ) không có thay đổi gì.

Cả hai hình này đều cho thấy, khi cấp điện cho transducer (phần màu đen, phía dưới), tín hiệu lực F_x , F_y , F_z đã có những thay đổi đột ngột. Sự thay đổi này được quan sát rõ ràng hơn khi được phóng to trên Hình 3.24 và Hình 3.25. Có thể nhận thấy, khi cấp điện cho transducer (on, tương ứng với quá trình gia công UISF), thành phần lực biến dạng F_x , F_y , F_z (trên Hình 3.24) hoặc F_y , F_z (trên Hình 3.25) đột ngột giảm mạnh. Điều này chứng tỏ rằng, hệ thống công tác siêu âm đã vận hành đúng thiết kế đặt ra.

3.3. Kết luận Chương 3

- Đề tài đã lựa chọn và thiết kế, triển khai xây dựng được hệ thống công tác siêu âm phù hợp để nghiên cứu thực nghiệm, gồm: lựa chọn bộ tạo rung và nguồn rung thương mại; thiết kế, chế tạo được dụng cụ biến dạng dẻo để lắp ráp lên bộ tạo rung thương mại; lựa chọn máy tiện hoặc máy CNC cải tạo có khả năng lập trình để thực hiện theo các quỹ đạo gia công khác nhau.

- Sử dụng bộ mạch cầu, bộ phát tín hiệu Pico Scope 2000 và phần mềm quét đã xác định được tần số cộng hưởng của hệ thống công tác siêu âm.

- Kết quả thử nghiệm gia công có rung động siêu âm trợ giúp cho thấy, khi có rung động thì tín hiệu lực biến dạng có thay đổi (giảm) rõ rệt so với không có rung động siêu âm hỗ trợ. Rõ ràng là hệ thống làm việc theo đúng ý đồ thiết kế ban đầu.

Ứng dụng kết quả thiết kế, chế tạo bộ công tác siêu âm vào thực nghiệm gia công biến dạng dẻo theo bước phôi tấm hợp kim nhôm Al 5052. Việc thiết kế thí nghiệm và đánh giá ảnh hưởng của rung động siêu âm đến các thành phần lực tạo hình, lượng giảm thành phần lực tạo hình, xây dựng bài toán tối ưu và đánh giá chất lượng bề mặt, độ chính xác tạo hình sẽ được trình bày chi tiết trong chương 4 sau đây.

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU, ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM VÀ CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN CÁC THÀNH PHẦN LỰC BIẾN DẠNG ĐẸO VÀ CHẤT LƯỢNG TẠO HÌNH SẢN PHẨM DẠNG TẤM VỎ TẠO HÌNH BẰNG CÔNG NGHỆ UISF

4.1. Lựa chọn phôi nghiên cứu

Phôi thí nghiệm được lựa chọn là tấm hợp kim nhôm Al 5052 ở trạng thái ủ. Đây là loại hợp kim biến dạng, không hóa bền bằng nhiệt luyện. Hợp kim nhôm Al 5052 được dùng nhiều trong các ngành công nghiệp và cơ khí như: làm phụ kiện đóng tàu, đóng vỏ tàu thuyền, ca-nô, chế tạo các thiết bị chế biến thực phẩm trong ngành dinh dưỡng, sản xuất thành phần xe tải như thùng xe, các phụ kiện xe, nguyên liệu gia công các chi tiết tấm, vỏ trong máy bay, sản xuất xe hơi, làm nguyên liệu chế tạo biển báo giao thông, biển số xe hơi, xe ô tô... [104]. Tuy nhiên, cho đến nay, các nghiên cứu chi tiết về tạo hình loại vật liệu này bằng cả công nghệ ISF và công nghệ UISF đều chưa được quan tâm đúng mức.

Ngoài ra, hợp kim nhôm này còn dùng trong dân dụng như: sản xuất đồ gia dụng, dụng cụ nấu ăn, nhỏ giọt, thiết bị nhà bếp, lon bia... hoặc trong lĩnh vực xây dựng: chiếu sáng kiến trúc, dùng làm các khuôn mẫu dùng để đúc nhựa, làm máng đèn treo...

Bảng 4.1. Thành phần các nguyên tố hóa học của hợp kim nhôm Al 5052

Nguyên tố	Mg	Cr	Si	Fe	Cu	Zn	Mn	Khác	Al
Khối lượng (%)	2.2-2.8	0.15-0.35	≤ 0.25	≤ 0.45	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.15	Còn lại

Bảng 4.2. Một số tính chất cơ học của hợp kim nhôm Al 5052

Đặc tính	Đơn vị tính	Giá trị	Ghi chú
Giới hạn bền kéo:	MPa	228.0	
Giới hạn chảy:	MPa	193.0	
Độ bền cắt:	MPa	138.0	
Mô đun đàn hồi:	GPa	70.3	
Mô đun trượt:	GPa	25.9	

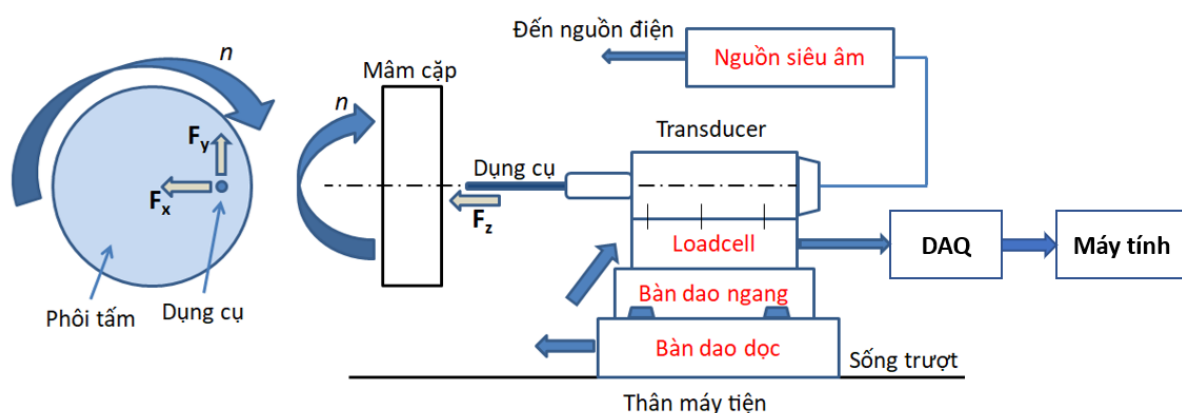
Phôi tạo hình được cắt thành tấm hình vuông, cạnh vuông có kích thước 120mm × 120mm hoặc 240 mm x 240mm tùy theo thí nghiệm. Phôi được lựa chọn nghiên cứu gồm hai loại chiều dày là 0.5mm và 1.0mm, khá phổ biến trên thị trường hiện nay.

Thành phần hóa học của các nguyên tố trong hợp kim nhôm Al 5052 được cho trong Bảng 4.1 sau. Bảng 4.2 trình bày một số tính chất cơ học của hợp kim nhôm Al 5052.

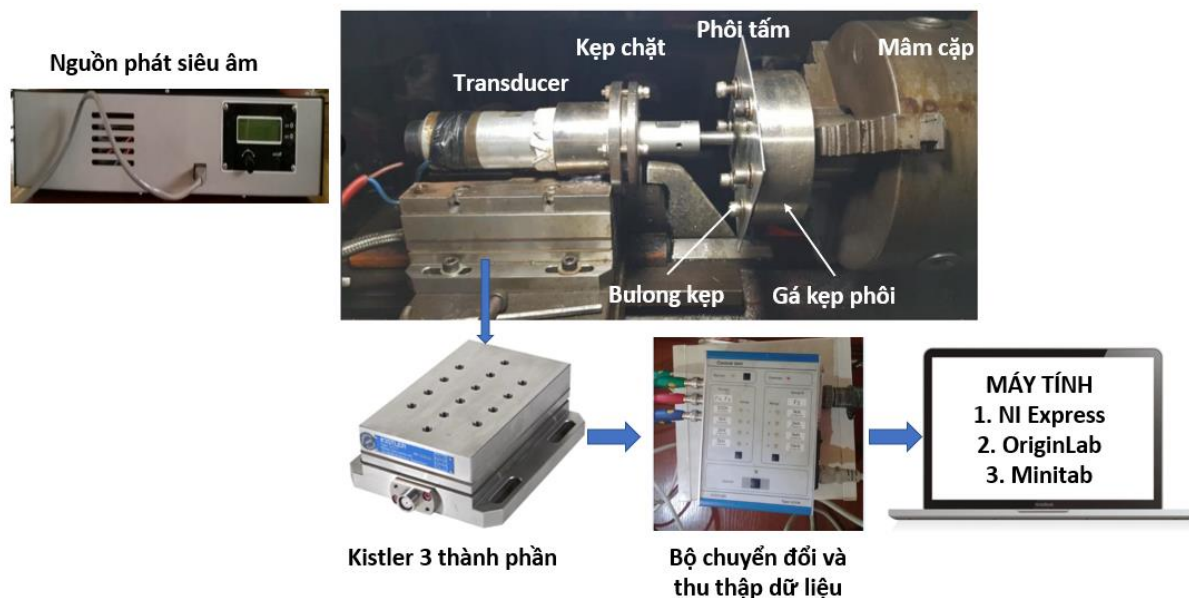
4.2. Thí nghiệm khảo sát, đánh giá ảnh hưởng của rung động siêu âm đến chất lượng bề mặt sản phẩm và thành phần lực tạo hình

4.2.1. Xây dựng mô hình thực nghiệm phục vụ nghiên cứu

Trong thí nghiệm này, nhóm đề tài sử dụng máy tiện ren vít vạn năng Takisawa TSL-550 (thông số kỹ thuật như trên Bảng 3.4) để triển khai thực nghiệm. Mô hình thí nghiệm được thể hiện như trên Hình 4.1. Hệ thống thực nghiệm được xây dựng như minh họa bằng ảnh chụp trên Hình 4.2.



Hình 4.1. Mô hình thí nghiệm UISF trên máy tiện



Hình 4.2. Hệ thống thí nghiệm UISF trên máy tiện

Toàn bộ hệ thống công tác siêu âm trên máy tiện được lựa chọn, thiết kế, chế tạo và đã được giới thiệu chi tiết trong chương 3. Trong quá trình thí nghiệm UISF trên máy tiện, transducer được cố định trên lực kế 3 thành phần Kistler 9257B tại "nodal

point" để đảm bảo rung động siêu âm có thể truyền từ transducer đến dụng cụ biến dạng dẻo mà không bị tổn thất. Dụng cụ biến dạng dẻo được kẹp chặt trên đầu horn của transducer bằng vít. Lực kế 3 thành phần được kẹp chặt trên bàn dao của máy tiện. Phôi tấm được kẹp trên gá kẹp bằng các bu-lông nhằm tránh biến dạng không mong muốn. Trong khi đó, gá kẹp phôi được cặp chặt trên mâm cặp 3 trấu của máy tiện. Tín hiệu lực biến dạng tác dụng lên dụng cụ truyền đến lực kế 3 thành phần và được thu thập qua bộ chuyển đổi, thu thập tín hiệu kèm theo lực kế. Sau đó, dữ liệu được xuất ra dưới dạng hiệu điện thế và được thu thập, số hóa và lưu trữ trên máy tính nhờ phần mềm NI SignalExpress. Sau đó, tín hiệu được xử lý bằng phần mềm OriginLab.

4.2.2. Thiết kế thí nghiệm

Để khảo sát, đánh giá ảnh hưởng rung động siêu âm đến chất lượng quá trình tạo hình, nhóm nghiên cứu sử dụng phương pháp Taguchi để tiến hành thiết kế thí nghiệm. Các biến được sử dụng để thiết kế gồm: bước tiến dụng cụ theo phương z (bước tiến Δz , mm) và tốc độ tiến dụng cụ theo quỹ đạo gia công f (mm/ph). Tốc độ tiến dụng cụ f theo quỹ đạo gia công được thực hiện thông qua tốc độ quay của trục chính n (vg/ph) và có mối liên hệ với nhau theo biểu thức:

$$f = n * \pi * R$$

Trong đó: R là khoảng cách từ vị trí tiếp xúc của đỉnh dụng cụ biến dạng dẻo với phôi tấm đến tâm máy (mm).

Phôi tấm dày 1,0mm, cắt thành tấm dạng vuông kích thước 120mm x 120mm, được kẹp chặt bằng 6 bu-lông lên đồ gá kẹp trên trục chính của máy tiện. Dụng cụ gia công biến dạng dẻo được gá ngang tâm máy, đường tâm dụng cụ song song với đường tâm trục chính ($\Delta y = 0$). Điều chỉnh bàn dao của máy tiện để tâm dụng cụ và tâm trục chính của máy cách nhau khoảng $R = 30$ mm. Khoảng cách này được cố định cho mọi lần gia công thử nghiệm. Khi tiến hành thí nghiệm chỉ thực hiện chuyển động tiến theo phương dọc với bước tiến xác định, lần lượt là $\Delta z = 1.0$ mm, $\Delta z = 1.5$ mm và $\Delta z = 2.0$ mm. Tốc độ quay của trục chính máy tiện được lựa chọn lần lượt là $n = 70$ vg/ph - 130vg/ph - 225vg/ph (tương ứng với tốc độ tiến dụng cụ theo quỹ đạo gia công lần lượt là $f = 6594$ mm/ph - 12246mm/ph - 21195mm/ph). Thực hiện thí nghiệm lần lượt cho hai trường hợp, không có rung (ISF) và có rung động siêu âm hỗ trợ (UISF). Tần số rung động siêu âm được lựa chọn cố định là 28.3 kHz, bằng tần số cộng hưởng đã xác định (xem mô tả tại mục 3.2.4 trên chương 3).

Sử dụng phần mềm Minitab® để thiết kế thí nghiệm và phân tích kết quả. Với 02 thông số đầu vào, mỗi thông số gồm 03 mức, Minitab® cho phép lựa chọn quy hoạch Taguchi L9 với 09 thí nghiệm (Taguchi Array L9(3²)) như được trình bày trong Bảng 4.3, các thông số thí nghiệm và các mức được trình bày trong Bảng 4.4.

Bảng 4.3. Thiết kế thí nghiệm Taguchi đánh giá ảnh hưởng của rung động siêu âm đến chất lượng bề mặt tạo hình bằng UISF

Taguchi Design	
Design Summary	
Taguchi Array	L9(3 ²)
Factors:	2
Runs:	9
Columns of L9(3 ⁴) Array: 12	

Bảng 4.4. Thông số thí nghiệm đánh giá ảnh hưởng của rung động siêu âm đến chất lượng bề mặt tạo hình bằng UISF

Thông số	Các mức		
	Mức 1	Mức 2	Mức 3
Tốc độ trục chính n (vg/ph)	70	130	225
Bước tiến dọc trục Δz (mm)	1,0	1,5	2,0

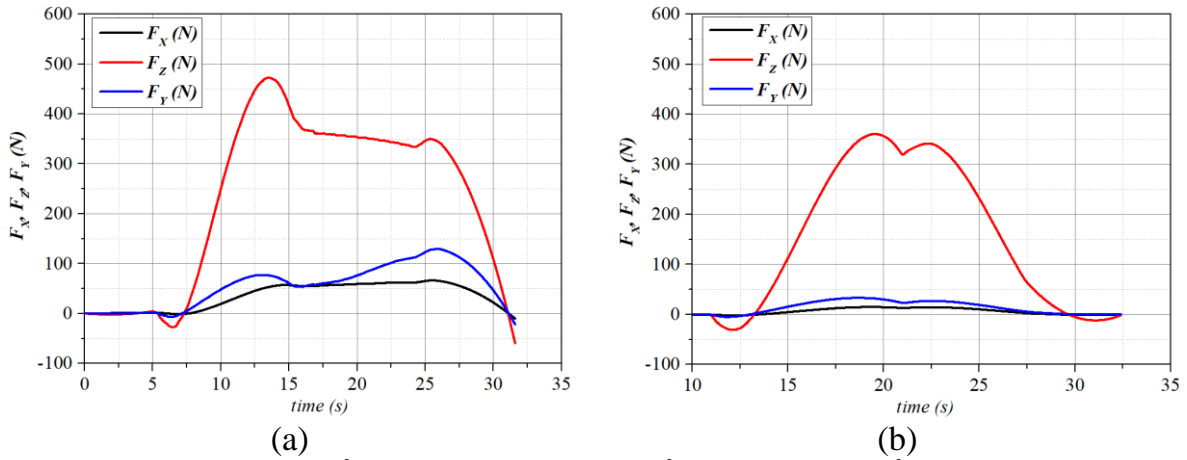
4.2.3. Kết quả thí nghiệm khảo sát, đánh giá ảnh hưởng của rung động siêu âm đến chất lượng bề mặt sản phẩm và thành phần lực tạo hình

1. Phân tích dữ liệu các thành phần lực biến dạng theo thời gian

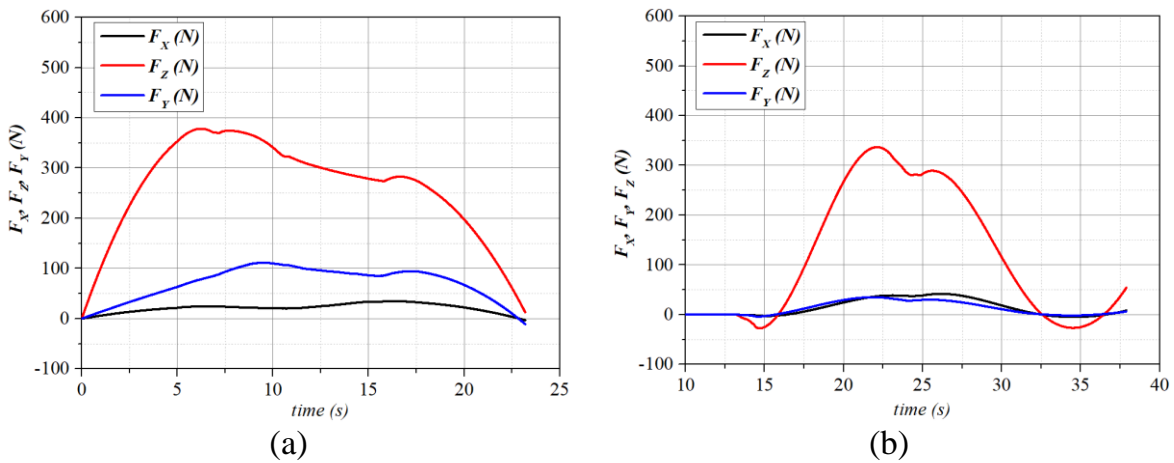
Hình 4.3, Hình 4.4 và Hình 4.5 lần lượt thể hiện các thành phần lực biến dạng ở một số chế độ biến dạng điển hình theo thời gian, xác định từ thực nghiệm. Trong đó, thành phần lực F_z (đường liền màu đỏ), có giá trị lớn nhất, là thành phần lực chính gây nên biến dạng dẻo của tấm khi tiến dọc trục. Thành phần lực tiếp tuyến F_y (đường liền màu xanh), có giá trị nhỏ hơn, là thành phần lực biến dạng chính để duy trì biến dạng dẻo cục bộ liên tục. Thành phần lực hướng kính F_x (đường liền màu đen), có giá trị nhỏ nhất, là thành phần có xu hướng chống lại biến dạng đàn hồi ngược của tấm sau khi biến dạng dẻo.

Về quan hệ, có thể thấy, ở cả hai trường hợp gia công ISF và UISF, khi biến dạng, thành phần lực gây biến dạng F_z tăng khá đột ngột cho đến khi đạt giá trị cực đại

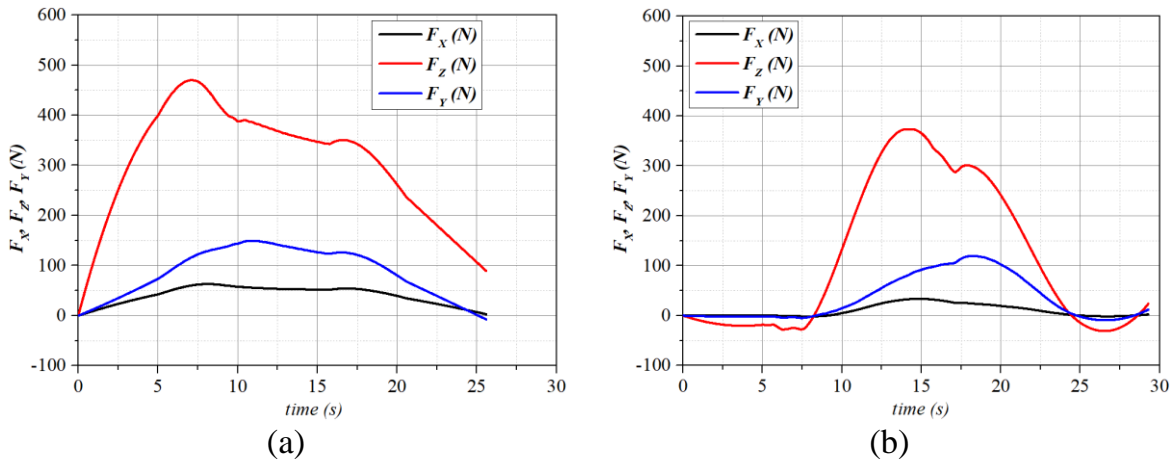
đề tạo chiều sâu biến dạng ban đầu, sau đó giảm dần. Kết quả này có thể là do biến dạng đàn hồi ngược của tấm gây nên (xem minh họa trên Hình 1.6 tại chương 1). Tương tự như vậy, thành phần lực tiếp tuyến F_y và lực hướng kính F_x .



Hình 4.3. Các thành phần lực F_x , F_z , F_y khi biến dạng dẻo ở điều kiện $n = 70\text{vg/ph}$; $\Delta z = 1.0\text{mm}$: (a) ISF và (b) UISF



Hình 4.4. Các thành phần lực F_x , F_z , F_y khi biến dạng dẻo ở điều kiện $n = 225\text{vg/ph}$; $\Delta z = 1.5\text{mm}$: (a) ISF và (b) UISF



Hình 4.5. Các thành phần lực F_x , F_z , F_y khi biến dạng dẻo ở điều kiện $n = 130\text{vg/ph}$; $\Delta z = 2.0\text{mm}$: (a) ISF và (b) UISF

Từ các kết quả này có thể nhận định, ở cùng chế độ gia công biến dạng dẻo theo bước, cả ba thành phần lực giảm đáng kể khi có rung động siêu âm trợ giúp, nghĩa là khi thực hiện quá trình UISF. Mức giảm của mỗi thành phần lực phụ thuộc vào điều kiện biến dạng dẻo cụ thể và sẽ được xem xét, so sánh với nhau.

Trong nghiên cứu này, nhóm đề tài này sử dụng phương pháp so sánh theo cặp (Paired T-Test, một công cụ của Minitab®) nhằm mục đích xác định giá trị trung bình của sự khác biệt giữa hai tập mẫu được so sánh có khác không (hoặc một giá trị mục tiêu) hay không. Từ đó tính toán một phạm vi giá trị có khả năng bao gồm trung bình tổng thể của sự khác biệt. Bảng 4.5 trình bày kết quả so sánh theo cặp (Paired T-Test) lực biến dạng F_z trong hai trường hợp biến dạng dẻo theo bước có và không có sự hỗ trợ của rung động siêu âm.

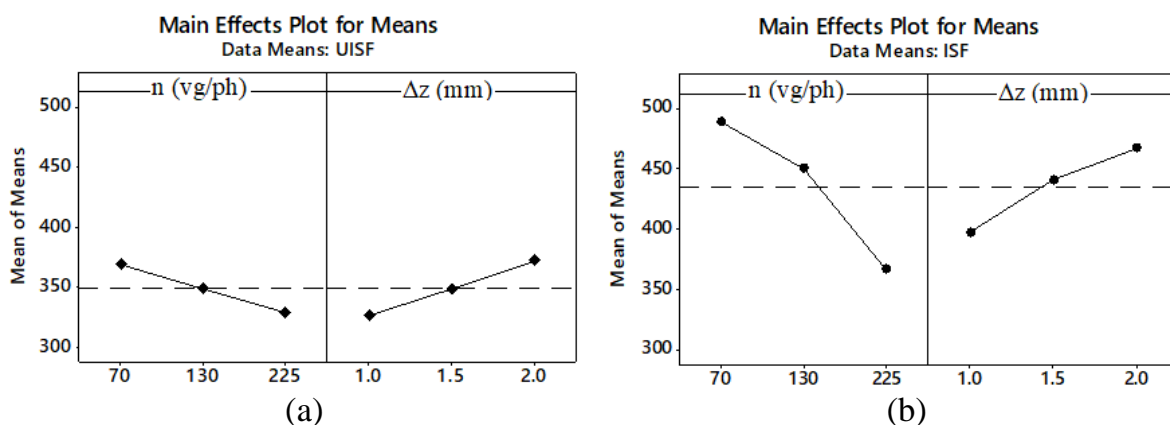
Bảng 4.5. Kết quả so sánh theo cặp (Paired T-Test)

<ul style="list-style-type: none"> Paired T-Test and CI: UISF, ISF Descriptive Statistics 				
Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
UISF	9	349.2	27.3	9.1
ISF	9	435.4	64.1	21.4
<ul style="list-style-type: none"> Estimation for Paired Difference 				
			95% CI for	
Mean	StDev	SE Mean	$\mu_{\text{difference}}$	
-86.1	41.2	13.7	(-117.8; -54.5)	
<ul style="list-style-type: none"> $\mu_{\text{difference}}$: mean of (UISF - ISF) Test 				
Null hypothesis		$H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$		
Alternative hypothesis		$H_1: \mu_{\text{difference}} \neq 0$		
T-Value	P-Value			
-6.28	0.000			
<ul style="list-style-type: none"> 				

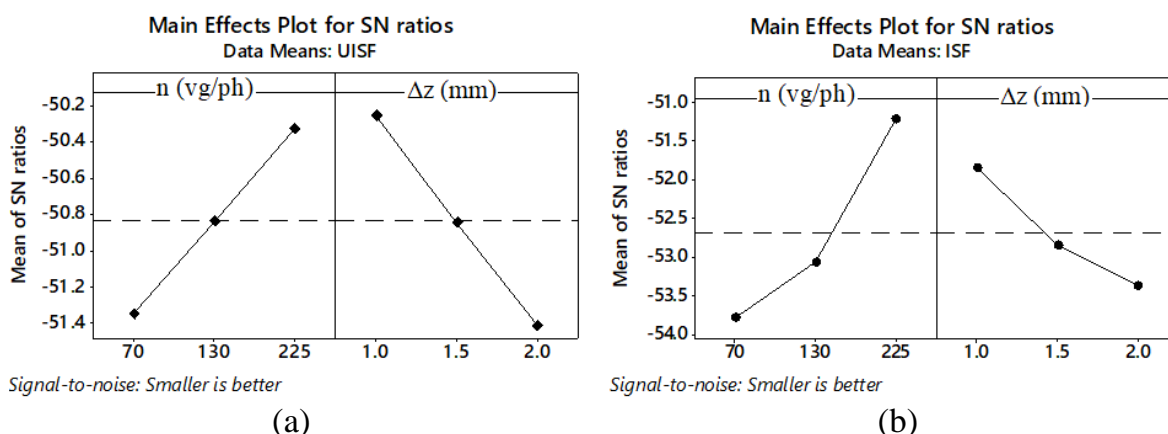
So sánh - đánh giá về chỉ tiêu lực F_z giữa UISF và ISF thông qua so sánh giá trị lực F_z theo cặp với độ tin cậy CI = 95% cho kết quả như sau: khi biến dạng dẻo 09 lần với các bộ thông số gia công khác nhau, thành phần lực F_z ở trường hợp UISF luôn nhỏ hơn trung bình 86,1 N so với trong trường hợp ISF. Kết quả này cho thấy, rung

động siêu âm trong UISF đã làm giảm thành phần lực biến dạng F_z khoảng 20% so với khi biến dạng dẻo ISF thông thường. Độ lệch chuẩn StDev và sai số chuẩn của giá trị trung bình (SE Mean) trong trường hợp UISF nhỏ hơn so với trường hợp ISF cho thấy mức độ phân tán và độ biến thiên giá trị của F_z nhỏ hơn (quá trình gia công ổn định hơn). Kết quả so sánh theo cặp này cũng đã được một số nghiên cứu chỉ ra trước đây, trong đó ảnh hưởng của rung động siêu âm thường được giải thích do hiệu ứng biến mềm kim loại và giảm ma sát nhờ rung động siêu âm.

Ảnh hưởng của các thông số công nghệ (tốc độ quay của trục chính n và bước tiến dụng cụ theo chiều dọc trục Δz) được thể hiện trên Hình 4.6. Ảnh hưởng của thông số công nghệ đến tỉ số S/N với trường hợp UISF và với trường hợp ISF được thể hiện lần lượt trên Hình 4.7.



Hình 4.6. Biểu đồ ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến thành phần lực biến dạng dẻo F_z : (a) UISF; (b) ISF



Hình 4.7. Biểu đồ ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến tỉ số SN của thành phần lực biến dạng dẻo F_z : (a) UISF; (b) ISF

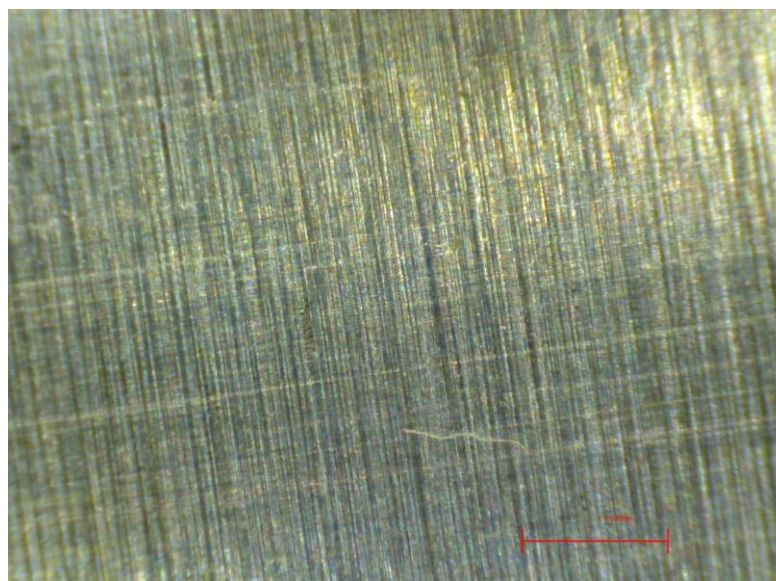
Từ đồ thị Hình 4.6 và Hình 4.7 có thể nhận thấy, thành phần lực biến dạng F_{Zmax} chịu ảnh hưởng bởi cả hai thông số công nghệ là bước tiến theo phương dọc trục Δz và

tốc độ tiến dụng cụ biến dạng f (thể hiện qua tốc độ quay n). Với bước tiến dụng cụ theo phương dọc trục, kết quả thực nghiệm cho thấy, thành phần lực biến dạng chính F_{zmax} tăng khi Δz tăng (nghĩa là mức độ biến dạng thực ε tăng). Lượng tăng này khá tương đồng nhau ở cả hai trường hợp biến dạng (UISF và ISF). Trường hợp biến dạng dẻo bằng UISF, đồ thị ảnh hưởng của Δz đến F_{zmax} gần như một đường thẳng (bên phải, Hình 4.6a). Trong khi đó, với trường hợp biến dạng dẻo bằng ISF, đồ thị ảnh hưởng của Δz đến F_{zmax} có gấp khúc tại tốc độ 130 vg/ph nhưng độ dốc sai khác nhau không nhiều (bên phải, Hình 4.6b).

Xét với thông số tốc độ tiến dụng cụ f (thể hiện qua tốc độ quay n của trục chính), hai trường hợp gia công biến dạng dẻo UISF và ISF, trong khoảng khảo sát, chiều hướng biến thiên (độ dốc) của F_{zmax} có sự khác nhau khá rõ. Khi có rung động siêu âm hỗ trợ, mức độ giảm của F_{zmax} nhỏ hơn, thể hiện bởi đồ thị có độ dốc nhỏ hơn và gần như đồng biến (bên trái, Hình 4.6a). Tuy nhiên, khi không có rung động siêu âm hỗ trợ, mức độ giảm của F_{zmax} lớn hơn nhiều so với khi có rung động siêu âm hỗ trợ (bên trái, Hình 4.6b). Điều này có thể do rung động siêu âm đã cải thiện điều kiện tiếp xúc giữa dụng cụ biến dạng với phôi gia công cũng như cải thiện điều kiện biến dạng vật liệu.

2. Đánh giá chất lượng bề mặt tiếp xúc giữa dụng cụ gia công và bề mặt phôi

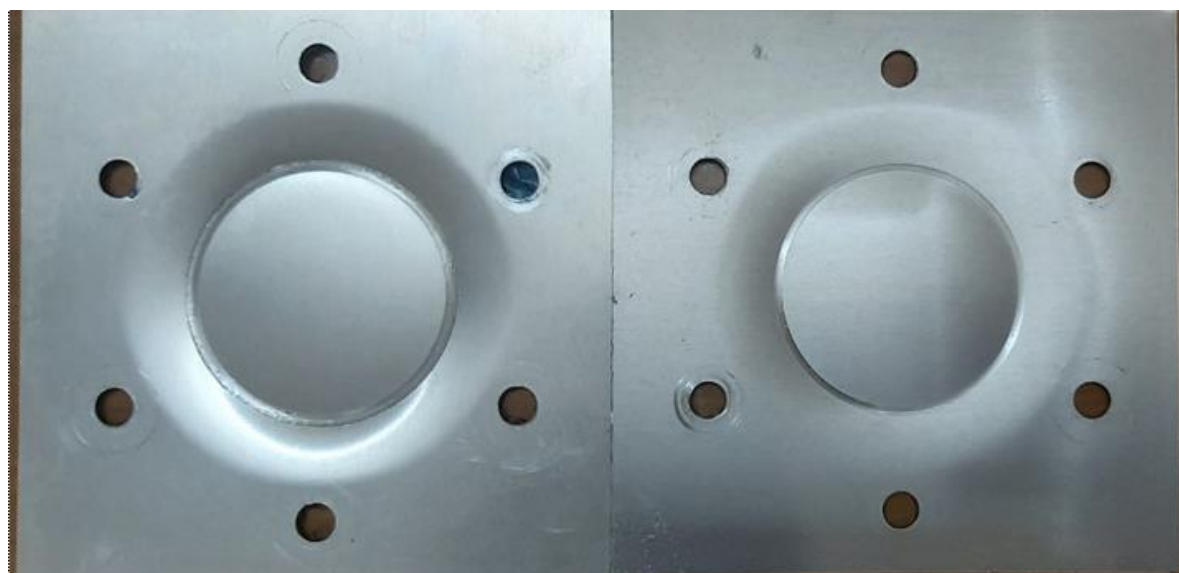
Hình 4.8 là ảnh hiển vi điện tử chụp bề mặt phôi trước khi gia công biến dạng dẻo (độ phóng đại 100 lần - 100X).



Hình 4.8. Ảnh chụp bề mặt phôi trước khi gia công

Dễ dàng nhận thấy các vết biến dạng dọc theo tâm do dụng cụ biến dạng (thường

là trục cán) tạo ra trên bề mặt phôi. Hình 4.9 và Hình 4.10 lần lượt là các ảnh chụp sản phẩm sau khi gia công biến dạng dẻo ISF và UISF với các bước tiến dọc trục Δz khác nhau. Về mặt vĩ mô có thể nhận thấy, khi ở cùng chế độ (tốc độ n và bước Δz) vết gia công để lại trên sản phẩm khi biến dạng dẻo có rung động siêu âm hỗ trợ gọn và bóng hơn so với khi gia công thông thường.



(a)

(b)

Hình 4.9. Ảnh chụp vết gia công biến dạng dẻo bằng ISF (a) và UISF (b) với các thông số: $\Delta z = 1.0\text{mm}$; $n = 70\text{ vg/ph}$, tần số $f = 28.3\text{ kHz}$



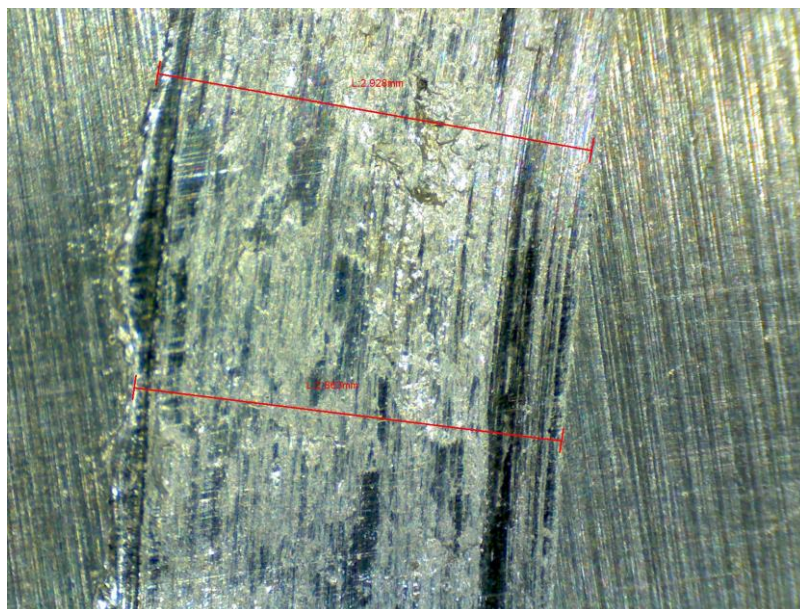
(a)

(b)

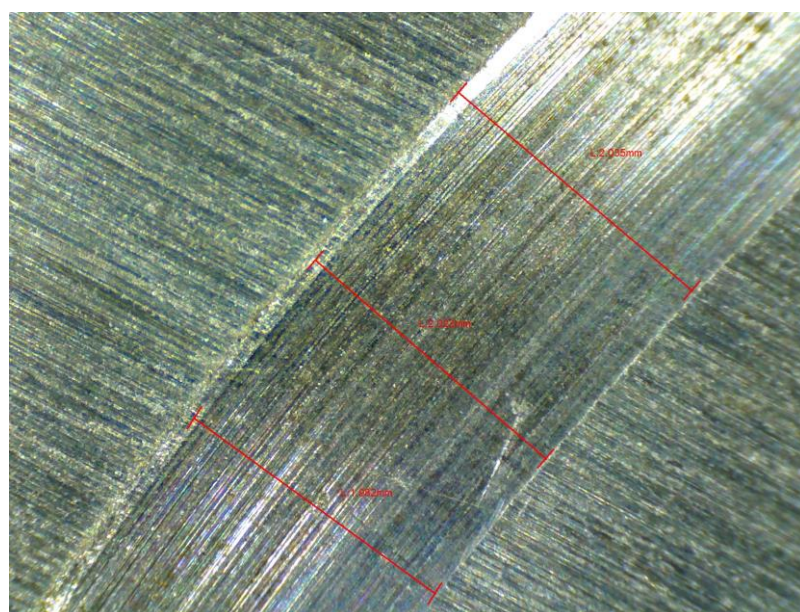
Hình 4.10. Ảnh chụp vết gia công biến dạng dẻo bằng ISF (a) và UISF (b) với các thông số: $\Delta z = 1.5\text{mm}$; $n = 225\text{ vg/ph}$, tần số $f = 28.3\text{ kHz}$

Vết tiếp xúc giữa dụng cụ gia công biến dạng dẻo và bề mặt phôi được chụp ảnh

hiển vi điện tử để so sánh, đánh giá rõ ràng hơn. Độ phóng đại được lựa chọn cố định là 100 lần (100X). Bề mặt vết tiếp xúc khi gia công bằng phương pháp ISF và UISF lần lượt được thể hiện như trên Hình 4.11 (không rung) và Hình 4.12 (có rung siêu âm). Các phôi lần lượt được gia công với chế độ: $\Delta z = 1,5\text{mm}$ và tốc độ quay của trục chính là 70 vg/ph. Trong quá trình gia công, cả hai đều được bôi trơn.



Hình 4.11. Ảnh chụp vết tiếp xúc trên bề mặt phôi sau khi gia công bằng phương pháp ISF (thông số: $\Delta z = 1.5\text{mm}$; $n = 70$ vg/ph, tần số $f = 0$).

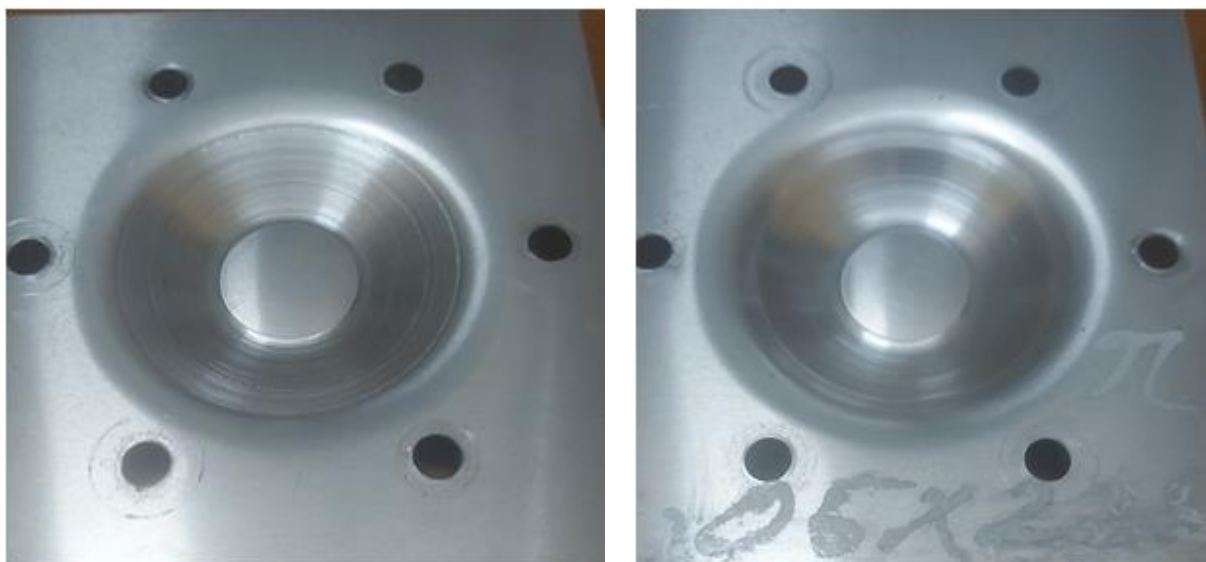


Hình 4.12. Ảnh chụp vết tiếp xúc trên bề mặt phôi sau khi gia công bằng phương pháp UISF (thông số: $\Delta z = 1.5\text{mm}$; $n = 70$ vg/ph, tần số $f = 28.3$ kHz).

Để nhận thấy, khi biến dạng dẻo ISF không có rung siêu âm, bề mặt vết tiếp xúc có dấu hiệu bị cào xước và các nứt nhỏ dọc theo chiều tiến của dụng cụ biến dạng.

Nguyên nhân có thể là do mức độ biến dạng quá lớn, vượt quá khả năng biến dạng dẻo của phôi gây nên. Tuy vậy, với trường hợp gia công UISF có rung động siêu âm hỗ trợ, hiện tượng cào xước và các vết nứt trên bề mặt sản phẩm hầu như không có, độ nhám đạt được khá thấp, $Rz < 1.25\mu\text{m}$. Điều này phù hợp với nhiều kết quả trước đây đã công bố về ảnh hưởng của rung động siêu âm giúp cải thiện chất lượng bề mặt sản phẩm gia công bằng công nghệ UISF.

Để làm rõ hơn ảnh hưởng có lợi của rung động siêu âm đến chất lượng bề mặt, nhóm nghiên cứu tiến hành gia công đến khi hoàn thiện sản phẩm. Thông số được lựa chọn cố định là bước tiến dụng cụ theo phương ngang $\Delta x = 0.05\text{mm/vg}$; đều được bôi trơn giống nhau; tiến dọc trục bằng tay; tốc độ quay được cố định lần lượt là 70 - 130 - 225 vg/ph.



(a)

(b)

Hình 4.13. Ảnh chụp sản phẩm gia công biến dạng dẻo bằng ISF (a) và UISF (b)

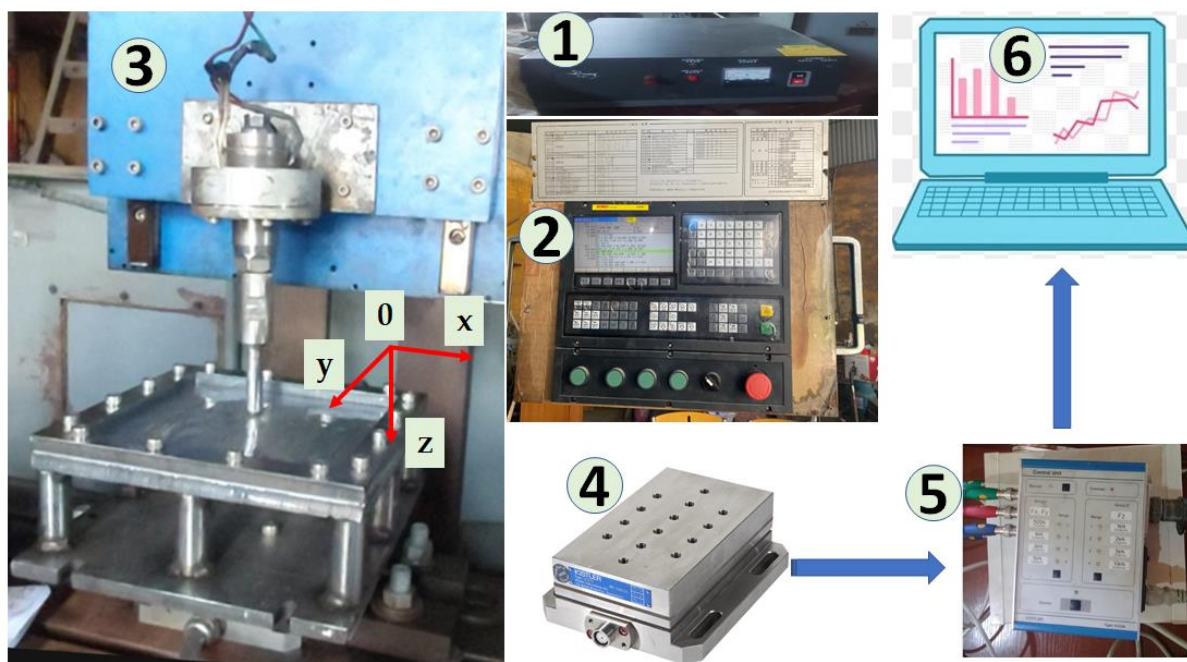
Hình 4.13 là ảnh chụp sản phẩm sau khi biến dạng dẻo bằng ISF và UISF. Rõ ràng, bề mặt sản phẩm được gia công bằng ISF thông thường (Hình 4.13a) có nhiều vết xước trên bề mặt. Trong khi đó, sản phẩm được gia công bằng UISF (Hình 4.13b) hầu như không có những vết xước do vết gia công để lại. Bề mặt sản phẩm đạt độ nhám $Ra < 1.25\mu\text{m}$. Tuy vậy, do những hạn chế nhất định về mặt thiết bị công nghệ (không tiến dụng cụ tự động theo phương dọc trục Oz khi đã tiến tự động theo trục Ox) nên nhóm chưa có cơ sở để đánh giá, so sánh sóng bề mặt tạo nên giữa hai phương pháp gia công biến dạng dẻo này.

4.3. Thí nghiệm khảo sát, đánh giá ảnh hưởng các thông số công nghệ đến các

thành phần lực tạo hình khi gia công theo biên dạng được thiết kế trước

4.3.1. Chuẩn bị phôi thí nghiệm và xây dựng mô hình thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng các tham số đến các thành phần lực tạo hình

Trong thí nghiệm khảo sát này, phôi thí nghiệm được lựa chọn là tấm hợp kim nhôm Al 5052 ở trạng thái ủ, gồm 02 loại chiều dày 0,5mm và 1,0mm; được cắt thành các tấm vuông có kích thước cạnh 240mm × 240mm. Thành phần hóa học của hợp kim nhôm Al 5052 được trình bày trong Bảng 4.1. Một số tính chất cơ học của hợp kim nhôm Al 5052 được giới thiệu trong Bảng 4.2.

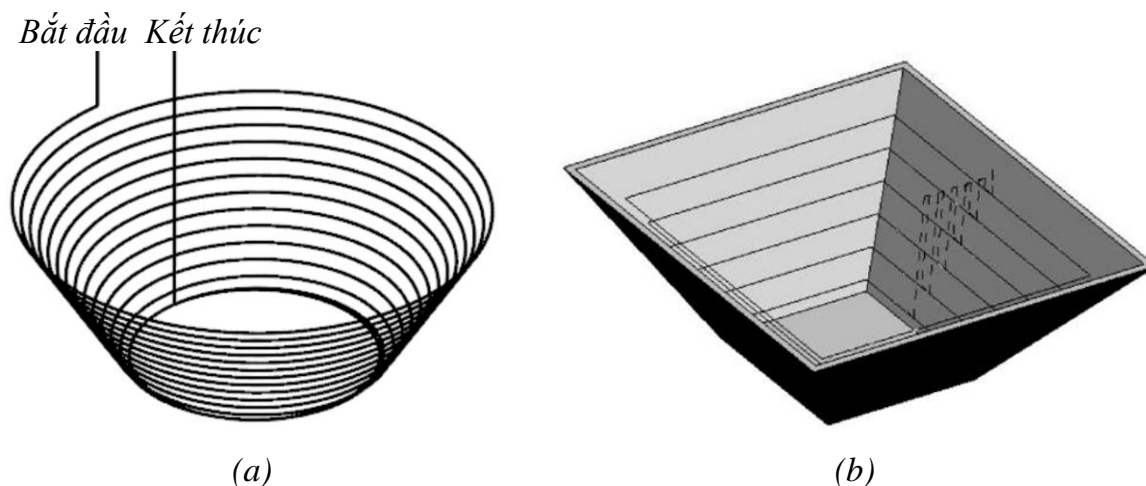


Hình 4.14. Mô hình thí nghiệm và đo các thành phần lực biến dạng dẻo

Mô hình thí nghiệm trên máy phay CNC được thể hiện như trên Hình 4.14. Các thông số của máy phay CNC được trình bày chi tiết trong Bảng 3.5 tại chương 3 phía trên. Dụng cụ biến dạng dẻo (đã được lắp đặt trên công tác siêu âm) sử dụng trong khảo sát quá trình tạo hình được thiết kế, chế tạo trên cơ sở transducer KHS20-IP50-L, như đã được trình bày ở mục 3.4 chương 3 phía trên. Tuy nhiên, để cải thiện độ bền cũng như khả năng chịu mài mòn của dụng cụ, trong nghiên cứu khảo sát và tối ưu sau này, nhóm đề tài sử dụng vật liệu thép gió để chế tạo dụng cụ biến dạng dẻo. Do vậy, đường kính dụng cụ được lựa chọn là 14mm và chiều dài tương ứng cũng được thay đổi, được lựa chọn là 130mm. Trước khi thực nghiệm, chương trình CNC đã được lập trình trên máy tính được đổ vào bộ điều khiển CNC (2) qua cổng USB 2.0. Sau khi gá chặt phôi lên đồ gá, chương trình CNC đã được chuẩn bị sẵn để thực hiện gia công

biến dạng dẻo sẽ được sử dụng để vận hành máy. Đồng thời, trong quá trình khảo sát, nguồn siêu âm (1) không vận hành nhằm xác định các thành phần lực biến dạng ISF thông thường. Khi tạo hình, bất chương trình CNC để máy vận hành thí nghiệm theo chương trình đặt sẵn. Khi đó, đầu máy (3) mang dụng cụ sẽ chuyển động theo quỹ đạo, cảm biến lực 3 thành phần (4) sẽ ghi nhận dữ liệu lực và các dữ liệu này được thu thập bởi bộ thu thập (5). Sau đó, dữ liệu thí nghiệm được chuyển về máy tính (6) để lưu trữ và xử lý. Để thu thập dữ liệu, phần mềm NI SignalExpress được nhóm đề tài sử dụng. Sau khi thu thập dữ liệu các thành phần lực biến dạng, phần mềm OriginLab được sử dụng để xử lý số liệu, xây dựng đồ thị kết quả thí nghiệm.

Căn cứ vào các công bố và cơ sở lý thuyết đã được tổng hợp trong chương 1 và chương 2 và các kết quả thí nghiệm khảo sát trên máy tiện được trình bày tại mục 4.2 của báo cáo tổng kết, đề tài lựa chọn thông số công nghệ và hình học cố định để khảo sát, gồm: (i) quỹ đạo chuyển động dạng xoắn vít trong không gian và contour (như mô tả trên Hình 4.15); (ii) lượng tiến dụng cụ biến dạng dẻo theo phương dọc trục Oz sau mỗi vòng là $\Delta z = 0,2\text{mm}$ và $\Delta z = 0,5\text{mm}$; góc tạo hình (góc thành tường) ϕ được lựa chọn theo các mức giá trị, trong khoảng 45° đến 70° ; chiều sâu tạo hình h lựa chọn các mức giá trị, lần lượt là 20mm - 30mm - 40mm ; tốc độ tiến dụng cụ theo quỹ đạo gia công lựa chọn không đổi là $f = 1200 \text{ mm/ph}$.



Hình 4.15. Hai dạng quỹ đạo chuyển động của dụng cụ biến dạng dẻo

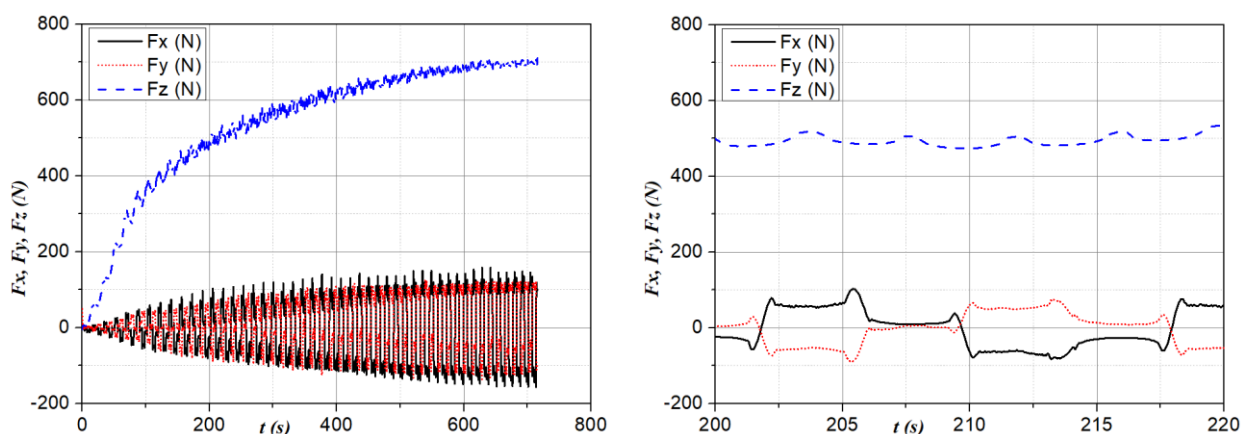
Dụng cụ biến dạng dẻo có phần đỉnh (phần tiếp xúc với phôi tấm) dạng chỏm cầu với đường kính $d = 14\text{mm}$; chiều dày tấm t lựa chọn hai mức giá trị, lần lượt là $0,5\text{mm}$ và $1,0\text{mm}$. Do những hạn chế nhất định, phương án dụng cụ biến dạng dẻo không quay ($n = 0$) được nhóm lựa chọn cho toàn bộ thí nghiệm khảo sát này.

Tuy vậy, nhiều nghiên cứu trước đây cho thấy, thành phần lực biến dạng gần như không bị ảnh hưởng bởi tốc độ quay của dụng cụ. Thí nghiệm này được triển khai nhằm mục đích chính: (1) Khảo sát ảnh hưởng của chiều sâu tạo hình h và góc tạo hình (góc thành tường) ϕ đến các thành phần lực biến dạng khi gia công bằng ISF để lựa chọn kết quả đầu ra nhằm xây dựng bài toán tối ưu; (2) Khảo sát ảnh hưởng chiều sâu tạo hình h và góc thành tường ϕ đến các thành phần lực tạo hình, khả năng lực tạo hình và độ chính xác sản phẩm sau tạo hình (kết quả này sẽ được trình bày ở mục 4.4 phía sau). Tổng hợp các thông số thí nghiệm được trình bày trong Bảng 4.6.

Bảng 4.6. Thông số thí nghiệm khảo sát các thành phần lực biến dạng theo biên dạng được thiết kế trước

Thông số thí nghiệm	Đơn vị tính	Mức giá trị
Tốc độ trục chính n	vg/ph	0
Bước tiến dọc theo phương Δz	mm	0.2; 0.5
Chiều dày tấm t	mm	0.5; 1.0
Tốc độ tiến dụng cụ f	mm/ph	1200
Góc tạo hình (góc thành tường) ϕ	°	45; 50; 55; 60; 70
Chiều sâu tạo hình h	mm	20; 30; 40
Đường kính dụng cụ biến dạng d	mm	14

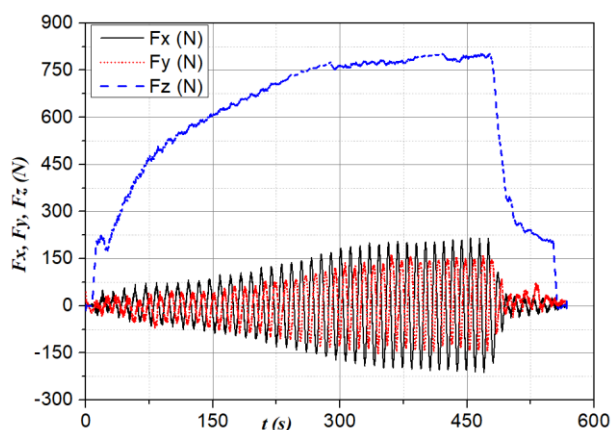
4.3.2. Kết quả thí nghiệm khảo sát mối quan hệ giữa các thành phần lực biến dạng với các thông số tạo hình khi gia công bằng ISF



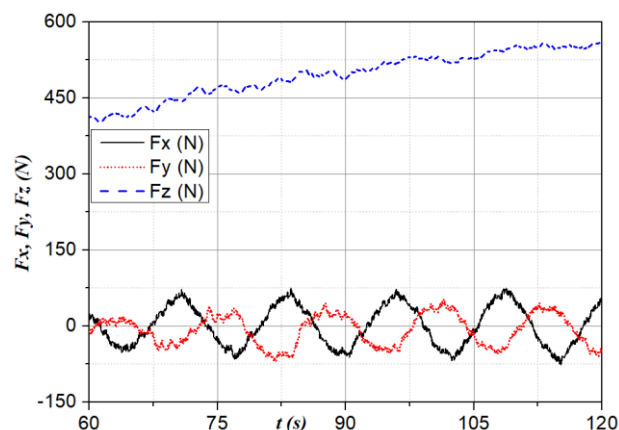
(a) Dữ liệu lực toàn thời gian

(b) Dữ liệu lực trong khoảng 100-220s

Hình 4.16. Các thành phần lực biến dạng dẻo khi tạo hình tấm bằng phương pháp ISF theo quỹ đạo contour ở điều kiện: $t = 0.5\text{mm}$; $\phi = 45^\circ$; $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $h = 40\text{mm}$

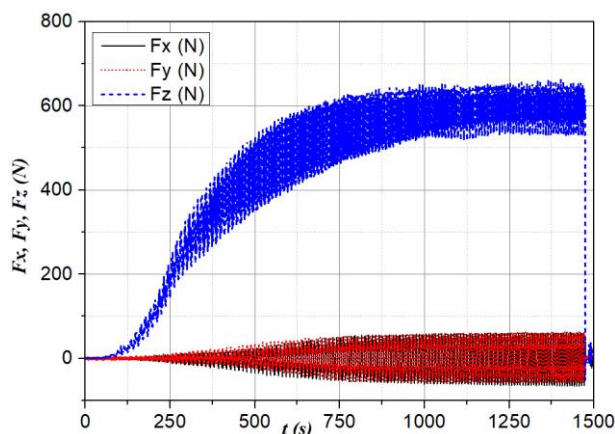


(a) Dữ liệu lực toàn thời gian

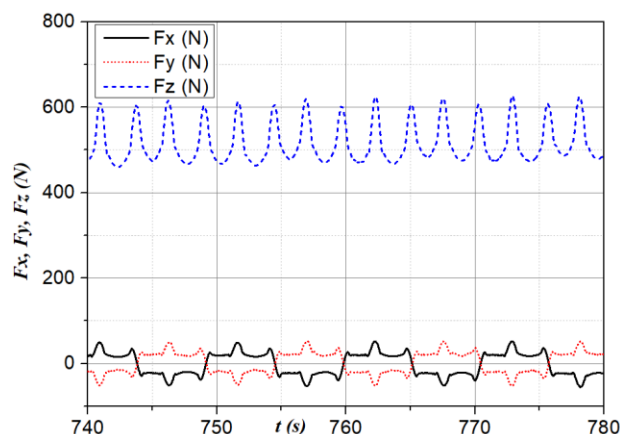


(b) Dữ liệu lực trong khoảng 100-220s

Hình 4.17. Các thành phần lực biến dạng dẻo khi tạo hình tấm bằng phương pháp ISF theo quỹ đạo xoắn không gian ở điều kiện: $t = 1.0\text{mm}$; $\phi = 55^\circ$; $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $h = 20\text{mm}$



(a)



(b)

Hình 4.18. Các thành phần lực biến dạng dẻo khi tạo hình tấm bằng phương pháp ISF theo quỹ đạo contour ở điều kiện: $t = 0.5\text{mm}$; $\Delta z = 0.2\text{mm}$; $\phi = 45^\circ$; $h = 40\text{mm}$

Hình 4.16, Hình 4.17 và Hình 4.18 trình bày dữ liệu điển hình về các thành phần lực biến dạng theo thời gian tương ứng với các điều kiện xác định khi tạo hình tấm bằng phương pháp ISF. Kết quả cho thấy, thành phần lực F_z luôn thể hiện chiều hướng dương, còn các thành phần lực theo phương ngang F_x và F_y lệch pha nhau. Dễ dàng nhận thấy, ở giai đoạn đầu của quá trình tạo hình, thành phần lực biến dạng theo phương thẳng đứng (F_z) lớn hơn đáng kể so với các thành phần lực theo phương ngang (F_y , F_x). Ngoài ra, các thành phần lực biến dạng ở giai đoạn này có xu hướng gia tăng khi chiều sâu tạo hình tăng. Sau giai đoạn ban đầu, cả thành phần lực theo phương thẳng đứng F_z và các thành phần lực theo phương ngang đều có xu hướng tăng chậm. Khi đạt đến chiều sâu tạo hình xác định, các thành phần lực này không tăng mà có xu hướng mà ổn định. Bên cạnh đó, từ các hình này dễ dàng nhận thấy,

thành phần lực biến dạng theo phương thẳng đứng F_z lớn hơn khá nhiều so với các thành phần lực biến dạng theo phương ngang (F_x, F_y). Ngoài ra, kết quả khảo sát cũng cho thấy, khi cùng các điều kiện tạo hình (nghĩa là cùng chiều dày tấm, chiều sâu tạo hình, góc tạo hình/góc thành tường và tốc độ tiến dụng cụ theo phương ngang) thì bước tiến dụng cụ theo phương ngang có ảnh hưởng mạnh đến các thành phần lực biến dạng, đặc biệt là lực tạo hình cực đại khi đạt đến giá trị ổn định (xem Hình 4.16 và Hình 4.18). Rõ ràng, bước tiến dụng cụ theo phương thẳng đứng càng nhỏ thì thành phần lực biến dạng F_x, F_y, F_z cực đại càng nhỏ. Tuy vậy, bước tiến càng nhỏ thì thời gian tạo hình càng lớn, đồng nghĩa với hiệu quả tạo hình càng thấp. Cuối cùng, kết quả khảo sát cũng cho thấy, khi cùng các điều kiện tạo hình nhưng chiều dày tấm lớn hơn thì các thành phần lực tạo hình cũng có xu hướng tăng đáng kể. Các kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây khi nghiên cứu về quá trình ISF tạo hình các loại vật liệu tấm khác nhau [97],[24],[105].

Từ các kết quả này có thể nhận định: Việc tăng bước tiến dụng cụ theo phương thẳng đứng (phương dọc trục) có ý nghĩa lớn trong việc giảm thời gian tạo hình, tăng hiệu quả tạo hình của phương pháp ISF. Đồng thời, việc giảm các thành phần lực tạo hình theo các phương không chỉ có tác dụng giảm năng lượng tiêu hao mà còn góp phần tăng tính ổn định và thu gọn kích thước hệ thống công tác theo phương pháp ISF. Bên cạnh đó, việc giảm lực biến dạng còn thể hiện khả năng biến dạng dẻo tốt hơn, nghĩa là vật liệu chảy dẻo tốt hơn.

4.4. Xây dựng bài toán tối ưu giảm thành phần lực trong tạo hình sản phẩm tấm, vỏ bằng công nghệ gia công biến dạng dẻo theo bước có sự hỗ trợ của rung động siêu âm

4.4.1. Cơ sở xây dựng bài toán tối ưu

Căn cứ các thực nghiệm khảo sát ảnh hưởng của rung động siêu âm đến chất lượng bề mặt sản phẩm ở trên (xem mục 4.2), có thể nhận thấy, gia công bằng UISF góp phần làm tăng chất lượng sản phẩm tạo hình khi so với gia công bằng ISF thông thường. Đồng thời, nhiều nghiên cứu trước đây đã chỉ ra, nghiên cứu hành vi của lực biến dạng đóng vai trò quan trọng trong việc giải thích cơ chế biến dạng dẻo, dự đoán hư hỏng, kiểm soát và tối ưu quá trình biến dạng. Việc thay đổi giá trị của các thông số đầu vào như bước tiến dụng cụ theo phương thẳng đứng, đường kính dụng cụ, góc tạo hình (thành tường) và chiều dày tấm cùng với thuộc tính cơ học của vật liệu kim loại

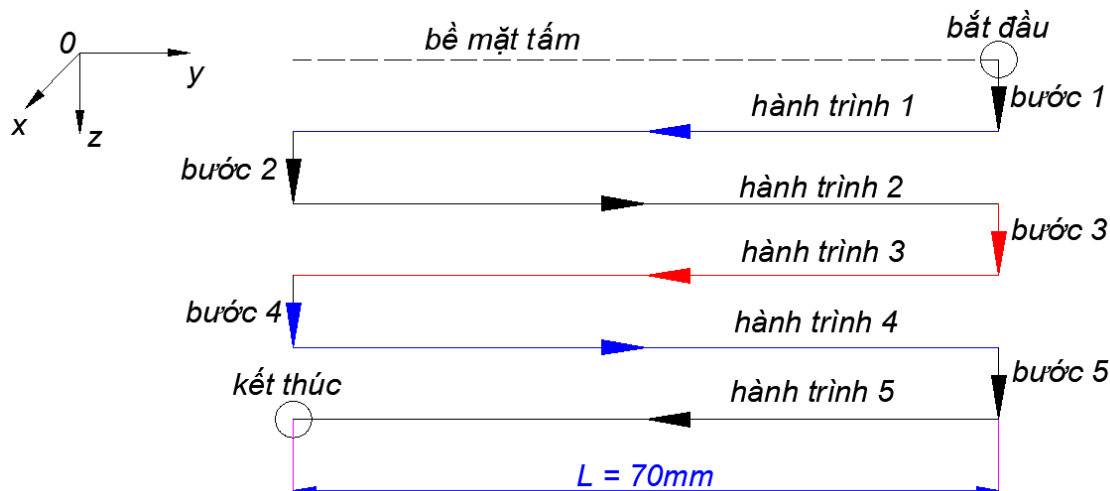
tầm dẫn đến hệ quả là các thành phần lực biến dạng thay đổi. Ngoài ra, việc cải thiện hiệu quả gia công ISF thông qua các đại lượng như giảm độ đàn hồi ngược, giảm độ nhám bề mặt của sản phẩm là một thách thức quan trọng trong quá trình công nghiệp hóa. Căn cứ vào các công bố trước đây về ISF có thể nhận thấy, yếu điểm cơ bản của phương pháp tạo hình ISF là thời gian tạo hình lớn, do đó năng suất gia công giảm. Để giảm thời gian tạo hình, các lượng tiến dụng cụ theo phương dọc trục và tốc độ tiến dụng cụ biến dạng dẻo đồng thời phải lớn. Nhiều nghiên cứu đã lựa chọn tốc độ tiến dụng cụ lớn đến 8000mm/ph (xem Bảng 2.3), hoặc lượng tiến dụng cụ theo phương dọc trục đến 2,0mm (xem Bảng 2.2). Tuy nhiên, khả năng biến dạng của vật liệu ở các điều kiện này kém, có thể phá hủy sản phẩm. Các nghiên cứu về khai thác rung động siêu âm trong quá trình tạo hình (gọi là phương pháp UISF) đã được triển khai, nhưng hầu hết có bước tiến khá nhỏ (xem Bảng 2.6), do vậy không cải thiện được thời gian tạo hình. Trong quá trình triển khai đề tài này, căn cứ vào các kết quả khảo sát bước đầu (như trên mục 4.2 và 4.3 phía trên), nhóm nghiên cứu lựa chọn phạm vi bước tiến dụng cụ theo phương dọc trục lớn hơn, từ 0,5 đến 1,5mm để tiến hành khảo sát và xây dựng bài toán tối ưu. Trong đó, mục tiêu cơ bản là giảm lực biến dạng chính.

4.4.2. Xây dựng mô hình tiến dụng cụ

Mô hình tiến dụng cụ biến dạng dẻo được mô tả như trên Hình 4.19, được thực hiện trên máy phay CNC. Từ bề mặt tấm, dụng cụ biến dạng dẻo bắt đầu thực hiện hành trình ấn xuống (theo phương thẳng đứng Oz) một lượng Δz trên bề mặt tấm, sau đó chuyển động theo phương ngang (phương Oy) đến hết chiều dài tạo hình đặt trước. Sau đó, dụng cụ biến dạng dẻo tiếp tục tiến xuống thêm chiều sâu Δz và chạy theo phương ngang. Quá trình này lặp lại tổng cộng năm lần cho đến khi kết thúc gia công. Kết thúc quá trình, một rãnh thẳng được tạo nên trên bề mặt tấm. Tùy thuộc bước tiến Δz mà chiều sâu rãnh nhận được có thể lớn hoặc nhỏ.

Trong quá trình thí nghiệm, rung động siêu âm được cung cấp cho dụng cụ thông qua bộ chuyển đổi ở chế độ bật/tắt (on/off) để chỉ ra hiệu quả của việc áp dụng rung động siêu âm trợ giúp quá trình ISF. Căn cứ vào mô hình biến dạng (xem Hình 4.19), các thành phần lực được ghi trong suốt quá trình tạo hình để lưu trữ và xử lý. Trong đó, thành phần lực theo phương ngang F_x vuông góc với phương chuyển động của dụng cụ; thành phần lực theo phương ngang F_y có xu hướng cản trở chuyển động của dụng cụ theo phương ngang và thành phần lực F_z có xu hướng cản trở chuyển động

của dụng cụ theo phương thẳng đứng. Ngoài ra, tín hiệu điện dòng điện cung cấp cho bộ chuyển đổi cũng được ghi lại để xử lý. Mô hình thực nghiệm được mô tả chi tiết trên Hình 3.20 và mô hình đo được minh họa trên Hình 3.21, chương 3 phía trên.



Hình 4.19. Mô hình tiến dụng cụ trong thí nghiệm tối ưu

Các nghiên cứu trước đây về ISF cho thấy có nhiều thông số công nghệ ảnh hưởng đến lực biến dạng, chất lượng tạo hình và chất lượng bề mặt như: đường kính dụng cụ biến dạng d , tốc độ tiến dụng cụ f , tốc độ quay dụng cụ n , quỹ đạo tạo hình, bước tiến theo phương dọc trục Δz , chiều sâu tạo hình h , góc tạo hình (thành tường) ϕ , độ dày tấm t ... Khi bổ sung hỗ trợ siêu âm vào quá trình ISF, các thành phần lực biến dạng, chất lượng tạo hình và chất lượng bề mặt cũng bị ảnh hưởng bởi các thông số siêu âm. Trong đề tài này, để tối ưu công nghệ, chúng tôi tập trung đánh giá ảnh hưởng của các thông số chính khi tạo hình bằng công nghệ ISF, bao gồm tốc độ tiến dụng cụ f và bước tiến Δz , đến mức giảm lực biến dạng khi gia công UISF và gia công ISF. Các thông số khác được giữ không đổi trong quá trình thí nghiệm.

4.4.3. Thiết kế thí nghiệm

Trong đề tài này, hai loại thí nghiệm đã được chúng tôi thực hiện: thí nghiệm so sánh và thí nghiệm tối ưu. Phần mềm Minitab® được sử dụng để thiết kế các kế hoạch thử nghiệm cũng như phân tích dữ liệu thu thập được.

Thứ nhất, thí nghiệm so sánh: Như đã được đề cập đến tại mục 4.2 phía trên, thực nghiệm so sánh lực biến dạng giữa quá trình ISF và UISF đã được nhóm đề tài triển khai. Tuy nhiên, do điều kiện thí nghiệm trên máy tiện chưa hoàn toàn phù hợp và đảm bảo độ chính xác cần thiết khi xác định các thành phần lực biến dạng, nên nhóm đề tài đã tiến hành xây dựng một hệ thống thí nghiệm mới trên máy phay CNC

để có những đánh giá chính xác hơn. Các thí nghiệm so sánh được xây dựng để tiến hành thử nghiệm ghép đôi nhằm đánh giá mức giảm lực F_x , F_y , F_z khi gia công theo bước có rung động siêu âm trợ giúp UISF so với khi gia công bằng ISF thông thường. Mục tiêu thực hiện thí nghiệm này là để xác định hiệu quả của rung động siêu âm trong việc giảm các thành phần lực F_x , F_y , F_z trong quá trình thực hiện tạo hình. Các mô tả chi tiết về thí nghiệm so sánh tương tự như mục 4.3 phía trên. Tham số khảo sát và các mức giá trị của tham số khảo sát được trình bày chi tiết trong Bảng 4.7 sau đây.

Bảng 4.7. Các mức thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng của rung động siêu âm đến các thành phần lực biến dạng khi gia công bằng UISF và ISF

Tham số khảo sát	Các mức	
	Thấp	Cao
Bước tiến theo phương dọc trục Δz (mm)	0.5	1.5
Tốc độ tiến dụng cụ f (mm/min)	200	1200
Chiều dày tấm khảo sát t (mm)	0.5	1.0

Thứ hai, thí nghiệm tối ưu: Thiết kế tối ưu được thực hiện nhằm xây dựng và lựa chọn được các thông số gia công tối ưu để đạt được mức độ giảm lực biến dạng lớn nhất, hay nói cách khác là hiệu quả cao nhất. Phương pháp bề mặt đáp ứng, face-centered CCD, được nhóm nghiên cứu áp dụng để tìm cài đặt tối ưu cho các tham số đã chọn. Đây là một kiểu thiết kế hỗn hợp trung tâm trong đó các điểm trục hoặc điểm "sao" nằm ở tâm của mỗi mặt của không gian giai thừa, do đó mức trục là ± 1 . Sự đa dạng của thiết kế này đòi hỏi ba mức thí nghiệm của từng yếu tố đầu vào, như mô tả trong Bảng 4.8. Hai thông số đầu vào được lựa chọn dựa trên kết quả thí nghiệm so sánh. Quy trình tối ưu được áp dụng riêng cho hai tấm có độ dày 0,5mm và 1,0mm.

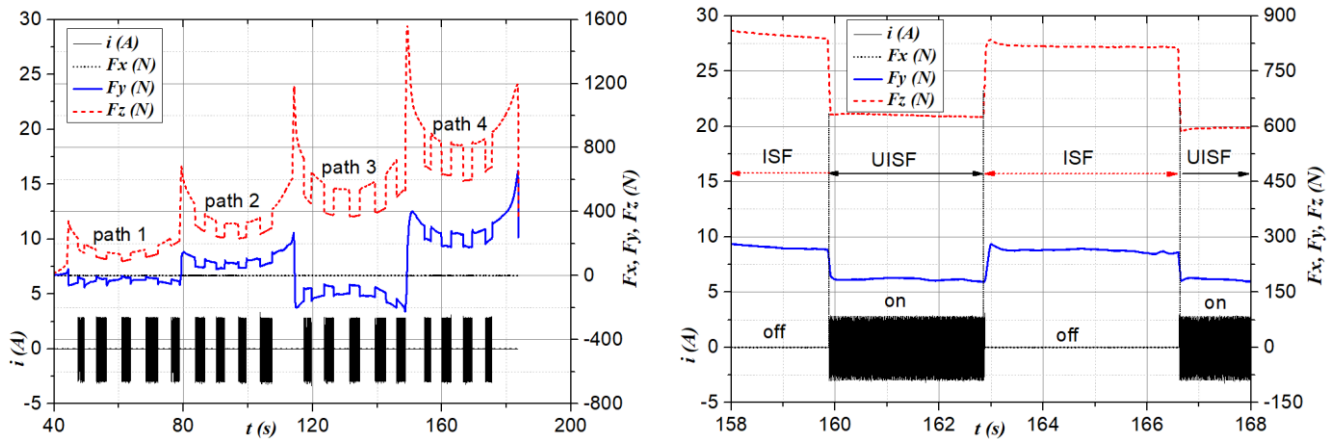
Bảng 4.8. Thiết kế thí nghiệm tối ưu CCD và các mức tham số đầu vào

Tham số khảo sát	Các mức		
	Mức 1	Mức 2	Mức 3
Bước tiến theo phương dọc trục Δz (mm)	0.5	1.0	1.5
Tốc độ tiến dụng cụ f (mm/ph)	200	700	1200

4.4.4. Kết quả dữ liệu lực biến dạng dẻo theo thời gian

Kết quả dữ liệu các thành phần lực biến dạng dẻo điển hình khi tạo hình có và không có rung động siêu âm trợ giúp được thể hiện như trên Hình 4.20 và Hình 4.21. Trong các hình này, thành phần lực F_x được biểu thị bằng đường chấm ngắn màu đen,

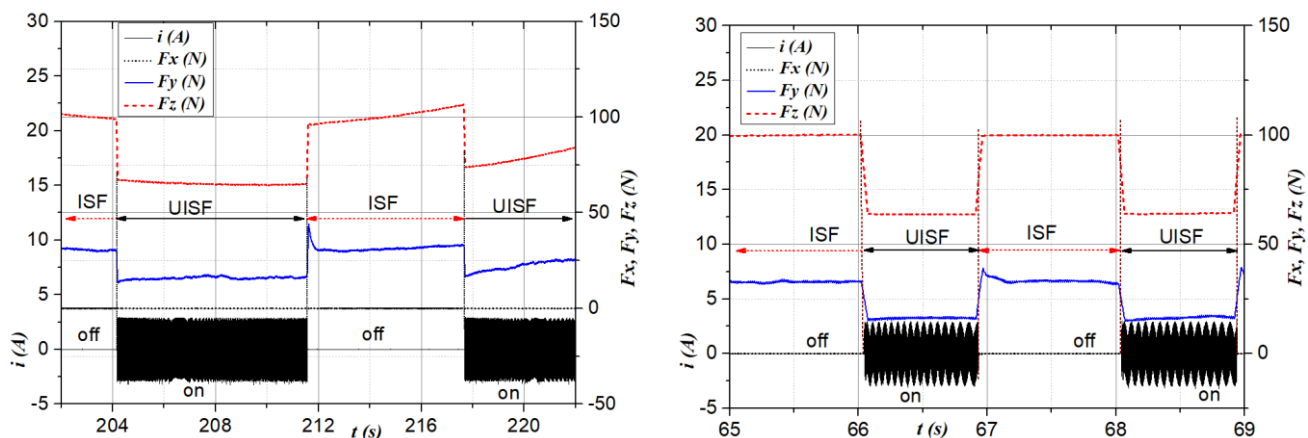
thành phần lực F_y được biểu thị bằng đường liền màu xanh, thành phần lực F_z được biểu thị bằng đường nét đứt màu đỏ, dòng điện được cấp cho transducer được thể hiện bằng đường liền mảnh màu đen. Dữ liệu tại mỗi hành trình, “bật/on” thể hiện thời gian cấp điện siêu âm cho transducer, tương ứng với tạo hình bằng UISF; “tắt/off” thể hiện việc ngắt nguồn điện siêu âm cấp cho transducer, tương ứng với quá trình tạo hình ISF thông thường. Các kết quả cho thấy, thành phần lực biến dạng theo phương thẳng đứng F_z lớn hơn hẳn so với thành phần lực theo phương chuyển động của dụng cụ biến dạng F_y và F_x , kể cả khi có hoặc không có rung động siêu âm hỗ trợ. Đồng thời, thành phần lực F_y và F_x tăng sau mỗi hành trình tạo hình, nghĩa là chiều sâu tạo hình tăng thì các thành phần lực này đều gia tăng. Kết quả này phù hợp với thí nghiệm trình bày ở mục 4.2 và 4.3 phía trên. Xem xét các thành phần lực biến dạng ở mỗi hành trình nhận thấy, F_y và F_x có xu hướng gia tăng mạnh ở đầu và cuối mỗi hành trình (tạo thành các peak lực), sau đó chúng giảm xuống và đạt giá trị bình ổn ở giữa hành trình. Điều này có thể giải thích bởi khả năng biến dạng dẻo của tấm khi gần vùng kẹp chặt kém, nên đòi hỏi thành phần lực biến dạng dẻo phải tăng mạnh. Tuy nhiên, thành phần lực F_x (phương vuông góc với phương chuyển động của dụng cụ biến dạng) hầu như không thay đổi trong mọi hành trình, trong các thí nghiệm, kể cả khi “bật/on” hoặc “tắt/off” rung động siêu âm.



Hình 4.20. Dữ liệu các thành phần lực F_x, F_y, F_z khi tạo hình ở điều kiện bật/tắt (on/off) dòng điện siêu âm, $t = 1.0\text{mm}$; $\Delta z = 1.5\text{mm}$; $f = 200\text{mm/ph}$:
(a) 4 trong 5 hành trình; (b) hành trình 4 (lưu ý: path là hành trình)

Đặc biệt là, tương tự thí nghiệm kiểm chứng thiết bị (xem Hình 3.23 và Hình 3.25 tại chương 3 phía trên, tương tự thí nghiệm ở đây), trên mỗi hành trình tiến dụng cụ biến dạng, khi tạo hình có rung động siêu âm trợ giúp (nghĩa là, dòng điện cấp cho

transducer ở chế độ “bật/on”), các thành phần lực biến dạng (F_y , F_z) đều thay đổi (giảm) đột ngột... so với khi tạo hình không có rung động siêu âm (thể hiện bởi dòng điện siêu âm ở chế độ “tắt/off”). Ngoài ra, khi tắt/off rung động siêu âm, đồ thị lực F_y và F_z cho thấy, các thành phần này tăng đột ngột, thậm chí lớn hơn so với mức trung bình trên cả hành trình gia công bằng ISF thông thường.



Hình 4.21. Dữ liệu các thành phần lực F_x , F_y , F_z khi tạo hình ở điều kiện bật/tắt (on/off) dòng điện siêu âm: (a) $t = 0.5\text{mm}$, $\Delta z = 1.0\text{mm}$, $f = 200\text{mm/ph}$, hành trình 4; (b) $t = 0.5\text{mm}$, $\Delta z = 0.5\text{mm}$, $f = 700\text{mm/ph}$, hành trình 5

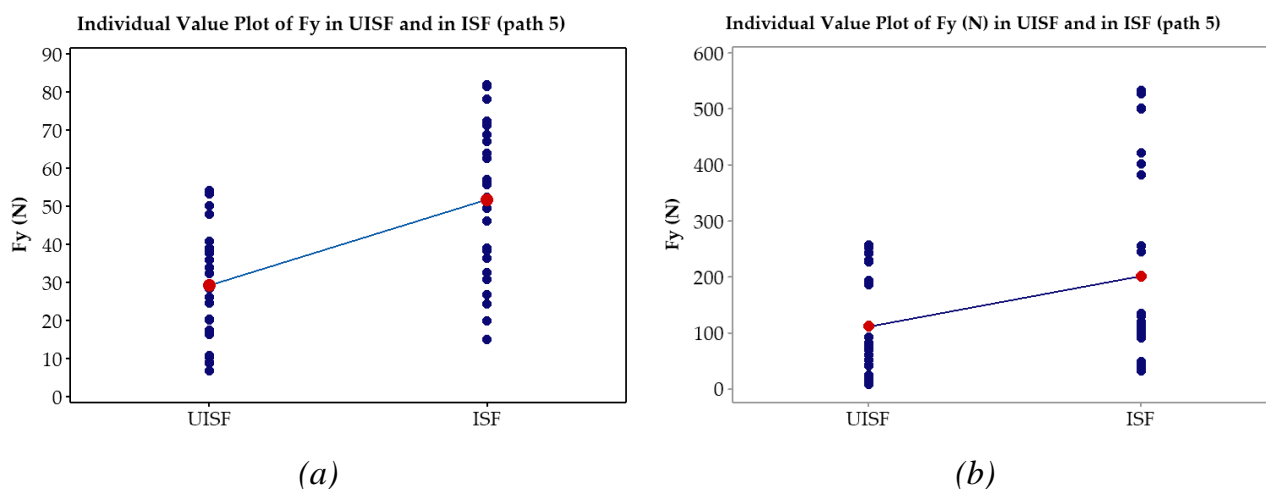
Hiện tượng giảm lực biến dạng dẻo F_z được giải thích bởi các nguyên nhân do sự biến mềm của vật liệu dưới tác dụng của rung động siêu âm. Hiện tượng biến mềm này có bản chất là rung động siêu âm, tương tự quá trình hành, làm cho nhiệt độ bề mặt tấm tại vị trí tiếp xúc với dụng cụ biến dạng dẻo tăng lên. Nhờ đó, lệch dễ dàng chuyển động hơn. Hoặc một cách khác giải thích khác, đó là nhờ rung động siêu âm mà nội ma sát cản trở chuyển động của lệch bên trong lòng vật liệu giảm xuống. Nhờ đó, lệch cũng dễ dàng chuyển động hơn, vật liệu dễ bị biến dạng hơn, kể cả khi lực nhỏ. Do vậy, lực cần thiết để tạo hình theo phương thẳng đứng F_z khi có rung động siêu âm trợ giúp nhỏ hơn nhiều so với khi không có rung động siêu âm.

Hiện tượng giảm thành phần lực F_y thường được giải thích bởi nguyên nhân tương tự như với việc giảm thành phần lực biến dạng theo phương thẳng đứng F_z . Ngoài ra, cũng có những giải thích khác đã được công nhận, đó là dụng cụ biến dạng dẻo bị rung động siêu âm tác dụng làm gián đoạn quá trình tiếp xúc với bề mặt tấm. Quá trình tác dụng gián đoạn này, một mặt làm giảm ma sát tiếp xúc, mặt khác cải thiện điều kiện bôi trơn trên bề mặt tiếp xúc giữa dụng cụ biến dạng và phôi. Nhờ đó, thành phần lực biến dạng theo phương ngang F_y giảm.

Dữ liệu lực F_y , F_z tương ứng với thời gian “bật/on” và “tắt/off” được tính trung bình trong mỗi hành trình khi gia công ở vùng ổn định. Dữ liệu này được sử dụng để tính toán lượng giảm thành phần lực F_y , F_z về sau.

4.4.5. Kết quả thí nghiệm so sánh

Kết quả đánh giá hiệu quả của rung động siêu âm trong việc giảm lực F_y , F_z giữa gia công ISF thông thường và gia công có rung động siêu âm trợ giúp UISF được thực hiện qua 78 thí nghiệm cho phân tích paired T-Test, trong đó 39 thí nghiệm gia công ở chế độ “tắt/off” rung động siêu âm (tương ứng là quá trình ISF thông thường) và 39 cho quá trình gia công ở chế độ bật/on (tương ứng là quá trình UISF). Trong mỗi quá trình ISF hoặc UISF, các thông số thí nghiệm mô tả trong Bảng 4.7 được nhóm nghiên cứu áp dụng. Hình 4.22a so sánh sự phân bố lực F_y trung bình trong hành trình thứ 5 khi biến dạng của tấm có độ dày 0.5mm; Hình 4.22b là kết quả so sánh khi tạo hình tấm có độ dày 1.0mm. Tương tự, Hình 4.23a so sánh sự phân bố lực F_z trung bình trong hành trình thứ 5 (hành trình có lực biến dạng lớn nhất) khi biến dạng của tấm có độ dày 0.5mm; Hình 4.23b là kết quả so sánh khi tạo hình tấm có độ dày 1.0mm.

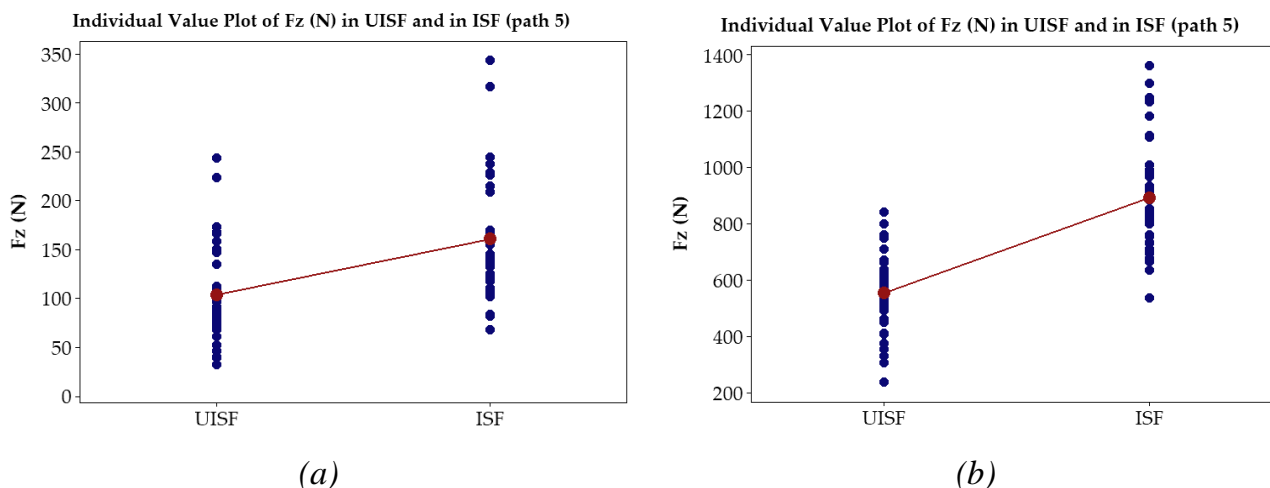


Hình 4.22. Đồ thị Paired T-Test so sánh lực biến dạng F_y giữa quá trình UISF và quá trình ISF với các tấm có chiều dày khác nhau: (a) dày 0.5mm; (b) dày 1.0mm

Bảng 4.9. Kết quả thí nghiệm so sánh Paired T-Test thành phần lực F_y

Chiều dày	Điều kiện	Mean	StDev	Difference Estimate	95% CI for μ difference	P-Value
t = 0.5mm	UISF	29.18	14.17	-22.54	(-25.52, -19.55)	0.000
	ISF	51.72	19.56			
t = 1.0mm	UISF	111.1	92.6	-90.40	(-126.5, -54.2)	0.000
	ISF	201.4	175.5			

Kết quả chỉ ra rằng trên cùng một hành trình, mức giảm lực trung bình F_y đối với tấm dày 0.5mm là 43.6%, trong khi đối với tấm dày 1.0mm là 44.8%. Tương tự, kết quả chỉ ra rằng trên cùng một hành trình, mức giảm lực trung bình F_z đối với tấm dày 0.5mm là 35.6%, trong khi đối với tấm dày 1,0mm là 38.0%. Ngoài ra, kết quả nghiên cứu ở hành trình 5 cho thấy phạm vi phân bố lực F_y , F_z trong quá trình gia công bằng UISF hẹp hơn so với quá trình gia công bằng ISF thông thường (xem chi tiết trên Hình 4.22 và Hình 4.23).



Hình 4.23. Đồ thị Paired T-Test so sánh lực biến dạng F_z giữa quá trình UISF và quá trình ISF với các tấm có chiều dày khác nhau: (a) dày 0.5mm; (b) dày 1.0mm

Bảng 4.10. Kết quả thí nghiệm so sánh Paired T-Test thành phần lực F_z

Chiều dày	Điều kiện	Mean	StDev	Difference Estimate	95% CI for μ difference	P-Value
t = 0.5mm	UISF	103.71	47.84	-56.95	(-62.15, -51.75)	0.000
	ISF	160.66	61.42			
t = 1.0mm	UISF	553.60	135.40	-338.80	(-374.10, -303.60)	0.000
	ISF	892.50	190.70			

Với tất cả các giá trị P (P-value) nhỏ hơn nhiều so với 0.05 (xem Bảng 4.9 và Bảng 4.10), có thể khẳng định rằng lực tạo hình F_y , F_z cần thiết cho quá trình gia công UISF nhỏ hơn đáng kể so với lực F_y , F_z tương ứng trong quá trình ISF. Ngoài ra, sự can thiệp thống kê với khoảng tin cậy 95%, không bao gồm bất kỳ giá trị “0” nào, với điều kiện là có sự khác biệt đáng kể giữa hai giá trị trung bình của tổng thể. Nói cách khác, lực tạo hình F_y , F_z cần thiết của quá trình UISF nhỏ hơn lực tạo hình trong ISF. Kết quả này một lần nữa khẳng định, rung động siêu âm có tác dụng giảm lực biến dạng dẻo cần thiết. Đây cũng là điều kiện để cải thiện công nghệ gia công ISF và UISF

nhằm đưa công nghệ này sát với thực tiễn hơn.

4.4.6. Đánh giá ảnh hưởng của thông số công nghệ đến lượng giảm F_y , F_z

Để đánh giá hiệu của rung động siêu âm trợ giúp quá trình ISF, nhóm nghiên cứu thống kê lượng giảm lực F_y , F_z ở mỗi hành trình (RFy_i và RFz_i) dụng cụ tiên theo phương dọc trục một lượng Δz , sau đó chuyển động theo phương ngang với tốc độ f . Cách thống kê, xác định RFy_i và RFz_i tại mỗi hành trình được tính toán như sau:

$$RFy_i (\%) = \frac{F_{y_{ISF}} - F_{y_{UISF}}}{F_{y_{ISF}}} * 100\% \tag{4.1a}$$

$$RFz_i (\%) = \frac{F_{z_{ISF}} - F_{z_{UISF}}}{F_{z_{ISF}}} * 100\% \tag{4.1b}$$

Trong đó, $F_{y_{ISF}}$ và $F_{z_{ISF}}$ lần lượt là lực tạo hình cần thiết theo phương ngang và phương thẳng đứng khi gia công bằng ISF thông thường trong mỗi hành trình; $F_{y_{UISF}}$ và $F_{z_{UISF}}$ lần lượt là lực tạo hình cần thiết theo phương ngang và phương thẳng đứng khi gia công bằng UISF có rung động siêu âm trợ giúp trong mỗi hành trình. Lưu ý rằng, các thành phần lực tạo hình cần thiết được xác định ở vùng biên dạng ổn định trên mỗi hành trình (nghĩa là, không xác định ở đầu hoặc cuối của mỗi hành trình, nơi các thành phần lực này đạt giá trị cực đại). Mức trung bình cả năm hành trình được tính toán như sau:

$$RFy (\%) = \frac{RFy_1 (\%) + RFy_2 (\%) + RFy_3 (\%) + RFy_4 (\%) + RFy_5 (\%)}{5} \tag{4.2a}$$

$$RFz (\%) = \frac{RFz_1 (\%) + RFz_2 (\%) + RFz_3 (\%) + RFz_4 (\%) + RFz_5 (\%)}{5} \tag{4.2b}$$

Mỗi thí nghiệm như mô tả trên Hình 4.19 được lặp lại 05 lần. Kết quả thống kê được trình bày trên lần lượt trên Bảng 4.11 (đối với RFy) và Bảng 4.12 (đối với RFz).

Bảng 4.11. Kết quả thống kê 2 mức thí nghiệm đối với RFy

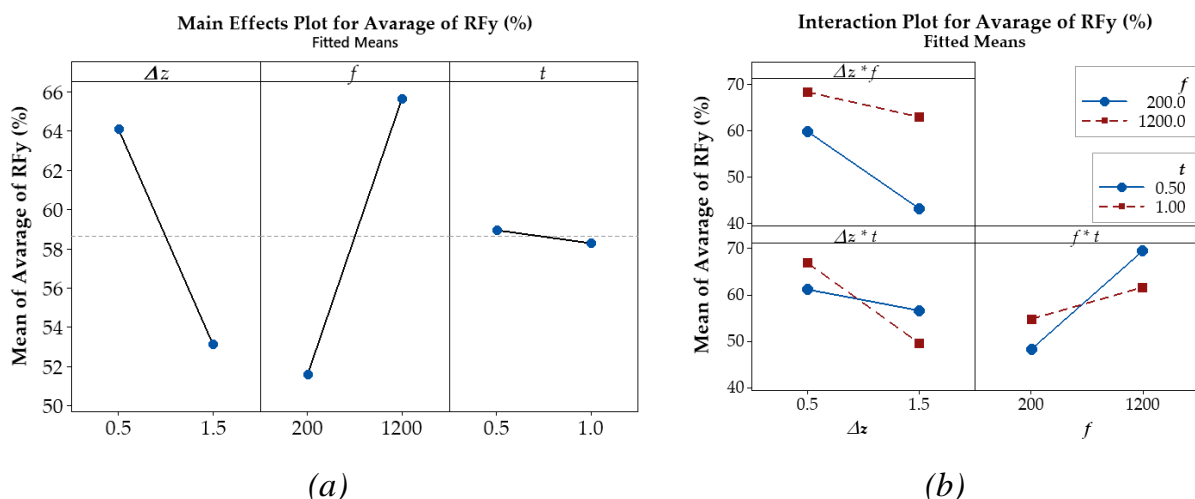
StdOrder	RunOrder	Δz	f	t	RFy trung bình (%)					
					HT1	HT 2	HT 3	HT 4	HT 5	RFy
5	1	0.5	200	1.0	64.7	66.2	65.2	63.6	61.7	64.5
3	2	0.5	1200	0.5	73.9	69.6	67.4	62.8	64.5	67.3
4	3	1.5	1200	0.5	81.5	74.2	72.0	64.5	64.5	71.9
8	4	1.5	1200	1.0	63.6	53.2	55.6	53.4	44.8	54.0

StdOrder	RunOrder	Δz	f	t	RFy trung bình (%)					
					HT1	HT 2	HT 3	HT 4	HT 5	RFy
6	5	1.5	200	1.0	58.9	51.6	48.3	39.7	37.1	45.1
7	6	0.5	1200	1.0	61.3	66.1	71.7	61.4	65.2	69.4
1	7	0.5	200	0.5	65.4	55.2	44.4	58.7	52.2	55.2
2	8	1.5	200	0.5	76.3	60.9	45.2	38.4	37.4	41.4

Bảng 4.12. Kết quả thống kê 2 mức thí nghiệm đối với RFz

StdOrder	RunOrder	Δz	f	t	RFz trung bình (%)					
					HT1	HT 2	HT 3	HT 4	HT 5	RFz
5	1	0.5	200	1.0	50.8	50.7	44.0	31.1	33.6	42.0
3	2	0.5	1200	0.5	70.8	70.1	63.0	60.2	61.8	65.2
4	3	1.5	1200	0.5	60.6	48.9	52.2	39.5	30.1	46.2
8	4	1.5	1200	1.0	38.9	40.7	44.4	44.2	49.4	43.5
6	5	1.5	200	1.0	36.5	45.2	48.4	30.4	38.4	39.8
7	6	0.5	1200	1.0	58.2	60.3	62.5	60.1	56.0	59.4
1	7	0.5	200	0.5	59.8	66.3	54.2	35.2	36.7	50.4
2	8	1.5	200	0.5	60.0	48.5	44.2	37.0	29.1	43.7

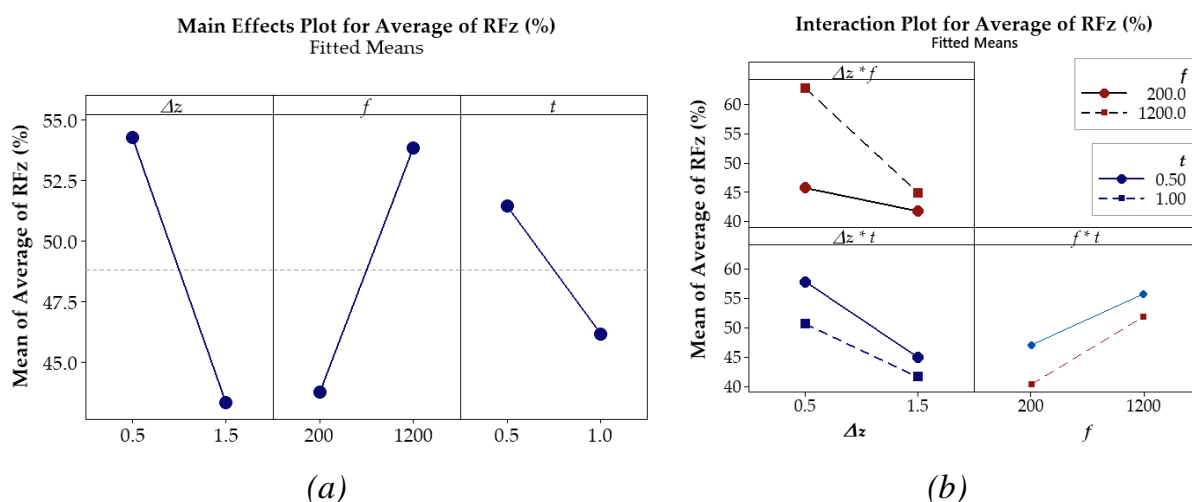
Đồ thị ảnh hưởng và ảnh hưởng tương tác của các thông số khảo sát đến RFy và RFz được trình bày như trên Hình 4.24 và Hình 4.25.



Hình 4.24. Đồ thị ảnh hưởng (a) và ảnh hưởng tương tác (b) của các tham số đến lượng giảm lực biến dạng Fy nhờ rung động siêu âm trợ giúp quá trình ISF

Kết quả Hình 4.24a cho thấy, tốc độ tiến dụng cụ theo phương ngang f là tham số có ảnh hưởng lớn nhất đến lượng giảm lực RFy. Khi tốc độ tiến dụng cụ f càng lớn, tỉ

lệ giảm lực RFy càng lớn. Điều này nghĩa là, hiệu quả của rung động siêu âm tăng khi tăng tốc độ tiến dụng cụ biến dạng. Ngược lại, bước tiến dụng cụ biến dạng theo phương dọc trục Δz tăng thì lượng giảm lực biến dạng RFy có xu hướng giảm. Nghĩa là, càng tăng Δz (với mục đích giảm thời gian tạo hình) thì hiệu quả của rung động siêu âm đến lượng giảm lực RFy càng thấp. Ảnh hưởng tương tự đối với RFy cũng được phát hiện khi tăng chiều dày tấm, nhưng mức độ nhỏ hơn. Ngoài ra, trên Hình 4.24b, đồ thị ảnh hưởng tương tác của cả ba cặp tham số đầu vào đều cắt nhau hoặc có xu hướng cắt nhau, nghĩa là tương tác giữa chúng có ảnh hưởng mạnh đến giảm lực biến dạng dẻo RFy .

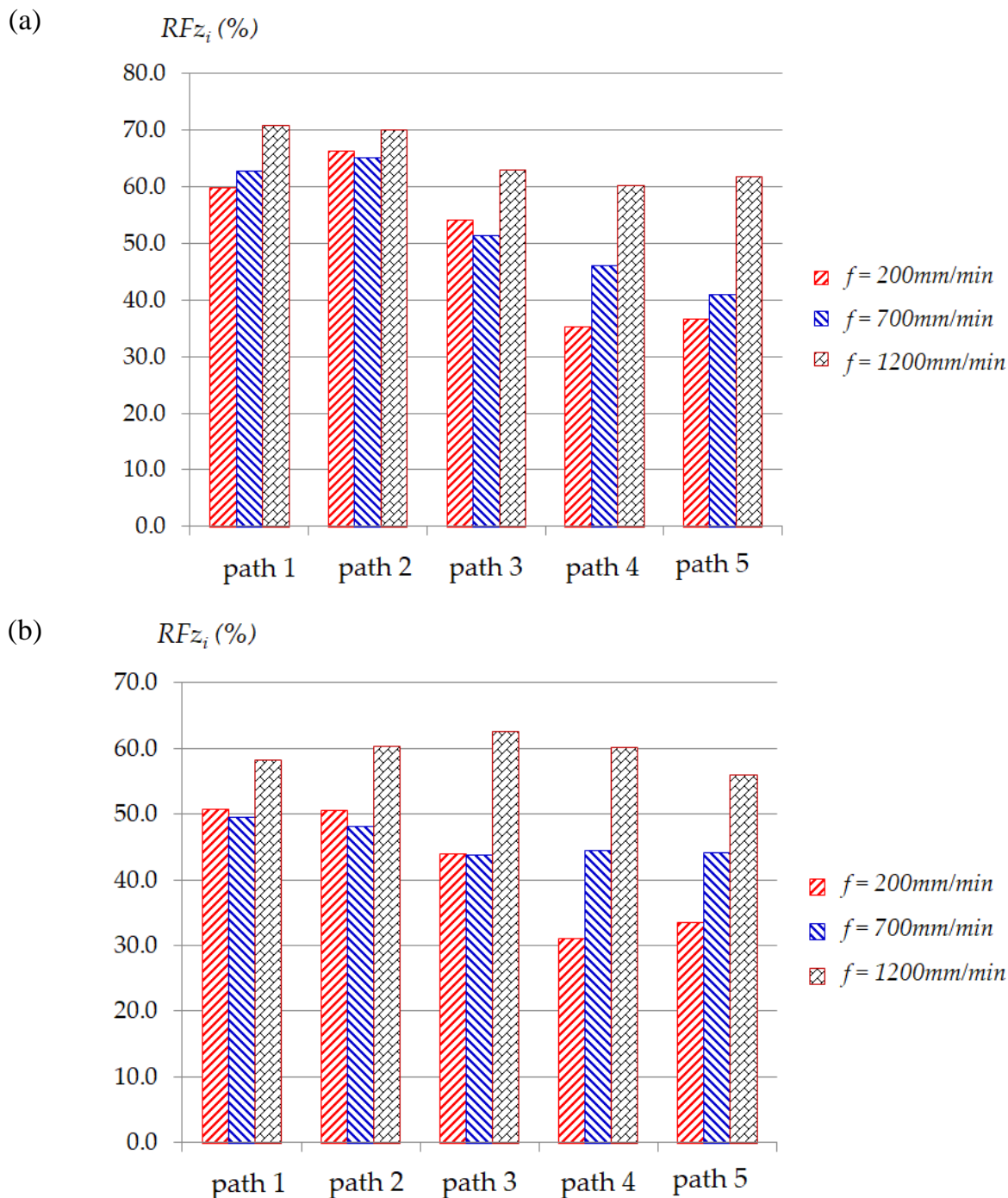


Hình 4.25. Đồ thị ảnh hưởng (a) và ảnh hưởng tương tác (b) của các tham số đến lượng giảm lực biến dạng Fz nhờ rung động siêu âm trợ giúp quá trình ISF

Đối với lượng giảm RFz , kết quả Hình 4.25a cho thấy, bước tiến dụng cụ theo phương dọc Δz trục có ảnh hưởng mạnh nhất. Càng tăng Δz thì lượng giảm RFz nhận được càng thấp. Xu hướng tương tự cũng nhận được đối với chiều dày tấm t . Tuy nhiên, ảnh hưởng của việc tăng chiều dày tấm t đến mức giảm RFz nhỏ hơn. Ngược lại, tốc độ tiến dụng cụ theo phương ngang f là tham số có ảnh hưởng lớn đến lượng giảm lực RFz , càng tăng f thì lượng giảm RFz nhận được càng lớn. Điều này nghĩa là, hiệu quả của rung động siêu âm tăng khi tăng tốc độ tiến dụng cụ biến dạng. Bên cạnh đó, kết quả Hình 4.25b cho thấy ảnh hưởng tương tác giữa các cặp tham số. Cả ba cặp tham số đầu vào đều có xu hướng cắt nhau, nghĩa là tương tác giữa chúng có ảnh hưởng đáng kể đến giảm lực biến dạng dẻo RFz . Trong đó, dễ dàng nhận thấy, ảnh hưởng tương tác giữa Δz và f đến lượng giảm RFz là lớn nhất.

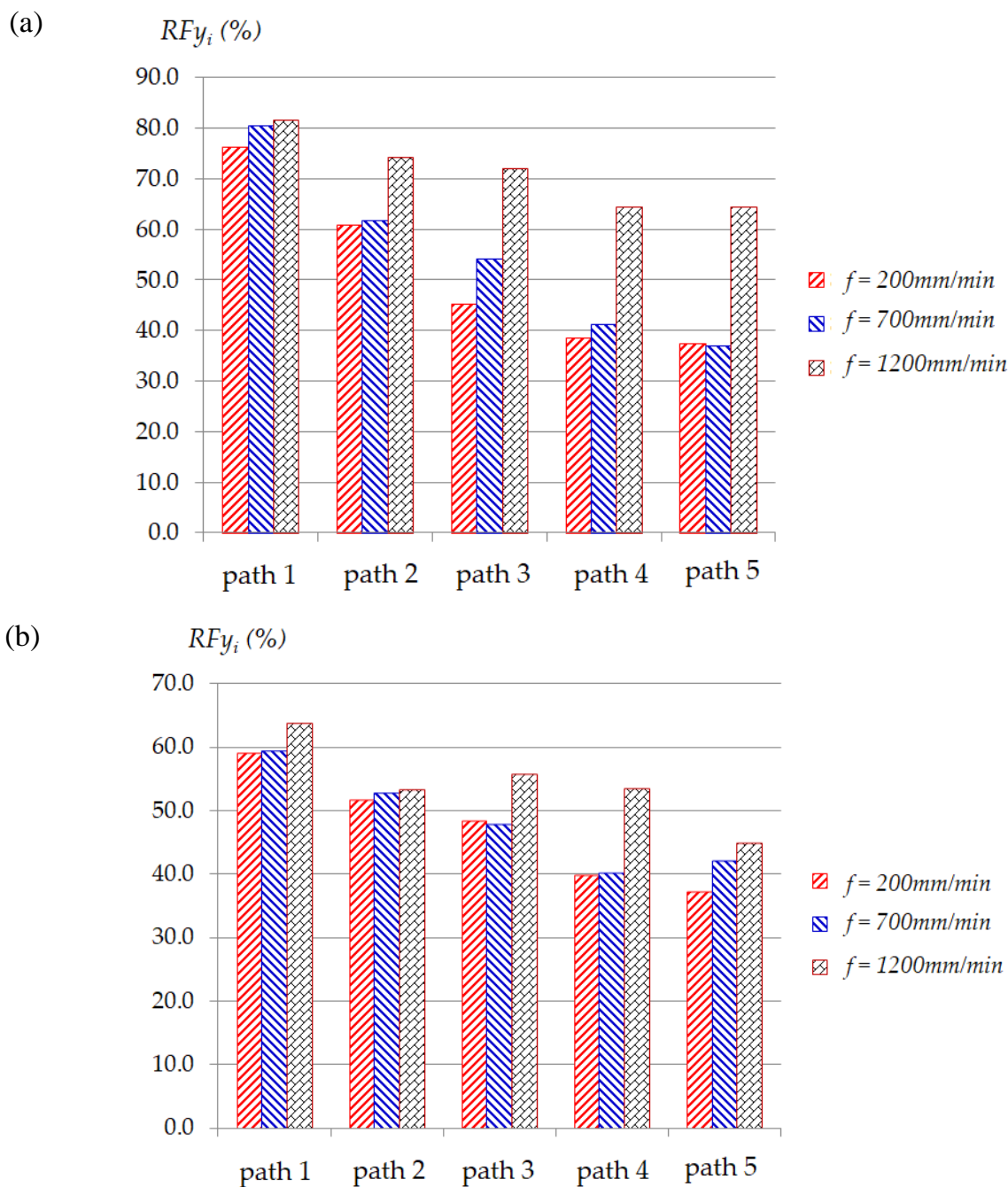
Hình 4.26 và Hình 4.27 cung cấp một góc nhìn khác, trực quan về lượng giảm

các thành phần lực RFz_i và RFy_i trên mỗi hành trình tạo hình của dụng cụ. Dễ dàng nhận thấy, tốc độ tiến dụng cụ biến dạng f càng lớn thì cả RFz_i và RFy_i trên mỗi hành trình đều lớn hơn so với tốc độ nhỏ. Kết quả này cũng cho thấy, khi tốc độ tiến dụng cụ biến dạng f lớn thì chiều dày t ảnh hưởng khá ít đến lượng giảm lực trung bình ở mỗi hành trình tạo hình.



Hình 4.26. Dữ liệu thống kê RFz_i (%) trong năm hành trình ở các điều kiện tạo hình:

(a) $t = 0.5\text{mm}$, $\Delta z = 0.5\text{mm}$; (b) $t = 1.0\text{mm}$, $\Delta z = 0.5\text{mm}$.



Hình 4.27. Dữ liệu thống kê RFy_i (%) trong năm hành trình ở các điều kiện tạo hình:

(a) $t = 0.5\text{mm}$, $\Delta z = 1.5\text{mm}$; (b) $t = 1.0\text{mm}$, $\Delta z = 1.5\text{mm}$

Từ các kết quả khảo sát trên đây, trong đề tài này, hai tham số Δz và f , vừa là các tham số có ảnh hưởng mạnh nhất, vừa có ảnh hưởng tương tác khá mạnh đến cả lượng giảm lực biến dạng dẻo theo phương ngang RFy và theo phương thẳng đứng RFz . Do đó, chúng sẽ được sử dụng để xây dựng bài toán tối ưu nhằm nhận được lượng giảm lực biến dạng dẻo lớn nhất, nghĩa là phát huy được hiệu quả cao nhất của rung động siêu âm. Quá trình thí nghiệm tối ưu sẽ được thực hiện riêng rẽ cho hai chiều dày tấm khác nhau và sẽ được trình bày ở mục 4.4.7 phía sau.

4.4.7. Kết quả tối ưu

Các thí nghiệm tối ưu để chọn tham số thích hợp cho quá trình tạo hình bằng phương pháp UISF được thực hiện theo phương pháp CCD, bao gồm bốn thí nghiệm ở đỉnh hình lập phương, năm thí nghiệm ở tâm trong khối lập phương và bốn thí nghiệm trên trục. Kết quả xác định lượng giảm thành phần lực F_y trung bình (RF_y , %) trong 05 hành trình tạo hình bằng UISF so với tạo hình bằng ISF thông thường lần lượt được thể hiện trong Bảng 4.13 cho chiều dày tấm 0.5mm và Bảng 4.14 cho chiều dày tấm 1.0mm. Tương tự, lượng giảm thành phần lực F_z trung bình (RF_z , %) trong 05 hành trình tạo hình bằng UISF so với tạo hình bằng phương pháp ISF thông thường được thể hiện lần lượt trong Bảng 4.15 cho chiều dày tấm 0.5mm và Bảng 4.16 cho chiều dày tấm 1.0mm. Lượng giảm trung bình cả 5 hành trình tạo hình đối với thành phần lực biến dạng F_y (RF_y , %) và thành phần lực F_z (RF_z , %) khi so sánh giữa gia công bằng UISF với gia công bằng ISF được trình bày trong Bảng 4.17.

Bảng 4.13. Kết quả thí nghiệm xác định lượng giảm thành phần lực F_y (RF_y , %) khi tạo hình bằng UISF so với tạo hình bằng ISF với chiều dày tấm $t = 0.5\text{mm}$

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Δz	f	Lượng giảm F_y (RF_y , %)				
						HT 1	HT 2	HT 3	HT 4	HT 5
8	1	-1	1	1.0	1200	66.4	61.3	58.0	58.2	63.3
7	2	-1	1	1.0	200	61.1	61.5	46.3	47.4	37.5
9	3	0	1	1.0	700	57.5	60.3	44.0	48.0	40.2
3	4	1	1	0.5	1200	73.9	69.6	67.4	62.8	64.5
1	5	1	1	0.5	200	65.4	55.2	44.4	58.7	52.2
11	6	0	1	1.0	700	57.3	62.4	42.3	46.1	41.8
5	7	-1	1	0.5	700	72.4	65.3	57.5	61.6	66.7
10	8	0	1	1.0	700	57.8	58.8	43.3	50.4	41.8
12	9	0	1	1.0	700	57.6	57.8	44.8	48.3	41.5
2	10	1	1	1.5	200	76.3	60.9	45.2	38.4	37.4
13	11	0	1	1.0	700	58.2	57.8	46.8	48.2	41.0
4	12	1	1	1.5	1200	81.5	74.2	72.0	64.5	64.5
6	13	-1	1	1.5	700	80.6	61.8	54.1	41.3	37.0

Dữ liệu thí nghiệm, như trình bày trên Bảng 4.13, Bảng 4.14, Bảng 4.15 và Bảng

4.16 cho thấy, khi dụng cụ biến dạng tiến theo phương dọc trục một lượng Δz và di chuyển theo phương ngang ở một hành trình mới, đối với hầu hết các mức thí nghiệm, lượng giảm của thành phần lực F_y và F_z đều có xu hướng giảm. Điều này có thể giải thích do khi tăng chiều sâu tạo hình, sự hóa bền của vật liệu làm thành phần lực biến dạng tăng (xem Hình 4.20), do mức công suất siêu âm đã thiết lập cố định, nên hiệu quả giảm các thành phần lực tạo hình của rung động siêu âm giảm xuống. Kết quả cũng cho thấy, khi tốc độ tiến dụng cụ f càng lớn thì hiệu quả giảm các thành phần lực biến dạng F_y và F_z đều tăng. Điều này được giải thích bởi, rung nhiệt do ma sát tiếp xúc giữa dụng cụ biến dạng dẻo và bề mặt tấm tăng, do đó hiệu quả biến mềm cũng lớn hơn. Nghĩa là, vật liệu mềm hơn giúp cho hiệu quả của rung động siêu âm được cải thiện đáng kể.

Bảng 4.14. Kết quả thí nghiệm xác định lượng giảm thành phần lực F_y (RFy, %) khi tạo hình bằng UISF so với tạo hình bằng ISF với chiều dày tấm $t = 1.0\text{mm}$

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Δz	f	Lượng giảm F_y (RFy, %)				
						HT 1	HT 2	HT 3	HT 4	HT 5
8	1	-1	1	1.0	1200	68.6	57.9	65.1	58.1	53.3
7	2	-1	1	1.0	200	59.9	56.8	53.6	50.1	45.9
9	3	0	1	1.0	700	62.5	56.5	57.1	49.6	42.6
3	4	1	1	0.5	1200	61.3	66.1	71.7	61.4	65.2
1	5	1	1	0.5	200	64.7	66.2	65.2	63.6	61.7
11	6	0	1	1.0	700	61.0	55.6	58.4	48.9	40.5
5	7	-1	1	0.5	700	58.7	64.6	65.9	63.2	62.8
10	8	0	1	1.0	700	62.7	56.3	58.6	49.1	42.8
12	9	0	1	1.0	700	61.2	54.4	58.2	48.8	43.6
2	10	1	1	1.5	200	58.9	51.6	48.3	39.7	37.1
13	11	0	1	1.0	700	61.7	56.1	60.0	51.0	44.7
4	12	1	1	1.5	1200	63.6	53.2	55.6	53.4	44.8
6	13	-1	1	1.5	700	59.2	52.7	47.8	40.2	42.0

Bảng 4.15. Kết quả thí nghiệm xác định lượng giảm thành phần lực Fz (RFy, %) khi tạo hình bằng UISF so với tạo hình bằng ISF với chiều dày tấm t = 0.5mm

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Δz (mm)	f (mm/ph)	Lượng giảm Fz (RFz, %)				
						HT 1	HT 2	HT 3	HT 4	HT 5
8	1	-1	1	1.0	1200	50.8	51.9	46.5	45.2	37.4
7	2	-1	1	1.0	200	49.9	46.0	43.4	31.2	36.6
9	3	0	1	1.0	700	50.4	46.6	36.6	34.8	35.8
3	4	1	1	0.5	1200	70.8	70.1	63.0	60.2	61.8
1	5	1	1	0.5	200	59.8	66.3	54.2	35.2	36.7
11	6	0	1	1.0	700	49.5	46.2	36.5	33.4	35.4
5	7	-1	1	0.5	700	62.9	65.2	51.3	46.2	41.0
10	8	0	1	1.0	700	50.3	46.9	37.3	32.3	37.3
12	9	0	1	1.0	700	50.4	46.3	36.8	31.1	35.4
2	10	1	1	1.5	200	60.0	48.5	44.2	37.0	29.1
13	11	0	1	1.0	700	50.6	46.5	36.6	30.8	35.9
4	12	1	1	1.5	1200	60.6	48.9	52.2	39.5	30.1
6	13	-1	1	1.5	700	55.7	47.8	47.5	36.5	29.3

Bảng 4.16. Kết quả thí nghiệm xác định lượng giảm thành phần lực Fz (RFy, %) khi tạo hình bằng UISF so với tạo hình bằng ISF với chiều dày tấm t = 1.0mm

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Δz (mm)	f (mm/ph)	Lượng giảm Fz (RFz, %)				
						HT 1	HT 2	HT 3	HT 4	HT 5
8	1	-1	1	1.0	1200	50.6	47.2	43.7	41.1	50.5
7	2	-1	1	1.0	200	40.7	42.5	42.2	35.7	31.6
9	3	0	1	1.0	700	43.5	42.2	40.6	35.6	30.9
3	4	1	1	0.5	1200	58.2	60.3	62.5	60.1	56.0
1	5	1	1	0.5	200	50.8	50.7	44.0	31.1	33.6
11	6	0	1	1.0	700	44.6	41.9	41.1	38.8	28.0
5	7	-1	1	0.5	700	49.5	48.2	43.8	44.4	44.2
10	8	0	1	1.0	700	43.7	42.3	43.3	38.6	26.4
12	9	0	1	1.0	700	42.4	40.6	40.2	40.5	29.2
2	10	1	1	1.5	200	36.5	45.2	48.4	30.4	38.4

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Δz (mm)	f (mm/ph)	Lượng giảm Fz (RFz, %)				
						HT 1	HT 2	HT 3	HT 4	HT 5
13	11	0	1	1.0	700	44.0	40.7	34.1	38.6	35.3
4	12	1	1	1.5	1200	38.9	40.7	44.4	44.2	49.4
6	13	-1	1	1.5	700	38.7	38.4	40.8	35.8	40.0

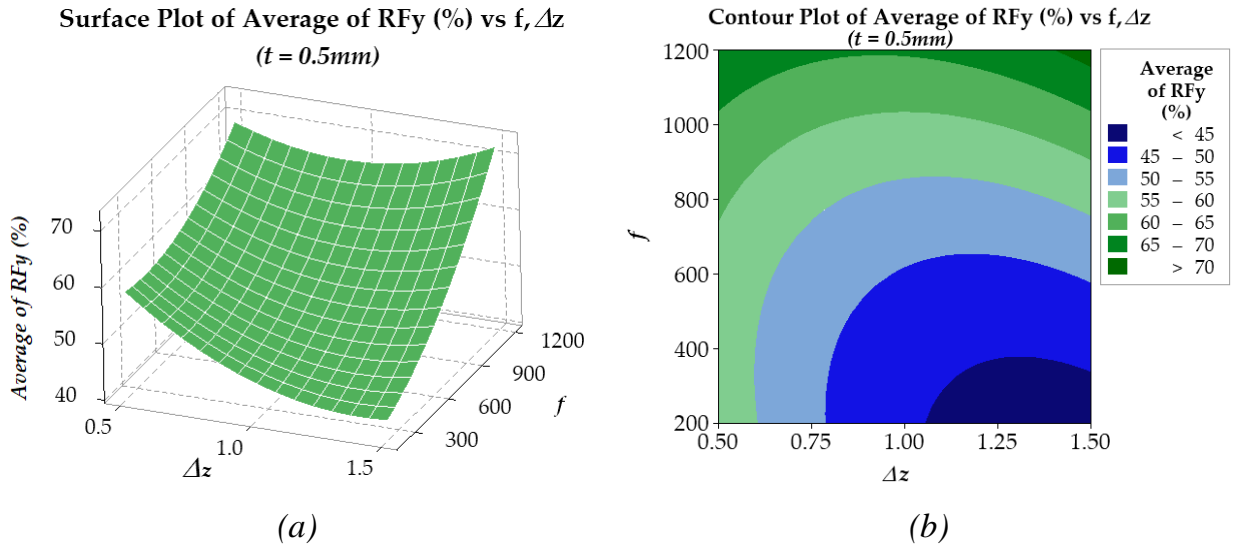
Bảng 4.17. Kết quả thí nghiệm lượng giảm RFy (%), RFz (%) trung bình của 5 hành trình

Std Order	Run Order	Pt Type	Blocks	Δz (mm)	f (mm/ph)	Trung bình 5 hành trình			
						RFy (%)		RFz (%)	
						t = 0.5mm	t = 1.0mm	t = 0.5mm	t = 1.0mm
8	1	-1	1	1.0	1200	67.4	60.6	46.4	46.6
7	2	-1	1	1.0	200	50.8	53.3	41.4	38.5
9	3	0	1	1.0	700	50.0	53.7	40.8	38.6
3	4	1	1	0.5	1200	67.3	69.4	65.2	59.4
1	5	1	1	0.5	200	55.2	64.5	50.4	42.0
11	6	0	1	1.0	700	50.0	52.9	40.2	38.9
5	7	-1	1	0.5	700	64.7	63.0	53.3	46.0
10	8	0	1	1.0	700	50.4	53.9	40.8	38.9
12	9	0	1	1.0	700	50.0	53.3	40.0	38.6
2	10	1	1	1.5	200	41.4	45.1	43.7	39.8
13	11	0	1	1.0	700	50.4	54.7	40.1	38.5
4	12	1	1	1.5	1200	71.9	54.0	46.2	43.5
6	13	-1	1	1.5	700	55.0	48.4	43.4	38.7

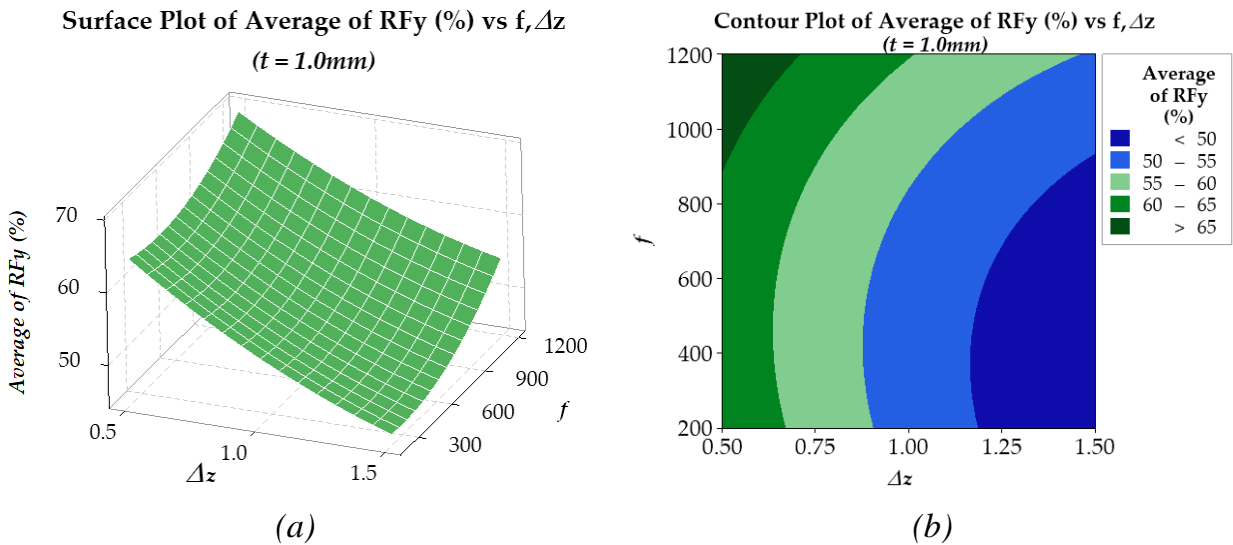
Kết quả phân tích bề mặt chỉ tiêu đối với lượng giảm thành phần lực RFy (%) được trình bày trên Hình 4.28 và Hình 4.29, lần lượt cho hai chiều dày tấm là 0.5mm và 1.0mm riêng biệt. Trong đó, mô hình hồi quy cho tấm có chiều dày 0.5mm (xem Hình 4.28) có R-sq là 91.77% (với R-sq(adj) là 85.88%). Với tấm có chiều dày 1.0mm (xem Hình 4.29), mô hình hồi quy có R-sq là 99.12% (với R-sq(adj) là 98.49%).

Tương tự, kết quả phân tích bề mặt chỉ tiêu đối với lượng giảm thành phần lực RFz (%) được trình bày trên Hình 4.30 và Hình 4.31, lần lượt cho hai chiều dày tấm là 0.5mm và 1.0mm riêng biệt. Trong đó, mô hình hồi quy RFz (%) cho tấm có chiều dày

0.5mm (xem Hình 4.30) có R-sq là 98.73% (với R-sq(adj) là 97.82%). Với tấm có chiều dày 1.0mm (xem Hình 4.31), mô hình hồi quy có R-sq là 99.23% (với R-sq(adj) là 98.68%). Các kết quả này cho thấy, mô hình bề mặt chỉ tiêu hoàn toàn phù hợp với dữ liệu thí nghiệm, đồng thời khẳng định kết quả thí nghiệm có độ tin cậy cao.



Hình 4.28. Đồ thị bề mặt (a) và contour (b) lượng giảm RFy (%) của tấm dày 0.5mm



Hình 4.29. Đồ thị bề mặt (a) và contour (b) lượng giảm RFy (%) của tấm dày 1.0mm

Kết quả tối ưu hóa nhận được phương trình hồi quy mức giảm lực biến dạng trung bình theo phương dọc trục RFz (%) đối với tấm có chiều dày 0.5mm theo các tham số đầu vào là:

$$RFz_{opt} (\%) = 75.95 - 65.13 z + 0.00119 f + 30.91 z*z + 0.000013 f*f - 0.01223 z*f \quad (4.3a)$$

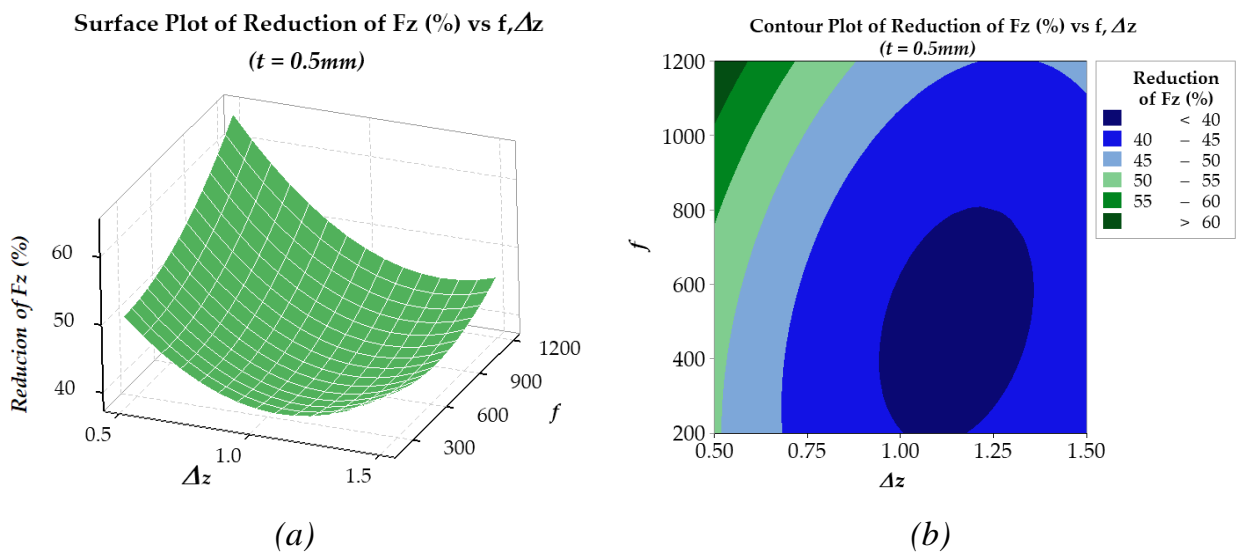
Trong khi đó, với tấm có chiều dày 1.0mm, phương trình hồi quy mức giảm lực biến dạng trung bình RFz (%) theo các tham số đầu vào là:

$$RFz_{opt} (\%) = 52.95 - 28.13 z + 0.00183 f + 14.61 z*z + 0.000015 f*f - 0.01368 z*f \quad (4.3b)$$

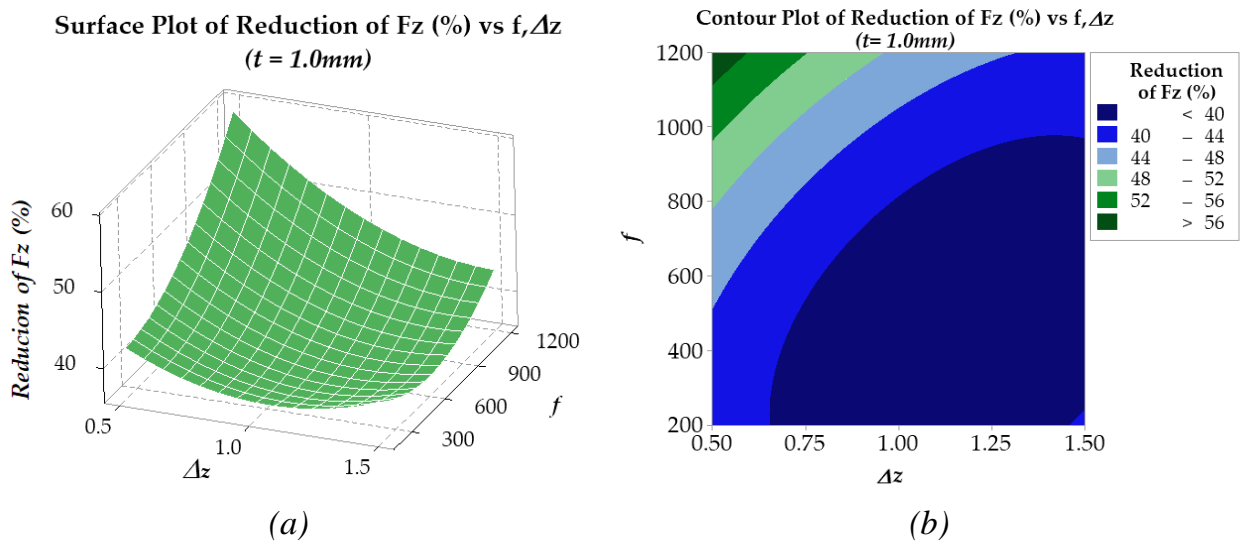
Đối với thành phần lực Fy , mức độ giảm lực trung bình sau 5 hành trình biến dạng dạng $RFy_{opt} (\%)$, tương ứng với chiều dày tấm 0.5mm và 1.0mm lần lượt là:

$$RFy_{opt} (\%) = 84.91 - 58.8 z - 0.0222 f + 19.78 z*z + 0.000017 f*f + 0.01850 z*f \quad (4.4a)$$

$$RFy_{opt} (\%) = 80.68 - 32.89 z - 0.01336 f + 6.80 z*z + 0.000012 f*f + 0.00399 z*f \quad (4.4b)$$



Hình 4.30. Đồ thị bề mặt (a) và contour (b) lượng giảm $RFz (\%)$ của tấm dày 0.5mm



Hình 4.31. Đồ thị bề mặt (a) và contour (b) lượng giảm $RFz (\%)$ của tấm dày 1.0mm

Kết quả giải bài toán tối ưu được trình bày lần lượt trên Bảng 4.18 đối với thành phần lực Fz và Bảng 4.19 đối với thành phần lực Fy . Vì ở đây là hàm tối đa hóa mục

tiêu, nên giá trị mục tiêu (target) được lựa chọn lớn hơn đại lượng RF_z và RF_y đã được xác định trong quá trình thí nghiệm, với các chiều dày tấm tương ứng (xem thêm Bảng 4.17).

Bảng 4.18. Kết quả lời giải tối ưu đối với mức giảm thành phần lực RF_z (%)

Chiều dày	z (mm)	f (mm/ph)	RF_z (%)	Target (%)	Composite Desirability
$t = 0.5\text{mm}$	0.5	1200	64.1695	66.0	0.929538
$t = 1.0\text{mm}$	0.5	1200	58.7272	60.0	0.940716

Bảng 4.19. Kết quả lời giải tối ưu đối với mức giảm thành phần lực RF_y (%)

Chiều dày	z (mm)	f (mm/ph)	RF_y (%)	Target (%)	Composite Desirability
$t = 0.5\text{mm}$	1.5	1200	71.9874	75.0	0.910365
$t = 1.0\text{mm}$	0.5	1200	69.1703	70.0	0.966621

Để dàng nhận thấy, để nhận được mức độ giảm lực F_z lớn nhất, lời giải phù hợp nhất cho hai chiều dày tấm đều là bước tiến theo phương dọc trục $\Delta z = 0.5\text{mm}$ và tốc độ tiến dụng cụ theo phương ngang là 1200mm/ph . Với các nghiệm này, lượng giảm $RF_{z_{opt}}$ (%) nhận được là 58.73% đối với tấm dày 1.0mm và đạt đến 64.17% đối với tấm có chiều dày 0.5mm . Giả thiết rằng, nếu đặt mục tiêu giảm lực theo phương dọc trục (RF_z) đến 65.0% , thì các mô hình này có mức độ phù hợp lên đến gần 92.95% khi chiều dày tấm là 0.5mm ; và mức độ phù hợp đến 94.07% khi chiều dày tấm là 1.0mm .

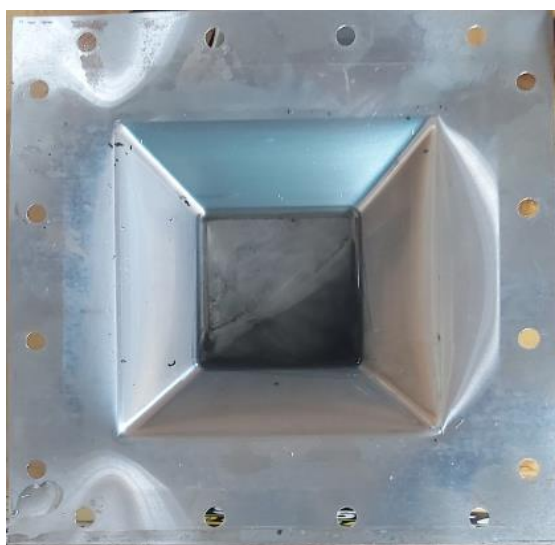
Tương tự thành phần lực F_z , mức độ giảm RF_y lớn nhất có lời giải cho hai chiều dày tấm, lần lượt là: khi chiều dày tấm là 0.5mm , lời giải phù hợp nhất là bước tiến theo phương dọc trục $\Delta z = 1.5\text{mm}$ và tốc độ tiến dụng cụ theo phương ngang là 1200mm/ph ; đối với chiều dày tấm là 1.0mm , lời giải phù hợp nhất để nhận được RF_y lớn nhất là bước tiến theo phương dọc trục $\Delta z = 0.5\text{mm}$ và tốc độ tiến dụng cụ theo phương ngang là 1200mm/ph . Với các nghiệm này, lượng giảm $RF_{y_{opt}}$ (%) nhận được là gần 71.99% đối với tấm dày 0.5mm và 69.17% đối với tấm có chiều dày 1.0mm . Giả thiết rằng, nếu đặt mục tiêu giảm lực theo phương dọc trục (RF_z) đến 75.0% cho chiều dày tấm 0.5mm và 70.0% cho chiều dày tấm 1.0mm thì các mô hình này có mức độ phù hợp lên đến hơn 91.03% khi chiều dày tấm là 0.5mm ; và mức độ phù hợp đến 96.66% khi chiều dày tấm là 1.0mm .

4.5. Đánh giá chất lượng sản phẩm sau khi tạo hình bằng phương pháp UISF

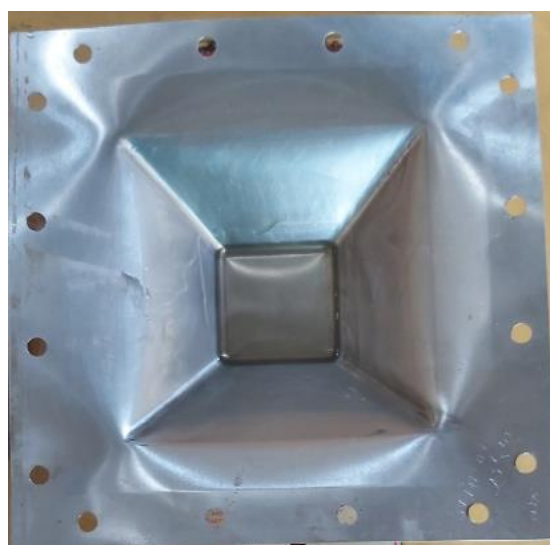
Chất lượng sản phẩm sau tạo hình được đánh giá thông qua sai lệch về hình dạng hình học, kích thước của sản phẩm nhận được sau khi tạo hình (phần biên dạng tạo hình) so với biên dạng đỉnh dụng cụ theo CNC đã được thiết kế. Quá trình được thực hiện theo các thông số như trong Bảng 4.6, đã giới thiệu ở trên mục 4.3.1, với bộ tham số tối ưu cho hai chiều dày tấm, đã được xác định trên mục 4.4.7.

4.5.1. Kết quả thực nghiệm gia công một số sản phẩm điển hình

Trước tiên có thể thấy rõ ảnh hưởng của kiểu quỹ đạo chuyển động dụng cụ biên dạng dẻo đối với chất lượng tạo hình sản phẩm. Với kiểu tạo hình chạy theo đường contour nằm ngang tạo nên sản phẩm hình kim tự tháp cắt, dễ dàng nhận thấy sự uốn cong khá rõ rệt trên khu vực chuyển tiếp xúc giữa mặt bích (phần không tiếp xúc với dụng cụ biên dạng dẻo) với phần được gia công, như Hình 4.32 và Hình 4.33. Đồng thời với hiện tượng uốn, dễ dàng thấy các vùng bị cong trên phần mặt bích (phần chuyển tiếp giữa biên dạng được tạo hình và phần kẹp chặt) của sản phẩm. Về bản chất, đây là vùng chịu ứng suất phẳng, gồm ứng suất nén (tác dụng theo phương tiếp tuyến/hoặc chu vi) và ứng suất kéo (tác dụng theo phương hướng kính). Khi đang biến dạng, dưới tác dụng của ứng suất kéo của dụng cụ biên dạng cũng như vai trò của bộ gá kẹp phôi mà mặt bích tấm vẫn phẳng. Tuy nhiên, khi kết thúc tạo hình, do ứng suất dư tác dụng trên chiều dày tấm khá mỏng nên sự đàn hồi ngược làm cho phần mặt bích bị uốn cong, tạo nên các nếp uốn cong khá rõ ràng.



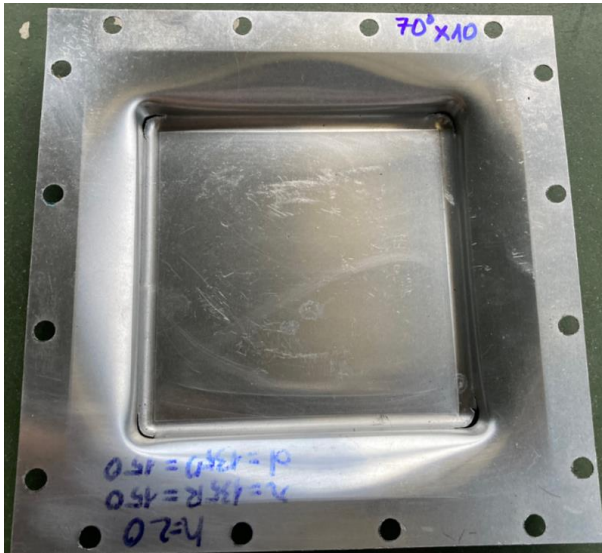
(a) $\phi = 45^\circ$; $h = 40\text{mm}$



(b) $\phi = 45^\circ$; $h = 50\text{mm}$

Hình 4.32. Ảnh chụp sản phẩm sau khi tạo hình bằng UISF theo quỹ đạo hình vuông (sản phẩm dạng kim tự tháp cắt): chiều dày tấm $t = 0.5\text{mm}$ và bước tiến $\Delta z = 0.5\text{mm}$

Đồng thời, kết quả cũng cho thấy, góc tạo hình/góc thành tường ảnh hưởng lớn đến khả năng tạo hình sản phẩm. Khi góc thành tường nhỏ (dưới 55°), sản phẩm hầu như không bị rách trong quá trình biến dạng. Tuy nhiên, khi tăng góc tạo hình/thành tường lên 60° hoặc 70° , hầu hết sản phẩm bị rách khi chiều sâu tạo hình đạt từ 20mm trở lên. Nguyên nhân rách sản phẩm có thể là do quá trình gia công có siêu âm trợ giúp, xảy ra va đập mạnh giữa tấm và dụng cụ biến dạng.

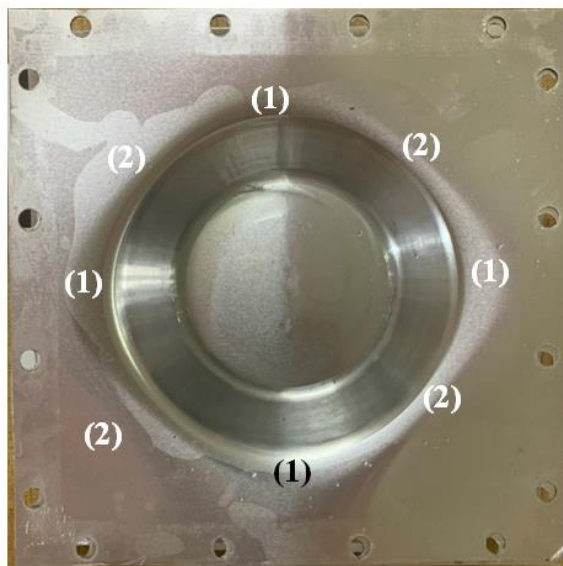


(a) $\phi = 70^\circ$; $t = 1.0\text{mm}$

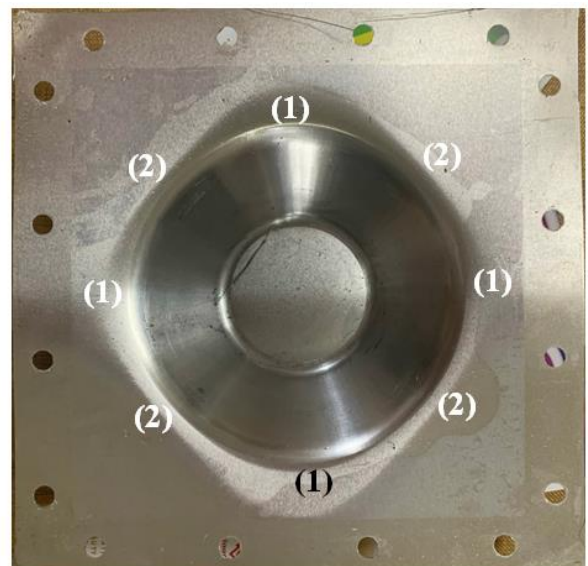


(b) $\phi = 60^\circ$; $t = 0.5\text{mm}$

Hình 4.33. Ảnh chụp sản phẩm sau khi tạo hình bằng UISF theo quỹ đạo hình vuông (sản phẩm dạng kim tự tháp cắt) với bước tiến $\Delta z = 0.5\text{mm}$



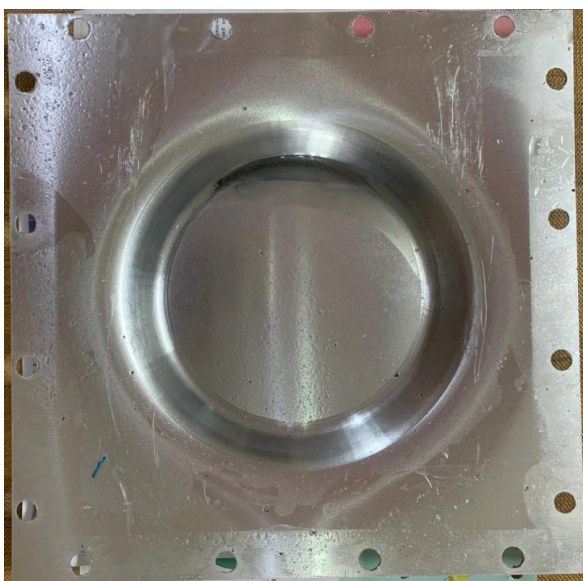
(a) $\phi = 45^\circ$; $h = 30\text{mm}$



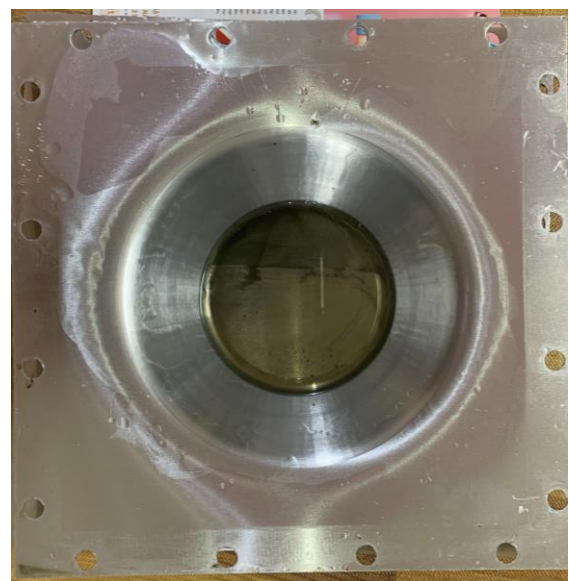
(b) $\phi = 55^\circ$; $h = 40\text{mm}$;

Hình 4.34. Ảnh chụp sản phẩm sau khi tạo hình bằng UISF theo quỹ đạo hình xoắn vít (sản phẩm dạng chóp cắt): chiều dày tấm $t = 0.5\text{mm}$ và bước tiến $\Delta z = 0.5\text{mm}$

Khi quỹ đạo dụng cụ tạo hình có dạng xoắn vít không gian tạo ra sản phẩm có biên dạng hình chóp cụt (như Hình 4.34 và Hình 4.35), dễ dàng nhận thấy sự uốn cong tại vùng chuyển tiếp giữa mặt bích và phần được tạo hình bằng biên dạng dẻo giảm mạnh. Đồng thời, dễ dàng nhận thấy, khi chiều sâu tạo hình càng nhỏ thì hiện tượng uốn cong này càng nhỏ. Khi chiều dày phôi tăng thì hiện tượng uốn cong thậm chí hầu như không xuất hiện. Rõ ràng, quỹ đạo chuyển động tạo hình và hình dạng của sản phẩm có ảnh hưởng lớn đến hiện tượng uốn cong tại bề mặt chuyển tiếp này. Nói cách khác, hai tham số trên này có ảnh hưởng khá lớn đến chất lượng sản phẩm nhận được khi tạo hình bằng công nghệ UISF.



(a) $\phi = 55^\circ$; $h = 20\text{mm}$



(b) $\phi = 55^\circ$; $h = 40\text{mm}$

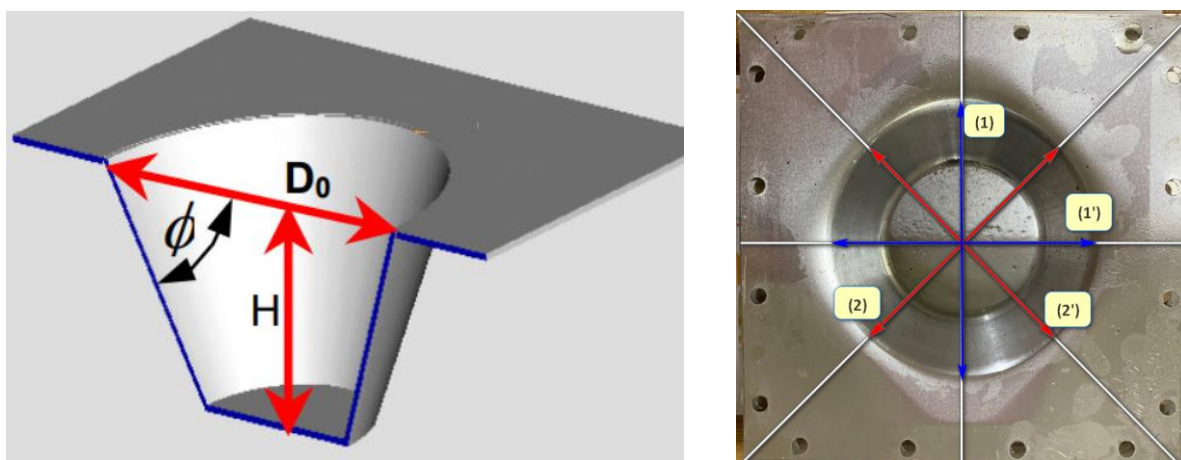
Hình 4.35. Ảnh chụp sản phẩm sau khi tạo hình bằng UISF theo quỹ đạo hình xoắn vít (sản phẩm dạng chóp cụt): chiều dày tấm $t = 1.0\text{mm}$ và bước tiến $\Delta z = 0.5\text{mm}$

Bên cạnh ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm, biên dạng và quỹ đạo dụng cụ biến dạng dẻo cũng có ảnh hưởng một phần đến chất lượng quá trình tạo hình, đặc biệt ở đây là khả năng biến dạng dẻo của sản phẩm. Như mô tả ở trên, khi góc tạo hình (góc thành tường) ϕ tăng đến 60° - 70° thì sản phẩm được tạo hình thường bị nứt (xem Hình 4.33). Đối với biên dạng hình vuông, vị trí vết nứt xuất hiện trước tiên là ở các góc khi ấn dụng cụ xuống hoặc khi chuyển hướng dụng cụ biến dạng dẻo. Điều này có thể lý giải bởi tại các góc, khả năng biến dạng kém nhất, do tại đó tập trung ứng suất và trạng thái biến dạng dẻo là kéo hoàn toàn nên làm giảm khả năng biến dạng dẻo của vật liệu. Tuy nhiên, khi tạo hình bằng biên dạng xoắn vít, mặc dù khi tạo hình ở các góc 60° - 70° phôi vẫn bị nứt nhưng rõ ràng chiều sâu biến dạng đã tăng lên (từ 18,5mm

lên 20,0mm), điều này khẳng định rằng khả năng biến dạng dẻo khi tạo hình bằng quỹ đạo dạng xoắn vít tốt hơn.

4.5.2. Kết quả đánh giá sai số hình dạng và kích thước sản phẩm

Để đánh tổng hợp về sai số hình dạng, kích thước gia công, tác giả sử dụng mô hình đo các thông số kích thước như mô tả trên Hình 2.1 và Hình 4.36 (bên trái), gồm các tham số: chiều sâu tạo hình h và góc tạo hình (góc thành tường) ϕ . Sản phẩm dạng đối xứng trụ (chóp cụt) với đường kính lớn D_m và đường kính nhỏ D_{ch} được đo theo mô hình mô tả trên Hình 4.36 (bên phải). Kết quả đo được trình bày lần lượt trên bảng Bảng 4.20 và Bảng 4.21.



Hình 4.36. Mô hình đo các kích thước đánh giá độ chính xác tạo hình

Bảng 4.20. Các kích thước sản phẩm sau khi tạo hình bằng công nghệ UISF (phần hình nón cụt) với chiều dày phôi 1.0mm

Chiều sâu h (mm)		Góc ϕ thiết kế 45°			Góc ϕ thiết kế 50°			Góc ϕ thiết kế 55°		
		D_m	D_{ch}	ϕ_h	D_m	D_{ch}	ϕ_h	D_m	D_{ch}	ϕ_h
h_{tt}	h_{tk}	(mm)	(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(°)
19.4	20	150	111.3	44.66	151	119.3	49.43	151	122	54.65
		150	111.2	44.63	151	119.1	49.18	152	122	54.71
		151	111.6	44.83	152	119.2	49.35	151	123	54.62
		151	111.7	44.93	152	119.5	49.65	151	122	54.65
29.5	30	150	93	44.49	150	102	49.40	150	109	54.79
		151	93	44.99	151	102	48.81	150	109	54.79
		150	93.5	44.75	150	103	49.99	151	109	54.13
		151	93	43.99	150	102	49.40	150	110	54.46

Chiều sâu		Góc ϕ thiết kế 45°			Góc ϕ thiết kế 50°			Góc ϕ thiết kế 55°		
h (mm)		D_m	D_{ch}	ϕ_h	D_m	D_{ch}	ϕ_h	D_m	D_{ch}	ϕ_h
h_{tt}	h_{tk}	(mm)	(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(°)
39.2	40	150	75	44.61	150	87	49.59	150	98	54.61
		151	75	44.24	152	87	48.71	151	98.5	55.75
		150	75	44.62	150	87	49.60	150	99	54.71
		151	76	44.62	151	87	49.14	150	98	54.89

Bảng 4.21. Các kích thước sản phẩm sau khi tạo hình bằng công nghệ UISF (phần hình nón cắt) với chiều dày phôi 0.5mm

Chiều sâu		Góc ϕ thiết kế 45°			Góc ϕ thiết kế 50°			Góc ϕ thiết kế 55°		
h (mm)		D_m	D_{ch}	ϕ_h	D_m	D_{ch}	ϕ_h	D_m	D_{ch}	ϕ_h
h_{tt}	h_{tk}	(mm)	(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(°)	(mm)	(mm)	(°)
19.2	20	150	110.8	44.19	151	118	49.03	151	124	54.65
		150	111	44.26	151	119	48.90	151	124	54.65
		151	112	44.26	152	119	49.03	151	124	54.65
		151	112	44.26	152	119	49.03	151	124	54.65
29.3	30	150	92	45.00	151	102	49.81	150	109	54.74
		151	92	44.51	151	102	49.83	150	109	54.74
		150	92	45.00	151	102	49.92	151	109	54.10
		150	92	45.00	151	102	49.81	150	110	54.41
39.3	40	150	74.8	45.00	150	86	49.90	150	96	54.61
		151	74.6	44.63	152	87	49.96	150	96	54.61
		150	75	45.38	151	87	49.90	150	96	54.61
		151	75.5	45.38	151	87	49.90	150	96	54.61

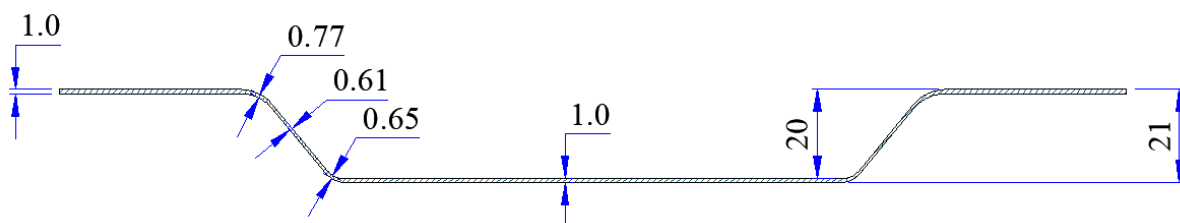
Từ kết quả đo có thể nhận thấy rõ, khi góc tạo hình ϕ càng lớn, chiều sâu tạo hình h càng nhỏ thì độ chính xác góc tạo hình ϕ và độ chính xác về chiều sâu tạo hình h càng thấp. Với góc tạo hình có thể giải thích bởi hiện tượng đàn hồi ngược của vật liệu sau khi gia công bằng biến dạng dẻo. Thực tế là biến dạng đàn hồi của vật liệu luôn xuất hiện khi biến dạng đàn hồi, khi chiều sâu tạo hình nhỏ nghĩa là tấm bị biến dạng dẻo nhỏ, tỉ lệ giữa biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo lớn. Điều này ảnh hưởng đến độ chính xác gia công. Khi tăng chiều sâu biến dạng h , hiện tượng đàn hồi vẫn còn nhưng

do mức độ biến dạng đã lớn hơn nên tỉ lệ giữa biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo giảm xuống, do đó độ chính xác góc tạo hình tăng lên.

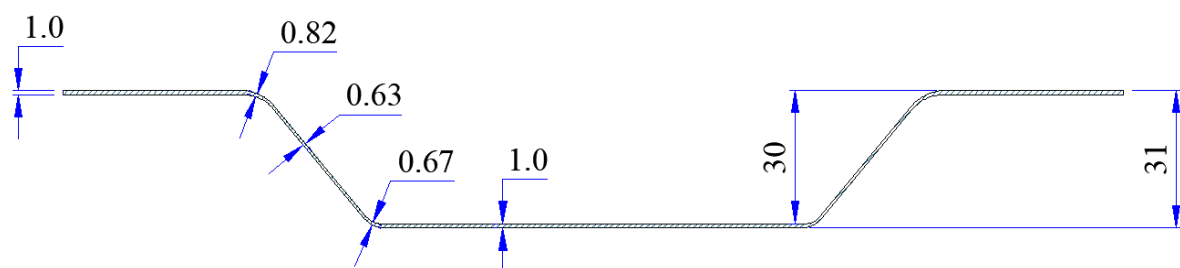
Kết quả cũng cho thấy với các thông số công nghệ tối ưu để giảm lực đã xác định, với sản phẩm đặc trưng là hình nón cụt, độ chính xác của sản phẩm đạt được như sau: sai lệch đường kính theo các phương đo đạt được dưới 1,0mm; sai lệch về góc tạo hình/góc thành tường ϕ đạt được dưới 1° . Bên cạnh đó, ứng dụng của rung động siêu âm cũng cho thấy, góc tạo hình tạo hình có thể đạt được đến 70° , cải thiện đáng kể so với các công bố trước đây về hợp kim nhôm thuộc cùng nhóm khi gia công bằng công nghệ ISF (xem Bảng 2.1). Nói chung, các nghiên cứu về ứng dụng rung động siêu âm hỗ trợ quá trình ISF gia công hợp kim nhôm Al 5052 hiện nay khá ít. Nhưng có thể thấy, các kết quả đạt được của đề tài cũng khá tương đồng so với công bố trong [102]. Tuy vậy, trong công bố [102], nhóm nghiên cứu phải sử dụng nhiều giai đoạn biến dạng để đạt được sai số đó.

4.5.3. Kết quả đánh giá biến mỏng thành tấm sau khi tạo hình

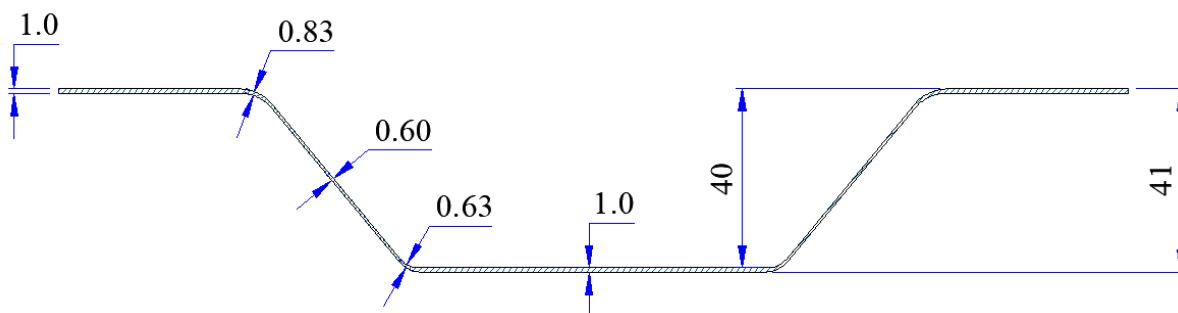
Phân bố chiều dày tấm sau khi tạo hình ở một số điều kiện khác nhau được thể hiện như trên các Hình 4.37, Hình 4.38 và Hình 4.39 sau đây.



Hình 4.37. Kết quả xác định phân bố chiều dày sản phẩm khi tạo hình theo các tham số tối ưu và các điều kiện: góc thành tường $\phi = 50^\circ$; chiều sâu tạo hình $h = 20\text{mm}$; chiều dày tấm ban đầu $t = 1.0\text{mm}$



Hình 4.38. Kết quả xác định phân bố chiều dày sản phẩm khi tạo hình theo các tham số tối ưu và các điều kiện: góc thành tường $\phi = 45^\circ$; chiều sâu tạo hình $h = 30\text{mm}$; chiều dày tấm ban đầu $t = 1.0\text{mm}$



Hình 4.39. Kết quả xác định phân bố chiều dày sản phẩm khi tạo hình theo các tham số tối ưu và các điều kiện: góc thành tường $\phi = 45^\circ$; chiều sâu tạo hình $h = 40\text{mm}$; chiều dày tấm ban đầu $t = 1.0\text{mm}$

Kết quả phân bố chiều dày sản phẩm cho thấy, có sự biến mỏng thành khá mạnh tại vùng chuyển tiếp giữa phần mặt bích (gần vùng kẹp chặt) và vùng tạo hình. Càng gần khu vực đáy, sự biến mỏng càng giảm. Khi chiều sâu tạo hình càng h lớn, sự biến mỏng ở khu vực chuyển tiếp này xảy ra càng lớn. Kết quả này tương đồng với các nghiên cứu trước đây về phân bố chiều dày tấm khi gia công bằng công nghệ ISF thông thường và công nghệ UISF [22],[17],[44],[106],[102]. Sự biến mỏng thành có thể giải thích do ứng suất kéo trong quá trình tạo hình gây ra. Ứng suất kéo tại khu vực chuyển tiếp (tương tự như khi dập tấm thông thường) có giá trị lớn nhất, do đó sự biến mỏng ở khu vực này xảy ra mạnh hơn. Các kết quả này cũng cho thấy, biến mỏng thành sản phẩm khi gia công lớn nhất đến gần 40%, kể cả với chiều sâu tạo hình lớn, đến 40mm.

4.6. Kết luận Chương 4

- Ảnh hưởng của rung động siêu âm đến thành phần lực tạo hình chính (các thành phần lực theo phương ngang và thành phần lực theo phương dọc trục) đã được khảo sát một cách chi tiết, khoa học. Kết quả cho thấy khi quá trình tạo hình có rung động siêu âm trợ giúp UISF, hiện tượng giảm lực tạo hình (theo phương dọc trục và phương tiến dụng cụ biến dạng) xuất hiện rất rõ rệt khi so với khi tạo hình bằng ISF thông thường (không có rung động siêu âm).

- Với các điều kiện thí nghiệm đã được thiết kế, chế tạo, đề tài đã xây dựng được bài toán tối ưu lượng giảm lực biến dạng dẻo theo phương tiến dụng cụ biến dạng và phương thẳng đứng (F_y , F_z) theo các tham số đầu vào là lượng tiến dụng cụ theo phương dọc trục Δz và lượng tiến dụng cụ theo phương ngang f cho hai chiều dày tấm khác nhau, lần lượt là 0.5mm và 1.0mm. Kết quả giải bài toán tối ưu cho thấy, lượng

giảm RFz_{opt} (%) nhận được là 58.73% đối với tấm dày 1.0mm và đạt đến 64.17% đối với tấm có chiều dày 0.5mm. Trong khi đó, lượng giảm RFy_{opt} (%) nhận được là gần 71.99% đối với tấm dày 0.5mm và 69.17% đối với tấm có chiều dày 1.0mm.

- Độ nhám bề mặt sản phẩm được tạo hình bằng UISF thấp hơn, không xuất hiện các vết nứt so với bề mặt được tạo tạo hình bằng ISF thông thường, thậm chí kể cả khi lượng tiến dụng cụ biến dạng được lựa chọn khá lớn, đến 1.5mm.

- Sai lệch hình dạng hình học và kích thước của sản phẩm chóp cụt điển hình sau khi tạo hình theo bộ tham số tối ưu cho thấy: sai lệch đường kính theo các phương đo đạt được dưới 1.0mm; sai lệch về góc tạo hình/góc thành tường đạt được dưới 1° , với cả hai loại chiều dày tấm nghiên cứu.

- Kết quả phân tích sự phân bố chiều dày trong khu vực biến dạng cho thấy sự biến mỏng thành xảy ra mạnh ở khu vực chuyển tiếp giữa vùng tạo hình và bề mặt bích tấm (phần kẹp chặt). Tuy vậy, sự biến mỏng thành chỉ gần 40% khi chiều sâu tạo hình h đến 40mm.

- Khả năng tạo hình bằng ISF có rung động siêu âm trợ giúp được cải thiện đáng kể, có thể tạo hình với góc thành tường lớn đến 70° (trong khi các hợp kim nhôm cùng nhóm được gia công bằng ISF chỉ đạt khoảng 60°).

KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT

Kết luận

Đề tài đã thực hiện thành công các mục tiêu đã đặt ra. Cụ thể là:

- Đã tiến hành nghiên cứu, chế tạo được bộ công tác siêu âm, có thể sử dụng cho các máy công cụ hoặc cho máy phay CNC phục vụ nghiên cứu, chế tạo các sản phẩm dạng tấm vỏ bằng công nghệ ISF có sự trợ giúp của rung động siêu âm. Cụ thể:

+ 01 máy CNC 03 trục, công suất tổng khoảng 4.0 kW, chiều dài băng máy 1100mm, máy tích hợp đầu rung siêu âm có công suất tối thiểu 1000W.

+ Hệ thống này có khả năng gia công được đa dạng chủng loại chi tiết dạng tấm (thép, nhôm...) đặc trưng, có quỹ đạo, độ rộng và độ sâu gân, gờ được lập trình điều khiển tự động.

+ Hệ thống thiết bị thí nghiệm hiển thị đầy đủ các thông tin về chuyển động.

+ Bộ thu thập thông tin hiển thị thông số rung động siêu âm, các thành phần lực, lưu trữ trên máy tính để phục vụ nghiên cứu.

- Đã xây dựng được hàm mục tiêu thể hiện mối quan hệ của các thông số công nghệ với độ giảm thành phần lực biến dạng.

- Chất lượng sản phẩm sau khi gia công:

+ Độ nhám bề mặt sản phẩm được tạo hình bằng UISF thấp hơn, không xuất hiện các vết nứt so với bề mặt được tạo hình bằng ISF thông thường, thậm chí kể cả khi lượng tiến dụng cụ biến dạng được lựa chọn khá lớn, đến 105mm.

+ Sai lệch hình dạng hình học và kích thước của sản phẩm chóp cắt điển hình sau khi tạo hình theo bộ tham số tối ưu cho thấy: sai lệch đường kính theo các phương đo đạt được dưới 1.0mm; sai lệch về góc tạo hình/góc thành tường đạt được dưới 1°, với cả hai chiều dày tấm nghiên cứu.

+ Khả năng tạo hình nhờ rung động siêu âm được cải thiện đáng kể, có thể tạo hình với góc thành tường lớn đến 70° (trong khi các hợp kim nhôm cùng nhóm được gia công bằng ISF chỉ đạt khoảng 60°).

Đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo

Các kết quả thu được đóng vai trò cơ sở quan trọng cho việc nghiên cứu công nghệ gia công UISF. Các định hướng tiếp tục phát triển đề tài bao gồm:

- Triển khai nghiên cứu ứng dụng cho các sản phẩm thực, bằng thép các bon thấp

hoặc inox với các mô hình có khuôn đơn giản (khuôn bán phần hoặc toàn phần)...

- Bổ sung chuyển động quay cho dụng cụ biến dạng để đánh giá ảnh hưởng tốc độ quay đến quá trình gia công.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Edward, L., *Apparatus and process for incremental dieless forming*. Patent: US3342051, 1967.
 2. Gallego-Juarez, J. and K.F. Graff, *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*. 2014: Woodhead Publishing.
 3. Li, Y., et al., *A review on the recent development of incremental sheet-forming process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **92**(5-8): p. 2439-2462.
 4. Siddiqi, M., et al., *Design and Assessment of Rotating Tool for Incremental Sheet Forming*. ICTMP 2016: 7th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes: February 28 to March 2, 2016, Phuket, Thailand: Proceedings. 2016: Thai Tribology Association (TTA), 2016.
 5. Gatea, S., H. Ou, and G. McCartney, *Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **87**(1-4): p. 479-499.
 6. Rosenthal, S., et al., *Lightweight in Automotive Components by Forming Technology*. Automotive Innovation, 2020. **3**(3): p. 195-209.
 7. Hirt, G., J. Ames, and M. Bambach, *A New Forming Strategy to Realise Parts Designed for Deep-drawing by Incremental CNC Sheet Forming*. steel research international, 2005. **76**(2-3): p. 160-166.
 8. Koh, K.H., J.-G. Kang, and J.-Y. Jung, *The Analysis of Forming Forces in Single Point Incremental Forming*. MATEC Web of Conferences, 2016. **81**: p. 05004.
 9. Cheng, Z., et al., *Incremental sheet forming towards biomedical implants: a review*. Journal of Materials Research and Technology, 2020. **9**(4): p. 7225-7251.
 10. Uheida, E.H., G.A. Oosthuizen, and D.M. Dimitrov. *Toward understanding the process limits of incremental sheet forming of titanium alloys*. in *Proceedings of the Competitive Manufacturing, International Conference on Competitive Manufacturing (COMA'16), Stellenbosch, South Africa, 27–29 January 2016*. 2016.
 11. Min, J., et al., *Experimental and numerical investigation on incremental sheet forming with flexible die-support from metallic foam*. Journal of Manufacturing Processes, 2018. **31**: p. 605-612.
 12. Ceretti, E., C. Giardini, and A. Attanasio, *Experimental and simulative results*
-

- in sheet incremental forming on CNC machines*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. **152**(2): p. 176-184.
13. Nallagundla, V.R., R. Lingam, and J. Cao, *Incremental Sheet Metal Forming Processes*. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, 2014: p. 1-37.
 14. Ambrogio, G., L. Filice, and F. Gagliardi, *Improving industrial suitability of incremental sheet forming process*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology - INT J ADV MANUF TECHNOL, 2012. **58**.
 15. Maqbool, F. and M. Bambach, *Dominant deformation mechanisms in single point incremental forming (SPIF) and their effect on geometrical accuracy*. International Journal of Mechanical Sciences, 2018. **136**: p. 279-292.
 16. Paul, E., et al., *Finite Element Analysis to Study the Effect of Tool Deflection in Incremental Forming Process*. 2022.
 17. Nikhil Bari, S.K., *Experimental investigation on thinning and forming force acting on multi-stage single point incremental forming*. 2023. **25**: p. 53-60.
 18. Zhang, Y., et al., *Investigation of Pre-Aged Hardening Single-Point Incremental Forming Process and Mechanical Properties of AA6061 Aluminum Alloy*. Materials (Basel), 2023. **16**(11).
 19. Lv, Y., et al., *Characteristics of 2D Ultrasonic Vibration Incremental Forming of a 1060 Aluminum Alloy Sheet*. Materials (Basel), 2024. **17**(6).
 20. Liu, Z., Y. Li, and P.A. Meehan, *Vertical Wall Formation and Material Flow Control for Incremental Sheet Forming by Revisiting Multistage Deformation Path Strategies*. Materials and Manufacturing Processes, 2013. **28**(5): p. 562-571.
 21. Bârsan, A., et al., *Evaluation of the dimensional accuracy through 3D optical scanning in incremental sheet forming*. Materials Today: Proceedings, 2023. **Inpress**.
 22. Ullah, S., et al., *A toolpath strategy for improving geometric accuracy in double-sided incremental sheet forming*. Chinese Journal of Aeronautics, 2023. **36**(1): p. 468-479.
 23. Ullah, S., et al., *A Review on Part Geometric Precision Improvement Strategies in Double-Sided Incremental Forming*. Metals, 2022. **12**(1): p. 103.
 24. Jeswiet, J., et al., *Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal*. CIRP Annals, 2005. **54**(2): p. 88-114.
 25. Pérez-Santiago, R., I. Bagudanch, and M.L. Garcia-Romeu, *Incremental Sheet Forming*, in *Modern Manufacturing Processes*, K. Muammer and Ö. Tuğrul,
-

- Editors. 2019. p. 47-63.
26. Magdum, R.A. and P. Chinnaiyan, *A critical review of incremental sheet forming in view of process parameters and process output*. Advances in Materials and Processing Technologies, 2022. **8**(2): p. 2039-2068.
 27. Bhoyar, P. and A. Borade, *The use of single point incremental forming for customized implants of unicondylar knee arthroplasty: A review*. Research on Biomedical Engineering, 2015. **31**.
 28. Bhasker, R.S. and Y. Kumar, *Process capabilities and future scope of Incremental Sheet Forming (ISF)*. Materials Today: Proceedings, 2023. **72**: p. 1014-1019.
 29. Bagudanch, I., et al., *Towards the Manufacturing of Near Net Shape Medical Prostheses in Polymeric Sheet by Incremental Sheet Forming*. 2019: p. 1-33.
 30. Chang, Z., M. Yang, and J. Chen, *Experimental investigations on deformation characteristics in microstructure level during incremental forming of AA5052 sheet*. Journal of Materials Processing Technology, 2021. **291**: p. 117006.
 31. Ullah, S., et al., *A review on the deformation mechanism and formability enhancement strategies in incremental sheet forming*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2022. **23**(1): p. 55.
 32. Han, K., et al., *Overcoming strength–ductility trade-off in shape–performance integrated fabrication by incremental sheet forming*. Journal of Materials Research and Technology, 2023. **27**: p. 5470-5478.
 33. Grimm, T.J., F. Colombini, and I. Ragai, *Numerical Investigation of Step Size Effect on Formability of 2024-T3 Aluminum in Incremental Forming*. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2023. **7**(2): p. 70.
 34. Bharti, S., et al., *Analytical approach to damage prediction in incremental sheet metal forming*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022. **1238**(1): p. 012024.
 35. Zhu, H. and H. Ou, *A new analytical model for force prediction in incremental sheet forming*. Journal of Materials Processing Technology, 2023. **318**: p. 118037.
 36. Nimbalkar, D.H. and V.M. Nandedkar, *Prediction of forces in incremental sheet forming using finite element method*. Materials Today: Proceedings, 2023.
 37. Formisano, A., L. Boccarusso, and M. Durante, *Optimization of Single-Point Incremental Forming of Polymer Sheets through FEM*. Materials (Basel), 2023. **16**(1).
 38. Oraon, M., S. Mandal, and V. Sharma, *Predicting the deformation force in the*
-

- incremental sheet forming of AA3003*. Materials Today: Proceedings, 2021. **45**: p. 5069-5073.
39. Kumar, A., et al., *Parametric Investigation of Forming Forces in Single Point Incremental Forming*. Materials Today: Proceedings, 2020. **24**: p. 611-617.
 40. Harfoush, A., Z. Fan, and K.R. Haapala, *Experimental studies on multistage single point incremental forming of thin high carbon steel sheet*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024.
 41. Chang, Z., M. Yang, and J. Chen, *Geometric deviation during incremental sheet forming process: Analytical modeling and experiment*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2024. **198**: p. 104160.
 42. Qadeer, A., et al., *Springback behavior of a metal/polymer laminate in incremental sheet forming: stress/strain relaxation perspective*. Journal of Materials Research and Technology, 2023. **23**: p. 1725-1737.
 43. Oraon, M., R. Prasad, and V. Sharma, *Investigating the surface roughness of calamine brass in incremental sheet metal forming*. Materials Today: Proceedings, 2023.
 44. Huang, H., et al., *Change in geometry size and thinning rate in single-point incremental forming process of TA1 sheet: evaluation method and finite element analysis*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023. **125**(5): p. 2743-2758.
 45. Liu, F., et al., *Modelling of the effects of process parameters on energy consumption for incremental sheet forming process*. Journal of Cleaner Production, 2020. **250**: p. 119456.
 46. Li, Y., et al., *Investigation of the Effect of Process Parameters on Energy Consumption in Incremental Sheet forming*. Procedia CIRP, 2019. **80**: p. 50-55.
 47. Ambrogio, G., L. Filice, and F. Gagliardi, *Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming*. Materials & Design, 2012. **34**: p. 501-508.
 48. Leonhardt, A., et al., *Experimental study on incremental sheet forming of magnesium alloy AZ31 with hot air heating*. 2018. 1192 - 1199.
 49. Li, Z., et al., *Multi-Objective Optimization of Dimensional Accuracy in Electric Hot Incremental Sheet Forming*. Coatings, 2023. **13**(5): p. 923.
 50. Scharifi, E., et al., *Hot Sheet Metal Forming Strategies for High-Strength Aluminum Alloys: A Review—Fundamentals and Applications*. Advanced Engineering Materials, 2023.
 51. Kumar, A., et al., *A comprehensive review on heat-assisted incremental sheet forming*. International Journal on Interactive Design and Manufacturing
-

- (IJIDeM), 2023.
52. Pinard, D., et al., *Study of forming mechanics of magnetic field–assisted single point incremental forming*. Journal of Manufacturing Processes, 2022. **79**: p. 28-34.
 53. Buffa, G., et al., *Magnetic field-assisted single-point incremental forming with a magnet ball tool*. CIRP Annals, 2021. **70**(1): p. 265-268.
 54. Vahdati, M., R. Mahdavinejad, and S. Amini, *Investigation of the ultrasonic vibration effect in incremental sheet metal forming process*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2015. **231**(6): p. 971-982.
 55. Amini, S., A. Hosseinpour Gollo, and H. Paktinat, *An investigation of conventional and ultrasonic-assisted incremental forming of annealed AA1050 sheet*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **90**(5): p. 1569-1578.
 56. Ensminger, D. and L. Bond, *Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications, 3rd Edition*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.
 57. Fuchs, F.J., *Ultrasonic cleaning and washing of surfaces*. 2015: p. 577-609.
 58. Yang, Z., et al., *Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020. **156**: p. 103594.
 59. Dixit, U.S., P.M. Pandey, and G.C. Verma, *Ultrasonic-assisted machining processes: a review*. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 2019. **12**(3-4): p. 227-254.
 60. Hoang, T.-D., et al., *Ultrasonic assisted nano-fluid MQL in deep drilling of hard-to-cut materials*. Materials and Manufacturing Processes, 2022. **37**(6): p. 712-721.
 61. Martins, H. and H. Puga, *Ultrasonic Assisted Machining Overview: Accessing Feasibility and Overcoming Challenges for Milling Applications*. Metals, 2023. **13**(5): p. 908.
 62. Langenecker, B., *Effects of Ultrasound on Deformation Characteristics of Metals*. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1966. **13**(1): p. 1-8.
 63. Eaves, A.E., et al., *Review of the application of ultrasonic vibrations to deforming metals*. Ultrasonics, 1975. **13**(4): p. 162-170.
 64. Shao, G., H. Li, and M. Zhan, *A Review on Ultrasonic-Assisted Forming: Mechanism, Model, and Process*. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021. **34**(1).
-

65. Zhai, J., et al., *Macroscopic mechanism of ultrasonic vibration in ultrasonic-assisted metal forming*. Journal of Materials Research and Technology, 2023. **24**: p. 7852-7864.
 66. Liu, S., et al., *Finite Element Analysis on Ultrasonic Drawing Process of Fine Titanium Wire*. Metals, 2020. **10**(5): p. 575.
 67. Cao, H., et al., *Ultra-fine high-carbon steel wire drawing with ultrasonic vibration*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. **531**: p. 012027.
 68. Malekipour, E., et al., *Effect of resonant frequency variation on the ultrasonically assisted deep drawing process: numerical and experimental study*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **106**(5-6): p. 2243-2264.
 69. Siddiq, A. and T. El Sayed, *Ultrasonic-assisted manufacturing processes: variational model and numerical simulations*. Ultrasonics, 2012. **52**(4): p. 521-9.
 70. Naderi, A.A. and S.A. Mokhtari, *Effect of Process Parameters on Thin-wall Products under High-frequency Vibrating Tools, Case Study: Ultrasonic Assisted Deep Drawing Process*. Journal of Stress Analysis, 2021. **6**(1): p. 105-125.
 71. Kishani, H., et al., *A new method to exploit ultrasonic vibrations in deep drawing process*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2023. **238**(4): p. 478-487.
 72. Manuel Jäckisch, M.M., *Investigation of thermal effects during ultrasonic-assisted upsetting*. Procedia Manufacturing, 2020. **50**: p. 220-225.
 73. Xie, Z., et al., *Study on ultrasonic vibration assisted upsetting of 6063 aluminum alloy*. Procedia Engineering, 2017. **207**: p. 490-495.
 74. Liu, T., et al., *Effects of ultrasonic vibration on the compression of pure titanium*. Ultrasonics, 2018. **89**: p. 26-33.
 75. Tianfeng, Z. and M. Chunfeng, *Study of ultrasonic vibration-assisted forming in copper cylinder compression*. Procedia Manufacturing, 2020. **50**: p. 199-202.
 76. Lou, Y., et al., *Ultrasonic-assisted extrusion of ZK60Mg alloy micropins at room temperature*. Ultrasonics, 2018. **83**: p. 194-202.
 77. Akbari Mousavi, S.A.A., H. Feizi, and R. Madoliat, *Investigations on the effects of ultrasonic vibrations in the extrusion process*. Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL, 2007. **187**: p. 657-661.
-

78. Zhao, J. and Z. Liu, *Plastic flow behavior for machined surface material Ti-6Al-4V with rotary ultrasonic burnishing*. Journal of Materials Research and Technology, 2020. **9**(2): p. 2387-2401.
 79. Llumà, J., et al., *Mechanical Strengthening in S235JR Steel Sheets through Vibration-Assisted Ball Burnishing*. Metals, 2020. **10**(8): p. 1010.
 80. Sui, R.J., et al., *Effect of Ultrasonic Surface Rolling Process Parameters on Surface Properties of S30408 Austenitic Stainless Steel*. Solid State Phenomena, 2020. **305**: p. 111-116.
 81. Vahdati, M., *Finite Element Analysis and Experimental Study of the Ultrasonic Vibration-assisted Single Point Incremental Forming (UVaSPIF) Process*. Iranian Journal of Materials Forming, 2019. **6**(2): p. 30-41.
 82. Li, Y., et al., *Effects of ultrasonic vibration on deformation mechanism of incremental point-forming process*. Procedia Engineering, 2017. **207**: p. 777-782.
 83. Li, Y., et al., *Investigation on the material flow and deformation behavior during ultrasonic-assisted incremental forming of straight grooves*. Journal of Materials Research and Technology, 2020. **9**(1): p. 433-454.
 84. Zhai, W., et al., *Investigation on the forming force and surface quality during ultrasonic-assisted incremental sheet forming process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. **106**(7): p. 2703-2719.
 85. Ghafoor, S., et al., *Deformation characteristics and formability enhancement during ultrasonic-assisted multi-stage incremental sheet forming*. Journal of Materials Research and Technology, 2022. **18**: p. 1038-1054.
 86. Ghafoor, S., et al., *Improving the formability during ultrasonic-assisted multi-stage incremental sheet forming*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022. **1270**(1): p. 012002.
 87. Li, J., et al., *Multi-stage finite element modeling of the deformation behavior during ultrasonic-assisted incremental sheet forming*. Journal of Computational Science, 2023. **72**: p. 102077.
 88. Li, Y.-L., et al., *The influence of ultrasonic vibration on parts properties during incremental sheet forming*. Advances in Manufacturing, 2021. **9**(2): p. 250-261.
 89. Ostasevicius, V., et al., *Investigation of the Robotized Incremental Metal-Sheet Forming Process with Ultrasonic Excitation*. Materials (Basel), 2022. **15**(3).
 90. Yang, M., et al., *Influences of Vibration Parameters on Formability of 1060 Aluminum Sheet Processed by Ultrasonic Vibration-Assisted Single Point Incremental Forming*. Advances in Materials Science and Engineering, 2019.
-

- 2019**: p. 1-12.
91. Long, Y., et al., *Effects of process parameters on force reduction and temperature variation during ultrasonic assisted incremental sheet forming process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **97**(1): p. 13-24.
 92. Sun, Y., et al., *Study on the Springback Effect and Surface Property for Ultrasonic-Assisted Incremental Sheet Forming of Aluminum Alloy*. Symmetry, 2021. **13**(7).
 93. Alharbi, N., *Experimental study on designing optimal vibration amplitude in ultrasonic assisted incremental forming of AA6061-T6*. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2022. **30**: p. 101041.
 94. Li, P., et al., *Evaluation of forming forces in ultrasonic incremental sheet metal forming*. Aerospace Science and Technology, 2017. **63**: p. 132-139.
 95. McAnulty, T., J. Jeswiet, and M. Doolan, *Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2017. **16**: p. 43-54.
 96. Ham, M. and J. Jeswiet, *Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003*. Cirp Annals-manufacturing Technology - CIRP ANN-MANUF TECHNOL, 2006. **55**: p. 241-244.
 97. Jeswiet, J., J.R. Duflou, and A. Szekeres, *Forces in Single Point and Two Point Incremental Forming*. Advanced Materials Research, 2005. **6-8**: p. 449-456.
 98. Jeswiet, J. and D. Young, *Forming limit diagrams for single-point incremental forming of aluminium sheet*. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2005. **219**: p. 359-364.
 99. Afonso, D., et al., *Incremental Forming as a Rapid Tooling Process*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, 2019.
 100. Bai, L., et al., *Influences of Process Parameters and Vibration Parameters on the Forming Force in the Ultrasonic-Assisted Incremental Forming Process*. Advances in Materials Science and Engineering, 2018. **2018**: p. 1-12.
 101. Allwood, J., N. Houghton, and K. Jackson, *The Design of an Incremental Sheet Forming Machine*. Advanced Materials Research, 2005. **6-8**: p. 471-478.
 102. Sun, Y., et al., *Study on the Springback Effect and Surface Property for Ultrasonic-Assisted Incremental Sheet Forming of Aluminum Alloy*. Symmetry, 2021. **13**(7): p. 1217.
 103. Chu, N.-H., Q.-H. Ngo, and V.-D. Nguyen, *A step-by-step design of vibratory apparatus for ultrasonic-assisted drilling*. Int J Adv Eng Res Appl, 2018. **4**: p.
-

- 139-148.
104. Ho, K.-T., et al. *An Experimental Study on the Tensile Strength of Friction Stir Welded AA5052 Aluminum Alloy*. in *Proceeding of 5th International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, 9–10 August 2022*. 2023. Singapore: Springer Nature Singapore.
 105. Liu, F., et al., *Comprehensive modeling of forming forces in three directions for incremental sheet forming process based on the contact area*. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022. **84**: p. 986-1000.
 106. Wu, S., et al., *Contact-induced vibration tool in incremental sheet forming for formability improvement of aluminum sheets*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. **17**: p. 1363-1379.
-