

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI



NGUYỄN DUY TRINH

**NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG BỀ MẶT KHI
ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH HỢP KIM TI-6AL-4V**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2025

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI



NGUYỄN DUY TRINH

**NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG BỀ MẶT KHI
ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH HỢP KIM TI-6AL-4V**

CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ
MÃ SỐ: 9.52.01.03

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:
PGS.TS. HOÀNG TIẾN DŨNG

Hà Nội - 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan nội dung luận án là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn khoa học của PGS.TS. Hoàng Tiến Dũng. Những kết quả nghiên cứu được trình bày trong luận án là trung thực, không sao chép từ bất cứ công trình nghiên cứu nào khác.

Hà Nội, ngày 28 tháng 10 năm 2025

Tác giả luận án

Nguyễn Duy Trinh

LỜI CẢM ƠN

Trước tiên, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới PGS.TS. Hoàng Tiến Dũng, người thầy đã luôn tận tâm chỉ dẫn và khơi dậy niềm cảm hứng nghiên cứu cho tôi trong suốt quá trình nghiên cứu. Với tôi, thầy vừa là người thầy về chuyên môn vừa giúp tôi định hướng rõ ràng trên con đường học thuật. Sự kiên nhẫn, nhiệt huyết và hỗ trợ không ngừng nghỉ của Thầy đã có những đóng góp to lớn cho sự hoàn thiện của luận án này.

Xin trân trọng gửi lời cảm ơn tới Ban Giám hiệu Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội vì đã mang lại những điều kiện tốt nhất về môi trường làm việc, tạo cơ hội để tôi hoàn thành hiệu quả nhiệm vụ học tập và nghiên cứu. Sự đồng hành và tạo điều kiện của nhà trường là động lực lớn lao cho tôi trong suốt hành trình này.

Tôi cũng xin gửi lời cảm ơn sâu sắc tới các thầy cô và đồng nghiệp ở Trường Cơ khí – Ô tô và Trung tâm Đào tạo Sau đại học vì những hỗ trợ quý báu trong quá trình học tập và nghiên cứu.

Tôi xin trân trọng cảm ơn Ban Giám hiệu cùng Phòng Tổ chức Hành chính Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã tạo điều kiện về thời gian và hỗ trợ nguồn lực tài chính, góp phần quan trọng vào việc hoàn thành luận án này.

Không thể không nhắc đến gia đình, đặc biệt là bố mẹ tôi. Sự yêu thương và hy sinh của bố mẹ là điểm tựa quan trọng, khích lệ tôi vượt qua những khó khăn, thử thách trong cuộc sống và nghiên cứu.

Cuối cùng, tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc và chân thành nhất tới người vợ yêu dấu của tôi. Cô ấy đã luôn là nguồn động viên quý báu, luôn kề vai sát cánh cùng tôi vượt qua mọi gian nan và niềm vui trong cuộc sống, cùng với tình yêu thương vô hạn từ con, đã mang lại động lực to lớn giúp tôi vững bước trên con đường học thuật này.

Hà Nội, ngày 28 tháng 10 năm 2025

Tác giả luận án

Nguyễn Duy Trinh

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN.....	ii
MỤC LỤC.....	iii
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ.....	vi
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	x
DANH MỤC CÁC TỪ, CỤM TỪ VIẾT TẮT	xi
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU.....	xiv
MỞ ĐẦU	1
1. Lý do lựa chọn đề tài.....	1
2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án	4
3. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn.....	5
4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....	6
5. Những đóng góp mới	7
6. Phương pháp nghiên cứu.....	7
7. Nội dung nghiên cứu	10
CHƯƠNG 1. NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH	12
1.1. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước	12
1.1.1. Tình hình nghiên cứu ngoài nước	12
1.1.2. Tình hình nghiên cứu trong nước	16
1.2. Công nghệ đánh bóng từ tính	18
1.2.1. Lịch sử phát triển công nghệ đánh bóng từ tính	18
1.2.2. Ứng dụng công nghệ đánh bóng từ tính	19
1.3. Một số phương pháp đánh bóng từ tính hợp kim titanium	22
1.3.1. Phương pháp đánh bóng đầu bi dưới sự hỗ trợ bởi từ trường	27
1.3.2. Phương pháp đánh bóng từ tính dạng đĩa	30
1.4. Thách thức khi đánh bóng từ tính vật liệu hợp kim titanium.....	34

1.5. Phân tích dung dịch từ tính khi đánh bóng vật liệu hợp kim Ti-6Al-4V	37
1.6. Kết luận chương 1	41
CHƯƠNG 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH SỬ DỤNG MẢNG HALBACH CẢI TIẾN.....	42
2.1. Nguyên lý và độ nhót biểu kiến trong quá trình đánh bóng từ tính	42
2.2. Thiết lập sơ đồ đánh bóng từ tính với mảng Halbach cải tiến	54
2.2.1. Xác định mảng Halbach tối ưu thông qua hàm hồi phục	57
2.2.2. Lực từ tác dụng lên các hạt từ tính khi có từ trường	59
2.2.3. Lực đẩy và lực hấp dẫn tác động lên các hạt từ tính	63
2.3. Ứng dụng mảng halbach cải tiến trong đánh bóng từ tính.....	64
2.4. Phân tích từ trường và động học hạt từ tính Fe_3O_4 dưới tác dụng mảng Halbach cải tiến	67
2.5. Phân tích ảnh hưởng của hạt từ tính Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2 dưới tác dụng từ trường Halbach cải tiến.....	68
2.6. Thiết lập mô hình lực đánh bóng cho quy trình đánh bóng với mảng Halbach tiến tịnh tiến khứ hồi	74
2.7. Kết luận chương 2	80
CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ THỰC NGHIỆM ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH SỬ DỤNG MẢNG HALBACH CẢI TIẾN GIA CÔNG HỢP KIM TI-6AL-4V.....	82
3.1. Mục tiêu và yêu cầu	82
3.1.1. Mục tiêu	82
3.1.2. Yêu cầu	83
3.2. Thiết lập hệ thống thực nghiệm	84
3.2.1. Máy gia công	84
3.2.2. Vật liệu.....	85
3.2.3 Thiết bị đo	87
3.3. Thiết lập các thực nghiệm đơn yếu tố	90
3.4. Áp lực tác dụng lên mặt phôi Ti-6Al-4V trong vùng đánh bóng.....	96
3.5. Phân tích và lựa chọn axit, hạt mài cho quá trình đánh bóng từ tính.....	98

3.6. Phân tích hiệu suất đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V theo nồng độ pH khác nhau trong dung dịch MRF.....	101
3.7. Hiệu suất đánh bóng mrf hợp kim Ti-6Al-4V theo hàm lượng chất oxy hóa H_2O_2	103
3.8. Khả năng đánh bóng MRF với mảng Halbach cải tiến.....	109
3.9. Kết luận chương 3	112
CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH	113
4.1. Thiết lập thực nghiệm kiểm chứng mô hình lực cắt	113
4.2. Lực tiếp tuyến và pháp tuyến trong quy trình đánh bóng từ tính sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi.....	116
4.3. Mô hình loại bỏ vật liệu trong đánh bóng từ tính sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi	121
4.4. Thiết lập thực nghiệm trực giao	124
4.5. Chất lượng bề mặt khi đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi theo các thông số công nghệ khác nhau.....	126
4.6. Kết luận chương 4	137
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO.....	138
KẾT LUẬN	138
HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO	140
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN	142
TÀI LIỆU THAM KHẢO	144
PHỤ LỤC 1.....	158
PHỤ LỤC 2.....	164

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1 Các công trình nghiên cứu liên quan đến chất lỏng và công nghệ.....	3
Hình 1.1 Sự khác biệt giữa đánh bóng cơ học truyền thống và đánh bóng MRF	13
Hình 1.2 Hình thái MRF theo thời gian khi có và không có từ trường ngoài dụng với các dung dịch mang khác nhau	17
Hình 1.3 Các giai đoạn phát triển công nghệ đánh bóng MRF.....	19
Hình 1.4 Các ứng dụng đánh bóng MRF	21
Hình 1.6 Cơ chế đánh bóng BEMRF với nam châm điện [89].....	28
Hình 1.7 Nguyên lý đánh bóng từ tính dạng đĩa [111]	30
Hình 1.8 Mô hình thí nghiệm đánh bóng từ tính dạng đĩa cho vật liệu hợp kim Ti-6Al- 4V.....	32
Hình 1.9 Hình thái bề mặt SEM của phôi trước và sau khi đánh bóng từ trường dạng đĩa cho phôi Ti-6Al-4V.....	33
Hình 1.10 Ảnh hưởng chế độ công nghệ khi đánh bóng từ tính vật liệu hợp kim titan đến chất lượng bề mặt [98, 112, 113]	34
Hình 1.11 Các quy trình đánh bóng từ tính nanomet đối với hợp kim titanium [89, 114- 117]	35
Hình 2.1 Sơ đồ nguyên lý đánh bóng MRF dạng đĩa.....	43
Hình 2.2 Nguyên lý quá trình loại bỏ vật liệu trong đánh bóng MRF	44
Hình 2.3 Ứng suất cắt theo mật độ từ thông và độ nhớt	45
Hình 2.4 Độ nhớt biểu kiến của các dung dịch từ tính MRPS khác nhau	46
Hình 2.5 Sơ đồ minh họa sự hình thành chuỗi từ dưới tác động của từ trường.....	47
Hình 2.6 Hành vi cơ học của chất lỏng từ tính dưới tác động của từ trường ngoài khác nhau.....	48
Hình 2.7 Tính chất từ lưu biến (MR) dưới tác dụng của cường độ từ trường khác nhau (H).....	49
Hình 2.8 Động lực của hành vi dòng chảy trong các mô hình lưu biến từ khác nhau	50

Hình 2.9 Hành vi dòng chảy động của chất lỏng MR thông thường [151]	51
Hình 2.10 Sơ đồ đánh bóng đề xuất với lực hấp dẫn (F_G), lực từ (F_M) và lực cản (F_T) dưới tác dụng của từ trường tạo bởi mảng Halbach	56
Hình 2.11 Khả năng phục hồi theo chiều cao nam châm khác nhau	57
Hình 2.12 Khả năng phục hồi theo chiều rộng nam châm.....	58
Hình 2.13 Khả năng phục hồi bằng ruy MRF theo các phương pháp sắp xếp mảng nam châm khác nhau	59
Hình 2.14 Mối quan hệ giữa từ trường và mômen từ tác dụng lên hạt từ tính trong quy trình đánh bóng MRF.....	60
Hình 2.15 Độ dốc và cường độ từ trường thu được thông qua các phương pháp sắp xếp nam châm khác nhau.....	61
Hình 2.16 Mật độ từ thông dưới tác động của các từ trường khác nhau được áp dụng	65
Hình 2.17 Mật độ từ thông với các mảng từ trường khác nhau	65
Hình 2.18 Nguyên lý đánh bóng MRF và cơ chế bóc tách vật liệu với mảng Halbach cải tiến.....	66
Hình 2.19 Ảnh hưởng của mảng Halbach cải tiến đến lực từ tác dụng lên các hạt từ Fe_3O_4	68
Hình 2.20 Phân tích từ trường với mảng Halbach thông thường và mảng Halbach cải tiến tại khu vực đánh bóng ($z=5$ mm).....	69
Hình 2.21 Kết quả đo và mô phỏng từ thông đo theo hướng X.....	70
Hình 2.22 Lực từ tác dụng lên các hạt từ tính hạt từ Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2 dưới tác dụng của mảng Halbach cải tiến	73
Hình 2.23 Đặc điểm chuyển động của dải băng ruy MRF dưới tác động của mảng Halbach tịnh tiến	78
Hình 3.1 Hình ảnh thiết bị thực nghiệm đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V trên máy CNC 5 trục DMU50.....	84
Hình 3.2 Thiết bị đo lực Kistler Type 9139AA	87

Hình 3.3 Thiết bị đo nhám bề mặt Keyence VHX 7000.....	88
Hình 3.4 Thiết bị đo pH và máy khuấy dung dịch từ tính trước khi đánh bóng.....	89
Hình 3.5 Thiết bị đo cường độ từ trường KT-101 và nhám bề mặt Sj-201	89
Hình 3.6 Cân chính xác ViBRA phôi trước và sau khi đánh bóng	90
Hình 3.8 Sơ đồ nguyên lý đánh bóng MRF với mảng Halbach cải tiến	92
Hình 3.9 Áp lực tác dụng lên băng ruy MRF trong quy trình đánh bóng.....	97
Hình 3.10 Độ nhám bề mặt phôi Ti-6Al-4V theo thời gian bởi các quy trình CMP ..	99
Hình 3.11 Nhám bề mặt phôi Ti-6Al-4V thu được theo thời gian và dung dịch MRF khác nhau	100
Hình 3.12 Hiệu suất đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V bởi dung dịch MRF theo độ pH khác nhau	103
Hình 3.13 Hiệu quả đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V theo nồng độ H_2O_2	105
Hình 3.14 Khả năng bóc tách vật liệu và chất lượng bề mặt của phôi Ti-6Al-4V trong các khoảng thời gian đánh bóng khác nhau	110
Hình 3.15 Hình thái bề mặt của phôi Ti-6Al-4V theo thời gian đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi.....	111
Hình 4.1 Thiết bị đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi.....	114
Hình 4.2 Thành phần lực F_T và F_N thay đổi theo hành trình kép của mảng Halbach: (a) 25 hành trình kép mỗi phút, (b) 15 hành trình kép mỗi phút.....	116
Hình 4.3 Kết quả xác định lực đánh bóng F_T và F_N theo lý thuyết và thực nghiệm khi thay đổi thể tích dung dịch MRF	117
Hình 4.4 Cường độ từ trường thay đổi theo khoảng cách làm việc K	118
Hình 4.5 Lực đánh bóng F_T và F_N thay đổi theo khoảng cách làm việc K	119
Hình 4.6 Lực đánh bóng F_T và F_N thay đổi theo tốc độ phôi.....	120
Hình 4.7 Sai số lực F_T và F_N giữa kết quả đánh bóng thực nghiệm và lý thuyết.....	120
Hình 4.8 Giá trị sai số MRR_{NT} , MRR_T và MRR_N so với thực nghiệm (MRR)	124

Hình 4.9 Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu.....	127
Hình 4.10 Hình thái bề mặt phôi Ti-6Al-4V theo các điều kiện đánh bóng khác nhau	128
Hình 4.11 Nhám bề mặt và MRR trong các quy trình đánh bóng MRF sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi.....	130
Hình 4.12 Các giá trị S_j tương ứng của từng yếu tố.....	131
Hình 4.13 M_{ij} với R_a và MRR khi đánh bóng phôi Ti-6Al-4V bằng dung dịch MRF theo các thí nghiệm trực giao.....	132
Hình 4.14 Bề mặt phôi Ti-6Al-4V sau khi đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi theo các điều kiện công nghệ tối ưu	134
Hình P1.1 Giao diện mô phỏng với mô hình 3D, 2D và 1D trong phần mềm COMSOL Multiphysics.....	158
Hình P1.2 Lựa chọn đặc tính vật lý và tính chất hình học.....	158
Hình P1.3 Thiết lập môi trường mô hình mô phỏng.....	159
Hình P1.4 Thiết lập mô hình phân tích hàm hồi phục	159
Hình P1.4 Lựa chọn đối tượng và gán vật liệu	159
Hình P1.5 Thiết lập vật liệu cho nam châm.....	160
Hình P1.6 Các thiết lập gán vật liệu và các đặc tính của vật liệu	160
Hình P1.7 Thiết lập cực từ cho mảng Halbach	160
Hình P1.8 Chia lưới phần tử trong mô phỏng với COMSOL Multiphysics.....	161
Hình P1.9 Thiết lập thời gian và quá trình mô phỏng.....	161
Hình P1.10 Thiết lập và trích xuất kết quả	161
Hình P1.11 Phân tích sự thay đổi từ trường qua biểu đồ 3D để đánh giá độ hồi phục	162

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1 Một số phương pháp đánh bóng từ tính cho bề mặt hợp kim titanium dạng nanomet.....	22
Bảng 2.1 Vật liệu trong đánh bóng MRF với màng Halbach tịnh tiến khứ hồi.....	71
Bảng 2.2 Các thông số hạt từ Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2	72
Bảng 3.1 Thông số kỹ thuật của trung tâm gia công DMU50	85
Bảng 3.2 Thành phần hóa học của hợp kim Ti-6Al-4V [105].....	86
Bảng 3.3 Thành phần dung dịch MRF với hạt mài SiO_2 và hạt từ tính Fe_3O_4 được sử dụng.....	86
Bảng 3.4 Các thông số đánh bóng với màng Halbach cải tiến	91
Bảng 3.5 Thông số kỹ thuật vật liệu cho quy trình đánh bóng MRF với màng Halbach tịnh tiến khứ hồi	93
Bảng 3.6 Các thông số của hạt từ tính Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2	93
Bảng 3.7 Thành phần hỗn hợp đánh bóng MRF	96
Bảng 3.8 Dung dịch MRF tối ưu trong đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V	106
Bảng 4.1 Các thông số thực nghiệm xác định hệ số ϵ và θ	115
Bảng 4.2 Kiểm chứng thực nghiệm các mô hình lực đánh bóng F_T và F_N	115
Bảng 4.3 Các yếu tố và mức trong quy trình đánh bóng MRF đề xuất	125
Bảng 4.4 Các thí nghiệm trực giao đánh bóng MRF cho hợp kim Ti-6Al-4V	125
Bảng P1.1 Thông số thiết lập của vật liệu nam châm.....	162
Bảng P1.2 Thiết lập đặc tính vật lý hạt từ tính Fe_3O_4 trong mô phỏng COMSOL Multiphysics.....	163

DANH MỤC CÁC TỪ, CỤM TỪ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
MRF	Magnetorheological Fluid	Dung dịch từ tính
MRR	Material Removal Rate	Khả năng loại bỏ vật liệu
CMP	Chemical Mechanical Polishing	Đánh bóng cơ học hóa học
EDM	Electrical Discharge Machining	Phương pháp xung điện
MMRF	Multi-Magnetic Pole Magnetorheological Finishing	Đánh bóng từ tính đa cực từ
CIP	Carbonyl Iron Particles	Hạt sắt cacbonyl
CI	Carbonyl Iron	Sắt cacbonyl
AP	Abrasive Particles	Hạt mài
RMRF	Rotational Magnetorheological Finishing	Đánh bóng từ tính quay
WMRF	Wheel Magnetorheological Finishing	Quy trình đánh bóng từ tính sử dụng bánh mài
BEMRF	Ball-End Magnetorheological Finishing	Quy trình đánh bóng từ tính sử dụng đầu cầu
MTC	Magnetic Trajectory Control	Quỹ đạo từ
AFF	Abrasive Flow Finishing	Quá trình hoàn thiện bề mặt bằng dòng hạt mài
AFM	Abrasive Flow Machining	Gia công sử dụng dòng hạt mài

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
CMMRF	Chemo-Mechanical Magneto-rheological Finishing	Quá trình hoàn thiện bề mặt sử dụng cơ hóa học kết hợp với dung dịch từ tính
MRAFF	Magneto-rheological Abrasive Flow Finishing	Quá trình hoàn thiện bề mặt bằng dòng hạt mài từ lưu biến
MFAF	Magnetic Field Assisted Finishing process	Quá trình hoàn thiện bề mặt có hỗ trợ từ trường
MAF	Magnetic Abrasive Finishing	Quá trình hoàn thiện bề mặt bằng hạt mài từ tính
R-MRAFF	Rotational Magneto-rheological Abrasive Flow Finishing Process	Quá trình hoàn thiện bề mặt bằng dòng hạt mài từ lưu biến có chuyển động quay
CMRF	Chemical Magnetorheological Finishing	Đánh bóng lai từ tính và hóa học
CNC	Computer Numerical Control	Máy gia công điều khiển số
PV	Peak-to-Valley	Giá trị đỉnh trên bề mặt mẫu
RMS	Root Mean Square roughness	Giá trị độ nhám sai phương trung bình
EDM	Electrical Discharge Machining	Phương pháp xung điện
Cực N	North pole	Cực bắc
Cực S	South pole	Cực nam
β -TNTZ	Beta-Type Titanium-Niobium-Tantalum-Zirconium alloy	Hợp kim Titanium loại beta gồm Niobium -Tantalum-Zirconium

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
3D-AFM	3D-Atomic Force Microscopy	Thiết bị đo kính hiển vi lực nguyên tử ba chiều
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining	Gia công bằng tia lửa điện
MRI	Magnetic Resonance Imaging	Thiết bị chụp ảnh cộng hưởng từ
MR	Magnetorheological	Từ lưu biến
MRPS	Magnetorheological Polishing Slurry	Dung dịch đánh bóng từ tính
Cực S	South pole	Cực nam
SEM	Scanning Electron Microscope	Kính hiển vi điện tử quét
β -TNTZ	Beta-Type Ti-Ni-Ta-Zr alloy	Hợp kim Titanium loại beta gồm Niobium -Tantalum-Zirconium

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

Ký hiệu	Diễn giải	Đơn vị
B_M	Cường độ từ trường	T
F_N	Lực pháp tuyến	N
F_T	Lực tiếp tuyến	N
F_G	Lực hấp dẫn	N
F_M	Lực từ	N
V_ρ	Thể tích hạt từ tính	m^3
M	Độ từ hóa	A/m
$m = M \times V_\rho$	Mô men từ	Am^2
$\mu_0 = 1.26 \left(\frac{\mu N}{A^2} \right)$	Độ cảm từ	-
$\chi_\rho = \mu_\rho - 1$	Tính thấm từ tương đối	-
C1	Chuyển động tịnh tiến của mảng Halbach	chu kỳ/phút
C2	Khoảng cách làm việc	mm
C3	Tốc độ phi	vòng/phút
C4	Thể tích MRF	ml
Ra	Độ nhám trung bình số học	nm
λ	Bước sóng của ánh sáng	nm
P	Áp lực đánh bóng	N/m^2
τ	Ứng suất cắt	N/m^2
φ	Khối lượng của các hạt CIPs trong MRPS	g
r	Bán kính của các hạt CIPs	m
χ	Độ từ cảm của các hạt CIPs	-
B	Mật độ từ thông	T
μ_0	Độ thấm từ chân không	H/m
η	Độ nhớt hiệu dụng	$Pa \cdot s$
$\dot{\gamma}$	Thành phần đặc trưng của tốc độ cắt	m/s
θ_i	Nhiệt độ	$^{\circ}C$

χ_{ρ}	Độ cảm từ đơn lẻ	-
$\chi_{\rho} = \mu_{\rho} - 1$	Độ thẩm từ tương đối của các hạt từ tính Fe_3O_4	-
R	Bán kính của hạt từ tính Fe_3O_4	μm
μ_f	Độ thẩm từ tuyệt đối của dung dịch mang	H/m
H	Đại lượng cường độ từ trường	A/m
v_{ρ}	Vận tốc của hạt từ tính	m/s
g	Gia tốc trọng trường	m/s^2
v_f	Vận tốc dung dịch	m/s
ρ_f, ρ_{ρ}	Khối lượng riêng dung dịch mang và hạt từ tính	kg/m^3
V_{ρ}	Thể tích hạt từ tính	m^3
B_{XZ}	Mật độ từ thông theo phương XZ	T
B_{XX}	Mật độ từ thông theo phương XX	T
$ B $	Mật độ từ thông tổng hợp	T
$F_{\text{Fe}_3\text{O}_4-Z}$	Lực tác dụng lên các hạt từ Fe_3O_4 theo phương thẳng đứng (phương z)	N
F_{SiO_2-Z}	Lực tác dụng lên các hạt từ SiO_2 theo phương thẳng đứng (phương z)	N
$\chi_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$	Độ cảm từ của hạt từ tính Fe_3O_4	-
$V_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$	Thể tích của hạt từ tính Fe_3O_4	m^3
V_{SiO_2}	Thể tích của hạt SiO_2	m^3
H_X, H_Y , và H_Z	Từ trường theo phương X, Y, Z	A/m
$\frac{\partial H_Z}{\partial x}, \frac{\partial H_Z}{\partial y}, \frac{\partial H_Z}{\partial z}$	Độ dốc H_Z theo các hướng X, Y và Z tương ứng	-
$\rho_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$	Khối lượng riêng hạt từ tính Fe_3O_4	kg/m^3
ρ_{SiO_2}	Khối lượng riêng hạt mài SiO_2	kg/m^3
μ	Độ thẩm từ dung dịch	H/m
n	Số lượng các hạt từ trong một chuỗi	-
α	Góc nghiêng chống biến dạng cắt	rad
E_k	Độ nhạy thể tích hạt từ	-

ρ	Mật độ của hỗn hợp Fe_3O_4 - SiO_2	kg/m^3
χ_m	Đường cong từ trễ	-
G	Nồng độ hạt từ tính Fe_3O_4 trong dung dịch MRF	-
K	Khoảng cách làm việc	mm
A	Diện tích phôi trong vùng đánh bóng	mm^2
s	Khoảng cách trung bình giữa các chuỗi từ tính lân cận	-
Δ	Tổng mật độ thể tích của các hạt từ tính Fe_3O_4 trong dung dịch MRF	-
ε	Hệ số mũ đại diện cho mức độ dịch chuyển của hạt mài	-
θ	Hệ số góc	-
α	Độ lệch chuẩn	-
F_{σ_0}	Lực pháp tuyến tác dụng lên phôi khi không có chuyển động tịnh tiến	N
F_{τ_0}	Lực tiếp tuyến tác dụng lên phôi khi không có chuyển động tịnh tiến	N
l_1	Độ dài của khâu kết nối với động cơ	mm
l_2	Chiều dài thanh truyền	mm
l_3	Chiều dài khâu di chuyển qua lại	mm
n_1	Tốc độ động cơ 1	vòng/phút
φ_1	Vận tốc góc của khâu 1	rad/phút
ω_1	Vận tốc góc tuyệt đối của khâu l_1	rad/phút
ω_2	Vận tốc góc tuyệt đối của khâu l_2	rad/phút
v	Vận tốc dọc tuyệt đối của thanh trượt D	m/s
ε_1	Gia tốc góc tuyệt đối của khâu l_1	rad/s^2
ε_2	Gia tốc góc tuyệt đối của khâu l_2	rad/s^2
a	Gia tốc thẳng tuyệt đối của thanh trượt D	m/s^2
F_{τ_i}	Lực quán tính tiếp tuyến	N

MH_2	axit malic	-
ΔM	Độ giảm khối lượng phôi Ti-6Al-4V trước và sau khi đánh bóng	mg
M_1 và M_2	Khối lượng phôi Ti-6Al-4V trước và sau khi đánh bóng	mg
T	Thời gian đánh bóng	phút
K	Khoảng cách làm việc	mm
k_{PN}	Hệ số ảnh hưởng lực pháp tuyến và tiếp tuyến	-
λ, δ và γ	Hệ số mũ biểu thị ảnh hưởng của F_N, F_T và V đến khả năng loại bỏ vật liệu	-
S_j	Phạm vi kích thước	-
M_{ij}	Giá trị trung bình phạm vi kích thước	-
$M_{ij\max}$	Giá trị phạm vi trung bình lớn nhất	-
$M_{ij\min}$	Giá trị phạm vi trung bình nhỏ nhất	-

MỞ ĐẦU

1. LÝ DO LỰA CHỌN ĐỀ TÀI

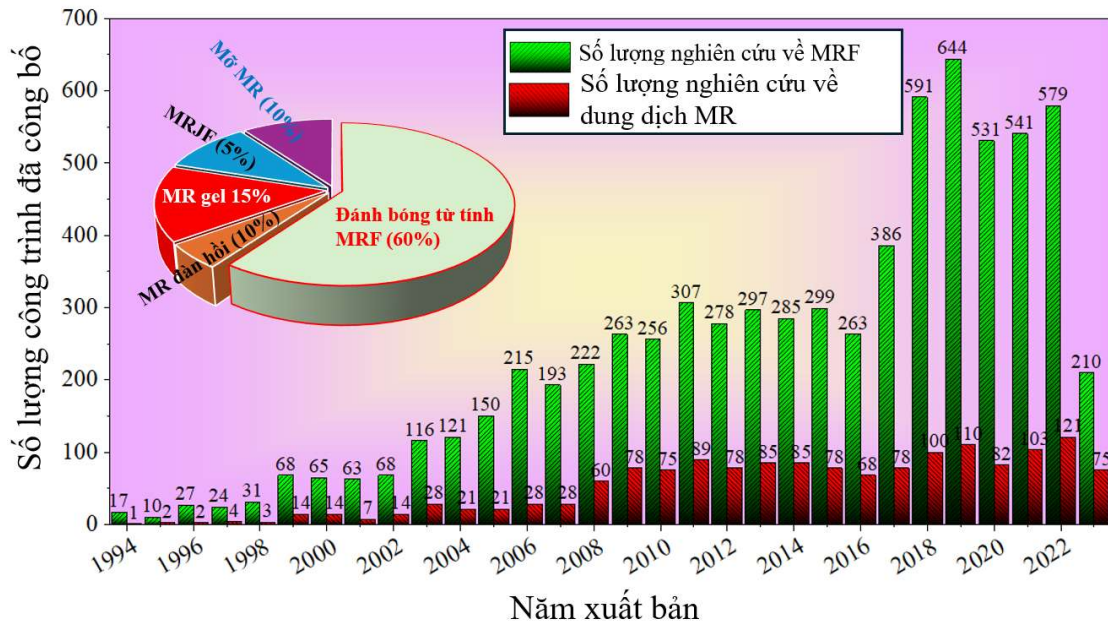
Hợp kim Ti-6Al-4V là một trong những vật liệu được ứng dụng phổ biến trong các ngành công nghệ tiên tiến điển hình như hàng không vũ trụ, y sinh, ô tô và hệ thống vi cơ điện tử (MEMS), nhờ các đặc tính ưu việt như tỷ trọng thấp (chỉ bằng 56% thép không gỉ), khả năng chịu nhiệt vượt trội, độ bền cơ học cao và chống ăn mòn tốt [1-3]. Trong các ứng dụng chịu tải trọng quay và nhiệt độ cao, như trục tua-bin, trục động cơ phản lực hay trục bánh hạ cánh, những vi khuyết hình thành trong quá trình gia công như các vết xước bề mặt là nguồn khởi phát chủ yếu của các vết nứt do mỏi, làm giảm đáng kể khả năng chịu tải và độ tin cậy của chi tiết [4, 5]. Tuy nhiên, với đặc tính mô đun đàn hồi thấp, độ cứng và độ bền cao, cùng khả năng dẫn nhiệt kém, Ti-6Al-4V được xếp vào nhóm vật liệu khó gia công, dễ phát sinh lỗi bề mặt đối với các công nghệ gia công truyền thống [6, 7]. Quá trình gia công nhằm giảm độ nhám và loại bỏ vết xước không chỉ góp phần nâng cao tuổi thọ mỏi mà còn nâng cao hiệu quả vận hành của chi tiết, đặc biệt trong môi trường làm việc khắc nghiệt [8, 9].

Trong bối cảnh các hình thức gia công truyền thống tiêu biểu gồm đánh bóng cơ học, hóa học hay điện hóa bộc lộ những giới hạn về độ chính xác và phạm vi ứng dụng trên chi tiết hình học phức tạp, công nghệ đánh bóng sử dụng chất lỏng từ tính (MRF) nổi lên như một giải pháp tiên tiến, cho phép kiểm soát chính xác lực tác động và khả năng bóc tách vật liệu trong quá trình gia công, giúp đạt được độ bóng ở cấp độ nanomet [10-12]. MRF đặc biệt hiệu quả khi áp dụng cho vật liệu khó gia công như kính quang học, ceramic, hợp kim siêu bền và gần đây là hợp kim titanium.

Công nghệ đánh bóng từ lưu biến (MRF) được đề xuất và phát triển từ thập niên 1970 bởi nhóm nghiên cứu của Kordonsski đã phát triển mạnh mẽ và trở

thành kỹ thuật gia công siêu chính xác tiêu biểu hiện nay [13-15]. Phương pháp này sử dụng chất lỏng từ tính, một loại chất lỏng thông minh có khả năng thay đổi độ nhớt dưới tác động của từ trường ngoài, cho phép điều chỉnh lực đánh bóng một cách chính xác và linh hoạt [16, 17]. Khi có từ trường ngoài tác dụng, hỗn hợp MRF chuyển sang trạng thái bán rắn, giúp loại bỏ vật liệu một cách linh hoạt nhưng hiệu quả, trong khi không gây hỏng bề mặt chi tiết. Với khả năng tạo ra nhám bề mặt cấp nanomet, công nghệ đánh bóng MRF đặc biệt phù hợp khi xử lý các chi tiết có hình dạng hình học phức tạp hoặc vật liệu khó gia công như ceramic, thấu kính quang học hay hợp kim Ti-6Al-4V. Khác với kỹ thuật truyền thống như mài và đánh bóng cơ học, đánh bóng MRF giảm thiểu nhiệt và lực tác động, hạn chế vết xước và biến dạng bề mặt, qua đó cải thiện đáng kể khả năng chịu mỏi và hiệu quả làm việc của chi tiết. Với khả năng tạo ra bề mặt đạt độ nhám cấp nanomet, lực tác động thấp và sinh nhiệt tối thiểu, công nghệ đánh bóng từ tính (MRF) đang trở thành giải pháp đầy triển vọng áp dụng cho gia công hợp kim Ti-6Al-4V [18-20]. Đây là loại vật liệu chiến lược trong hàng không, y sinh và quốc phòng, tuy nhiên được xếp vào nhóm vật liệu có tính gia công khó do đặc tính cơ lý phức tạp như mô đun đàn hồi thấp, độ dẫn nhiệt kém và độ cứng cao. Các phương pháp truyền thống thường gây vết xước sâu trên bề mặt, biến dạng hoặc ảnh hưởng đến cấu trúc vật liệu [21, 22], trong khi công nghệ đánh bóng MRF giúp duy trì tính toàn vẹn bề mặt và nâng cao độ bền mỏi. Tuy nhiên, các ứng dụng đánh bóng MRF cho vật liệu Ti-6Al-4V vẫn còn ít được nghiên cứu, tạo ra khoảng trống lớn khi áp dụng các kỹ thuật gia công chính xác cho loại vật liệu này. Các nỗ lực nghiên cứu được triển khai nhằm nâng cao hiệu quả đánh bóng MRF cho hợp kim này không chỉ khắc phục hạn chế vốn có của các công nghệ truyền thống, đồng thời mang lại hướng tiếp cận hiệu quả cho chế tạo các chi tiết cần đảm bảo yêu cầu nghiêm ngặt về độ chính xác kích thước và chất lượng bề mặt. Ngoài ra, Hình 1 thể hiện rõ xu hướng tăng trưởng mạnh mẽ

các nghiên cứu học thuật có liên quan đến chất lỏng từ tính và công nghệ MRF trên Web of Science từ năm 1994 đến 2022. Điều này cho thấy mức độ chú ý ngày càng cao từ phía cộng đồng khoa học đối với công nghệ này, nhất là trong xu thế đòi hỏi ngày càng nghiêm ngặt về độ chính xác và độ hoàn thiện bề mặt trong các ngành công nghệ cao.



Hình 1 Các công trình nghiên cứu liên quan đến chất lỏng và công nghệ đánh bóng MRF từ năm 1994 đến năm 2022

Một số nghiên cứu gần đây, thông qua cả phương pháp thực nghiệm và mô phỏng, đã được tiến hành nhằm xem xét ảnh hưởng của mật độ từ trường đến hiệu suất đánh bóng trong quá trình MRF [23], [24]. Tuy nhiên, đa số công trình tập trung vào việc cải thiện và tối ưu hóa cường độ từ trường thông qua các cấu hình sắp xếp nam châm đơn giản, chưa khai thác hiệu quả các thiết kế mảng từ trường cải tiến. Do đó, khả năng cải thiện độ hoàn thiện bề mặt và hiệu quả loại bỏ vật liệu thông qua tối ưu hóa cường độ từ trường là một hướng nghiên cứu chưa được khai thác đầy đủ. Một hướng tiếp cận tiềm năng để nâng cao hiệu suất đánh bóng MRF thông qua tăng cường độ từ trường thông qua phương pháp sắp

xếp nam châm theo mảng Halbach [25, 26]. Mảng từ trường Halbach giúp tăng cường độ từ trường và mở rộng vùng từ trường về một phía do đó tăng hiệu quả đánh bóng trong các quy trình MRF. Trong máy gia tốc hạt, động cơ hiệu suất cao, thiết bị chụp cộng hưởng từ và máy phân tích từ trường, mảng Halbach được ứng dụng phổ biến để tạo ra từ trường cường độ cao tập trung ở một bên trong khi sử dụng số lượng nam châm nhỏ [27, 28]. Hơn nữa, mảng Halbach dễ dàng mở rộng vùng tạo từ trường, từ đó giúp tăng cường hiệu quả đánh bóng từ tính khi áp dụng xử lý bề mặt những chi tiết có kích thước lớn.

Xuất phát từ những thách thức trong gia công chính xác hợp kim Ti-6Al-4V nghiên cứu sinh đưa ra một phương pháp tiếp cận mới thông qua đề tài: **“NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG BỀ MẶT KHI ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH HỢP KIM TI-6AL-4V”**. Dựa trên hướng tiếp cận mới được xây dựng từ kết hợp công nghệ đánh bóng MRF với cấu hình mảng từ Halbach được tối ưu nhằm tăng cường độ từ trường và mở rộng vùng đánh bóng, từ đó nâng cao hiệu suất loại bỏ vật liệu đồng thời đảm bảo độ chính xác cao và nhám bề mặt ở cấp độ nanomet. Một điểm cải tiến quan trọng khác được thiết lập thông qua dung dịch MRF mới sử dụng các thành phần an toàn và bền vững với môi trường như Fe_3O_4 , SiO_2 , H_2O_2 , axit malic và nước tinh khiết. Hệ dung dịch từ tính được thiết lập với mục tiêu duy trì hiệu quả đánh bóng, đồng thời hạn chế các ảnh hưởng tiêu cực tới sức khỏe con người và môi trường, qua đó đáp ứng định hướng sản xuất xanh.

2. MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN

Mục tiêu chung

Nghiên cứu và phát triển quy trình đánh bóng từ tính (MRF) chi tiết vật liệu hợp kim Ti-6Al-4V đạt được nhám bề mặt cỡ nanomet.

Mục tiêu cụ thể

- Thiết kế thiết bị đánh bóng từ tính sử dụng mảng Halbach cải tiến tăng cường độ và mở rộng vùng tác động của từ trường.
- Phân tích lựa chọn dung dịch đánh bóng MRF sử dụng các hạt từ tính Fe_3O_4 , hạt mài SiO_2 , chất oxy hóa H_2O_2 và axit malic nhằm đảm bảo hiệu suất cao trong khi vẫn an toàn với môi trường.
- Xác minh mô hình toán học lực cắt thông qua phân tích thực nghiệm. Tích hợp phương trình Preston với các thành phần lực F_T và F_N trong mô hình toán học nhằm cải thiện độ chính xác của các dự đoán khả năng loại bỏ vật liệu (MRR).

3. Ý NGHĨA KHOA HỌC VÀ THỰC TIỄN

Ý nghĩa khoa học

Nghiên cứu đã đề xuất và hoàn thiện mô hình lý thuyết cho quá trình đánh bóng từ lưu biến (MRF) sử dụng mảng Halbach cải tiến, qua đó làm rõ cơ chế loại bỏ vật liệu cũng như phân tích chi tiết các lực tác động lên hạt mài và hạt từ tính dưới ảnh hưởng của trường từ.

Một mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi cải tiến được thiết lập nhằm tạo ra vùng từ trường mạnh và rộng trong các quy trình MRF. Các thí nghiệm được thiết lập nhằm đánh giá hiệu suất đánh bóng cũng như khả năng loại bỏ vật liệu của hợp kim Ti-6Al-4V, một vật liệu khó gia công và có ý nghĩa quan trọng trong các ứng dụng hàng không vũ trụ, y sinh, công nghiệp quốc phòng.

Nghiên cứu đã phát triển một dung dịch MRF thân thiện với môi trường, đồng thời tiến hành phân tích tác động của các yếu tố công nghệ như khoảng cách làm việc, tốc độ quay của phôi và thể tích dung dịch đến nhám bề mặt và năng lực bóc tách vật liệu. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở lý thuyết quan trọng, hỗ trợ nâng cao chất lượng bề mặt trong các ứng dụng gia công chính xác

hợp kim Ti-6Al-4V, tạo điều kiện thuận lợi cho việc áp dụng công nghệ đánh bóng từ tính theo hướng xanh và bền vững.

Ý nghĩa thực tiễn

Kết quả nghiên cứu đóng vai trò quan trọng trong việc xác định và lựa chọn các thông số kỹ thuật cho quy trình đánh bóng từ tính hợp kim titanium và được sử dụng như một nguồn tài liệu tham khảo để hỗ trợ nghiên cứu khoa học, đào tạo và phát triển các kỹ thuật gia công và đánh bóng từ tính. Công trình này tạo nền tảng triển khai công nghệ đánh bóng tiên tiến và linh hoạt, nhằm tối ưu hóa năng suất và chất lượng bề mặt trong các lĩnh vực sản xuất chính xác cao.

4. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU

Đối tượng nghiên cứu

Thiết lập mảng Halbach cải tiến nhằm tạo ra từ trường mạnh cùng diện tích tác dụng lớn ở vùng đánh bóng từ tính MRF chi tiết hợp kim Ti-6Al-4V.

Thiết lập dung dịch đánh bóng từ tính MRF thân thiện với môi trường trên nền hạt từ tính Fe_3O_4 , hạt mài SiO_2 , chất oxy hóa H_2O_2 , nước tinh khiết và axit malic, nhằm nâng cao khả năng loại bỏ vật liệu và nhám bề mặt ở mức nanomet.

Phạm vi nghiên cứu

Đánh giá đặc trưng chất lượng bề mặt kết hợp với khả năng loại bỏ vật liệu của quá trình đánh bóng từ tính (MRF) đối với hợp kim Ti-6Al-4V sử dụng dung dịch MRF thân thiện với môi trường bao gồm: hạt từ Fe_3O_4 , hạt mài SiO_2 , chất oxy hóa H_2O_2 và axit malic, kết hợp với mảng Halbach cải tiến. Các thông số nghiên cứu bao gồm:

- Thông số đánh bóng MRF: tốc độ phi (200 ÷ 600 vòng/phút), khoảng cách làm việc (1.0 ÷ 2.0 mm), số chu kỳ chuyển động qua lại của mảng Halbach (15 ÷ 30 chu kỳ/phút), thể tích dung dịch MRF (300 ÷ 600 ml).

- Thông số dung dịch MRF: H_2O_2 ($0.5 \div 1.5\%$ theo thể tích), giá trị pH của dung dịch ($4 \div 6$).

5. NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI

Một mảng Halbach cải tiến với vùng từ trường mạnh cùng gradient cao được đề xuất giúp tăng lực đánh bóng qua đó nâng cao khả năng bóc tách vật liệu, giúp nâng cao hiệu quả đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V.

Quy trình đánh bóng MRF sử dụng dung dịch thân thiện với môi trường gồm hạt mài SiO_2 , Fe_3O_4 , chất oxy hóa H_2O_2 và axit malic, cho hiệu quả bóc tách vật liệu cao với nhám bề mặt ở dạng nanomet và giảm thiểu tác động đến môi trường, đồng thời phù hợp với định hướng phát triển sản xuất bền vững.

Mô hình toán học mô tả lực tiếp tuyến và pháp tuyến đạt độ chính xác cao (sai số $<16\%$), cho phép dự đoán hiệu suất bóc tách vật liệu và đạt được bề mặt siêu mịn, hứa hẹn mở rộng ứng dụng trong các ngành đòi hỏi tiêu chuẩn cao về chính xác như hàng không, y tế và hóa dầu.

6. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Luận án áp dụng phương pháp nghiên cứu kết hợp giữa phân tích lý thuyết và khảo sát thực nghiệm và mô phỏng cho quá trình đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V. Cụ thể, các bước thực hiện bao gồm:

Nghiên cứu lý thuyết: Đánh giá vai trò của các yếu tố công nghệ chi phối quá trình đánh bóng từ tính, bao gồm cường độ từ trường, tốc độ quay phi, tốc độ di chuyển mảng Halbach, khoảng cách làm việc và thể tích dung dịch MRF. Từ các kết quả phân tích lý thuyết, nghiên cứu này xây dựng mô hình toán học để biểu diễn lực đánh bóng tiếp tuyến (F_T) và pháp tuyến (F_N), đồng thời đánh giá khả năng loại bỏ vật liệu (MRR) của quy trình MRF sử dụng dung dịch thân thiện với môi trường chứa các hạt từ Fe_3O_4 , hạt mài SiO_2 , H_2O_2 và axit malic.

Nghiên cứu mô phỏng: Ứng dụng phần mềm COMSOL Multiphysics để mô phỏng từ trường giúp xác định phương pháp sắp xếp mảng Halbach cải tiến, tạo ra lực từ mạnh với gradient cao tập trung một phía, qua đó nâng cấp thiết kế và cải thiện hiệu quả đánh bóng từ tính MRF.

Nghiên cứu thực nghiệm: Các thực nghiệm đánh bóng MRF trên hợp kim Ti-6Al-4V được thiết lập nhằm kiểm chứng mô hình toán học được thiết lập. Quá trình thực nghiệm được triển khai bằng cách điều chỉnh các thông số công nghệ như nồng độ H_2O_2 , pH của dung dịch, khoảng cách làm việc và tốc độ di chuyển của mảng Halbach. Sử dụng các kỹ thuật thống kê được áp dụng để xử lý và phân tích kết quả thí nghiệm, đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến chất lượng bề mặt cũng như khả năng loại bỏ vật liệu.

Kỹ thuật tối ưu hóa được áp dụng nhằm đề xuất bộ thông số công nghệ hiệu quả cho quá trình đánh bóng MRF cho hợp kim Ti-6Al-4V, sử dụng các hạt mài SiO_2 , hạt từ tính Fe_3O_4 , chất oxy hóa H_2O_2 và axit malic thân thiện với môi trường. Quy trình nghiên cứu được triển khai theo các bước sau:

- Phân tích yếu tố đơn lẻ: Mỗi tham số tác động đến quá trình đánh bóng được phân tích độc lập với mục tiêu làm rõ tác động mà chúng gây ra. Các nhân tố gồm kích thước mảng Halbach, tốc độ quay của phôi, khoảng cách làm việc, và thể tích dung dịch MRF.
- Thiết kế thí nghiệm: Quá trình thực nghiệm dựa trên phân tích trực giao và sử dụng cách tiếp cận phạm vi để xác định phương pháp gia công tối ưu. Bằng cách thay đổi các tham số thực nghiệm, mô hình tối ưu hóa phát triển để dự đoán khả năng loại bỏ vật liệu (MRR) cũng như chất lượng bề mặt. Phân tích đa yếu tố được thực hiện thông qua phân tích tương tác, cho phép đánh giá tác động đồng thời của nhiều tham số công nghệ đến kết quả đánh bóng. Các thử nghiệm được triển khai với các biến công nghệ được điều

chỉnh như khoảng cách làm việc, thể tích hạt mài, tốc độ của phôi và tốc độ mảng Halbach nhằm xác định mức độ khả thi của mô hình tối ưu.

- Phương pháp phạm vi: Được triển khai nhằm xem xét mức độ chi phối của các yếu tố đối với chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu (MRR). Cụ thể, các yếu tố được phân hạng theo mức độ ảnh hưởng, từ lớn đến nhỏ. Đối với chất lượng bề mặt: $C2$ (khoảng cách làm việc) $> C4$ (thể tích MRF) $> C3$ (tốc độ phôi) $> C1$ (quá trình chuyển động tịnh tiến của mảng Halbach). Đối với MRR: $C2$ (khoảng cách làm việc) $> C4$ (thể tích MRF) $> C1$ (chuyển động tịnh tiến của mảng Halbach) $> C3$ (tốc độ phôi).
- Các tham số gia công được tối ưu hóa bao gồm: tốc độ quay của phôi, số lần lặp kép của mảng Halbach, khoảng cách làm việc và thể tích dung dịch MRF. Qua quá trình thí nghiệm, các điều kiện tối ưu cho chất lượng bề mặt và hiệu suất loại bỏ vật liệu đã được xác định. Quá trình tối ưu hóa xem xét sự thay đổi của nồng độ H_2O_2 và pH của dung dịch được điều chỉnh để đạt được độ bóng tối ưu và tốc độ bóc tách vật liệu vượt trội.
- Xác nhận kết quả: Kết quả thực nghiệm được đối chiếu với mô phỏng nhằm kiểm chứng độ chính xác của mô hình. Sai số giữa lực cắt và lực ép (F_T và F_N) dự đoán và thí nghiệm thực tế luôn dưới 16%, chứng tỏ mô hình đạt độ tin cậy cao.

Cách tiếp cận tối ưu hóa này cho phép nâng cao hiệu quả của quá trình đánh bóng góp phần nâng cao chất lượng bề mặt đồng thời tăng cường khả năng loại bỏ vật liệu của phôi Ti-6Al-4V trong quá trình đánh bóng MRF với mảng Halbach cải tiến.

Thông qua kết hợp song song giữa mô hình hóa lý thuyết và kiểm chứng thực nghiệm, cùng với ứng dụng các công cụ tối ưu hóa, luận án hướng tới việc hoàn thiện quy trình đánh bóng từ tính (MRF) hợp kim Ti-6Al-4V, hướng tới hiệu quả gia công cao và giảm thiểu ô nhiễm.

7. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Luận án được cấu trúc gồm 4 chương:

Chương 1. Nghiên cứu tổng quan các phương pháp đánh bóng từ tính.

Tổng quan nghiên cứu và tiềm năng ứng dụng của công nghệ đánh bóng MRF cho hợp kim Ti-6Al-4V. Tổng hợp, phân tích và đánh giá các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước về công nghệ MRF, trình bày quá trình hình thành và phát triển, nguyên lý vận hành, cùng các ứng dụng thực tế trong gia công bề mặt hợp kim titanium. Đặc biệt, nghiên cứu hướng đến xây dựng và hoàn thiện dung dịch MRF sử dụng các hạt mài SiO_2 và Fe_3O_4 kết hợp với chất ô xi hóa H_2O_2 trong đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V. Từ đó, xác định các nội dung nghiên cứu trọng tâm và các vấn đề chính được luận án tập trung nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu suất và giá trị thực tiễn khi ứng dụng MRF trong đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V.

Chương 2. Xây dựng mô hình đánh bóng từ tính sử dụng mảng Halbach cải tiến

Trên nền tảng nghiên cứu và phân tích chi tiết về nguyên lý đánh bóng từ tính MRF điển hình cùng cơ chế loại bỏ vật liệu và độ nhót biểu kiến của công nghệ đánh bóng MRF dạng đĩa. Nhằm nâng cao hơn nữa khả năng tạo từ trường một mảng từ trường Halbach cải tiến được phát triển dựa trên phân tích lực tác động trong quá trình đánh bóng MRF cho hợp kim Ti-6Al-4V được thiết lập. Nội dung chương này tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố đến lực từ tác dụng lên các hạt từ tính, cũng như lực kéo và lực hấp dẫn trong môi trường từ trường kích thích bởi mảng Halbach. Qua đó, thiết lập mảng Halbach tối ưu cho việc đánh bóng thông qua hàm phức hồi. Bên cạnh đó, chương này tập trung vào việc đánh giá tác động của mảng từ trường Halbach đến các hạt từ tính Fe_3O_4 và SiO_2 , đồng thời thiết lập mô hình toán học lực đánh bóng sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi.

Chương 3: Thiết lập thực nghiệm đánh bóng từ tính sử dụng mảng Halbach cải tiến gia công hợp kim Ti-6Al-4V

Trên cơ sở phân tích đơn nhân tố, các thí nghiệm được triển khai nhằm xác định các thông số công nghệ phù hợp cho đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi. Các quy trình đánh bóng MRF áp dụng cho hợp kim Ti-6Al-4V dựa trên nền hạt mài $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$, axit malic cùng với chất oxy hóa H_2O_2 . Tác động nồng độ H_2O_2 , độ pH đến hiệu suất đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi được nghiên cứu.

Chương 4: Kết quả và phân tích

Trước tiên nội dung của chương tập trung vào nghiên cứu thực nghiệm kiểm tra và xác nhận mô hình lực cắt cùng khả năng bóc tách vật liệu gia công trong đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V khi sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi. Tiếp theo các thực nghiệm trực giao được thiết lập nhằm phân tích tác động kết hợp của các thông số công nghệ bao gồm khoảng cách đánh bóng, thể tích dung dịch, tốc độ quay của phôi và số hành trình kép của mảng Halbach. Phương pháp phân tích phạm vi giúp đánh giá dữ liệu và xác định các thông số công nghệ thích hợp nhất và các yếu tố tác động chính trong quy trình đánh bóng MRF nhằm đạt được chất lượng bề mặt cao và khả năng bóc tách vật liệu cao.

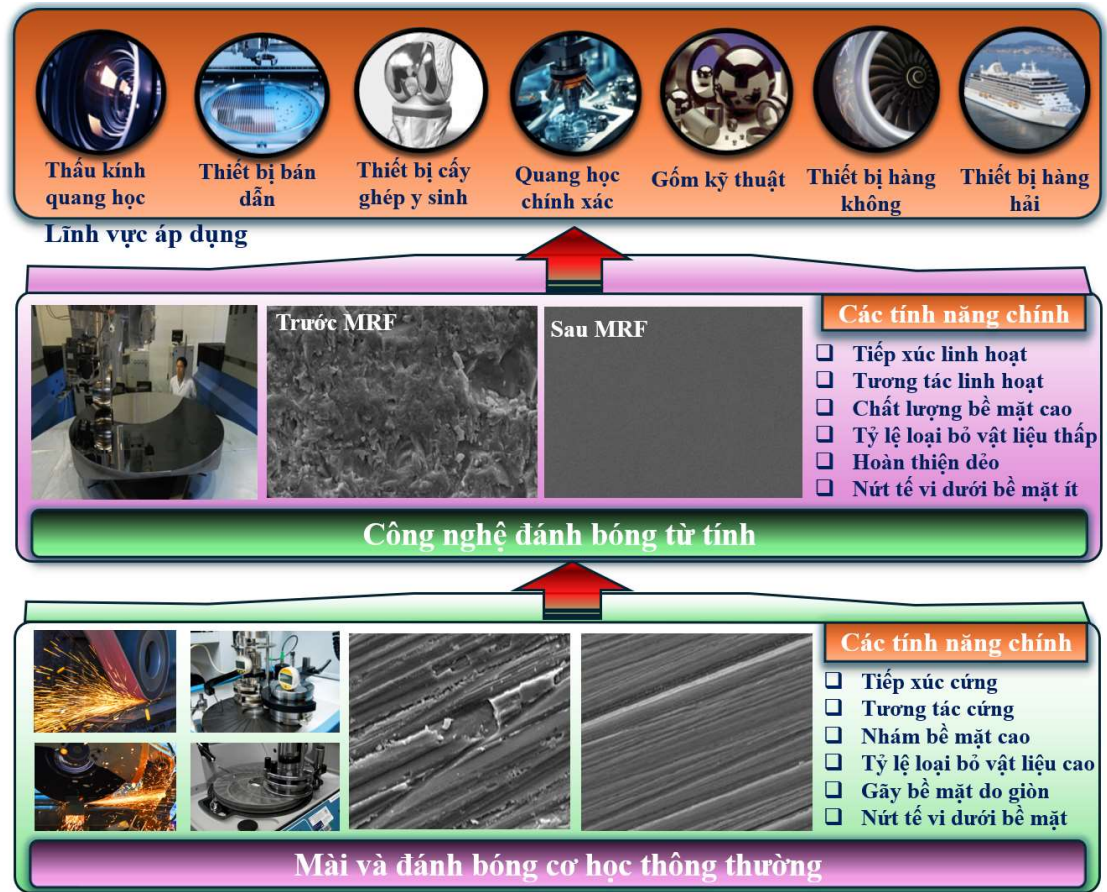
CHƯƠNG 1. NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH

1.1. TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU TRONG VÀ NGOÀI NƯỚC

1.1.1. Tình hình nghiên cứu ngoài nước

Ngày nay, sự phát triển không ngừng của khoa học và công nghệ kéo theo yêu cầu ngày càng cao về chất lượng bề mặt, nhất là trong các ngành khoa học và công nghệ tiên tiến yêu cầu bề mặt sau gia công độ nhám ở mức nanomet. Với các bề mặt chính xác cao cùng nhám bề mặt ở dạng nanomet hoặc dưới nanomet như bộ cộng hưởng hình bán cầu (hàng không vũ trụ), thấu kính và gương quang học, phôi trong ngành sản xuất chip bán dẫn, hay khớp nhân tạo trong y tế, đặt ra thách thức lớn cho kỹ thuật gia công truyền thống [29-32]. Trong số các công nghệ gia công chính xác phổ biến hiện nay, đánh bóng cơ hóa học (CMP) được xem là kỹ thuật hiệu quả nhằm đạt cấp độ nhám nanomet, đáp ứng nhu cầu tăng cao về độ chính xác trong gia công [32, 33]. Tuy nhiên, công nghệ CMP truyền thống thường sử dụng các dung dịch hóa chất độc hại, tiềm ẩn rủi ro môi trường và sức khỏe [34]. Nhằm xử lý những vấn đề nêu trên, các kỹ thuật CMP thân thiện với môi trường được triển khai cho nhiều vật liệu như đồng, sapphire, hợp kim và kim cương [35-37]. Những cải tiến này không chỉ cải thiện chất lượng bề mặt gia công mà còn đáp ứng định hướng phát triển bền vững trong các ngành công nghiệp chính xác như hàng không vũ trụ, bán dẫn và vi cơ điện tử [33, 38]. Song song với đó, các quy trình gia công không tiếp xúc như đánh bóng bằng chùm electron, chùm ion, siêu âm hoặc phát xạ đàn hồi cũng có khả năng đạt bề mặt ở cấp độ nhám nano. Tuy nhiên, những kỹ thuật này thường gặp hạn chế về chi phí cao và hiệu suất thấp [33, 38]. Trong bối cảnh đó, đánh bóng bằng dung dịch từ lưu biến (MRF) được xem như một giải pháp

đầy hứa hẹn. Với cơ chế tiếp xúc mềm giữa dụng cụ và phôi, đánh bóng MRF đảm bảo độ chính xác đồng thời cải thiện khả năng linh hoạt và hiệu quả kinh tế của quá trình gia công.



Hình 1.1 Sự khác biệt giữa đánh bóng cơ học truyền thống và đánh bóng MRF

Với ứng suất tiếp xúc thấp, công nghệ đánh bóng MRF vượt trội trong xử lý các vật liệu có độ cứng và tính giòn cao, giúp ngăn ngừa sai số in dập đặc trưng hình học của dụng cụ cắt trên bề mặt gia công [39, 40]. Quy trình đánh bóng MRF được xem là phương pháp gia công có khả năng điều khiển chính xác lực đánh bóng thông qua kiểm soát lực từ tại khu vực đánh bóng [41, 42]. Ngoài ra, quá trình cung cấp liên tục chất lỏng MRF trong các quy trình đánh bóng đảm bảo lớp đánh bóng linh hoạt được thay mới liên tục, giúp giảm mòn và tạo ra

hàm ảnh hưởng ổn định [43]. Kỹ thuật này không chỉ nâng cao chất lượng bề mặt sau gia công mà còn hỗ trợ sửa đúng profile phôi [44].

Hình 1.1 minh họa công nghệ đánh bóng MRF mang lại chất lượng bề mặt vượt trội so với các kỹ thuật đánh bóng cơ học thông thường. Trong khi các kỹ thuật truyền thống thường tạo ra độ nhám cao, xuất hiện vết nứt vi mô dưới bề mặt và hiện tượng gãy giòn sau gia công, ngược lại công nghệ đánh bóng MRF tạo ra tiếp xúc mềm giữa dụng cụ và phôi qua đó cải thiện hiệu suất loại bỏ vật liệu và giảm hư hại bề mặt. Phương pháp này được ứng dụng phổ biến trong chế tác kim loại và sản xuất thiết bị y tế, bán dẫn, linh kiện quang học, gồm kỹ thuật và các loại thấu kính chuyên dụng. Một ưu điểm nổi bật của đánh bóng MRF thể hiện khả năng ổn định lớp đánh bóng xuyên suốt quá trình gia công. Tính ổn định này góp phần ngăn chặn hiệu quả hiện tượng mòn hạt mài không kiểm soát và gây ra tắc nghẽn hạt mài, một vấn đề thường gặp ở các phương pháp đánh bóng truyền thống. Nhờ đó, công nghệ đánh bóng MRF trở thành lựa chọn hiệu quả cho vật liệu ceramic, gốm thủy tinh, kính borosilicate và hợp kim y sinh. Nhiều nghiên cứu đã khảo sát công nghệ MRF ở các khía cạnh khác nhau. Beidi và cộng sự [13] trình bày các ứng dụng MRF cho nhiều hình dạng bề mặt như lồi, lõm, cầu và tự do, nhưng chủ yếu mang tính tổng quan. Ajay cùng các cộng sự [45] xem xét thành phần và đặc tính điển hình của dung dịch MRF, cũng như kiểm soát lực từ và tương tác giữa dụng cụ và phôi. Trong khi đó, Jain và các cộng sự [46] mô tả cơ chế loại bỏ vật liệu trong gia công bằng dòng hạt mài từ tính, nhưng chủ yếu thích hợp cho các chi tiết có hình dạng đơn giản. Zhao và các đồng nghiệp [47] cung cấp đánh giá tổng hợp về thành phần, cơ chế vận hành và ứng dụng đánh bóng MRF hiện nay.

Trước sự tiến triển mạnh mẽ và liên tục của công nghệ đánh bóng từ tính, các bề mặt siêu mịn với độ chính xác cao ngày càng trở nên hiệu quả hơn, nổi bật trong các lĩnh vực ứng dụng quang học, hàng không vũ trụ, sản xuất chip bán

dẫn, y sinh và nhiều ngành công nghệ cao khác. Với những ưu điểm vượt trội so với các công nghệ gia công truyền thống và phi truyền thống, công nghệ đánh bóng MRF được các nhà khoa học quốc tế quan tâm nhằm tăng cường hiệu quả và phạm vi ứng dụng [21, 48]. So với các công nghệ như đục, cắt gọt, EDM, đánh bóng cơ học hoặc hóa học, công nghệ MRF thể hiện nhiều ưu điểm nổi bật:

Công nghệ đánh bóng MRF có thể ứng dụng hiệu quả cho các vật liệu có các đặc tính cơ-lý khác nhau. Công nghệ này đáp ứng tốt cả yêu cầu đánh bóng siêu chính xác trong quang học và độ chính xác hình học của chi tiết cơ khí [12].

Khả năng ứng dụng cao, không cần đến các hoạt động khác sau khi gia công, trong thời gian gần đây, trước nhu cầu ngày càng lớn trong sản xuất chi tiết hàng không vũ trụ, thiết bị quang học, ô tô, y sinh, được sử dụng rộng rãi trong điện tử và các lĩnh vực công nghiệp chính xác [49].

Cho phép đạt được bề mặt gia công mịn và đồng nhất với nhiều loại vật liệu. Quá trình này làm giảm khuyết tật nhỏ, vết nứt và các vết xước bề mặt không mong muốn, tạo ra bề mặt mịn và chính xác [50].

Cường độ từ trường có thể điều chỉnh nhằm kiểm soát chính xác lực tác động của hạt mài, giúp bề mặt đạt độ bóng theo các yêu cầu đặc thù, độ phẳng và độ chính xác. Đồng thời, quá trình này có thể gia công nhiều chi tiết, giảm thời gian và phát sinh chất thải độc hại [51].

Công nghệ đánh bóng MRF có ưu điểm nổi bật nhờ khả năng hoàn thiện bề mặt vật liệu khác nhau từ không dẫn điện đến dẫn điện trong khi đó không tạo ra nhiệt cục bộ và không ảnh hưởng đến cơ tính vật liệu [41, 42]. Bên cạnh đó, công nghệ này có tiềm năng lớn trong tích hợp với các hệ thống điều khiển hiện đại để nâng cao mức độ tự động hóa, giúp nâng cao hiệu suất và giảm sự phụ thuộc vào nhân công [52, 53].

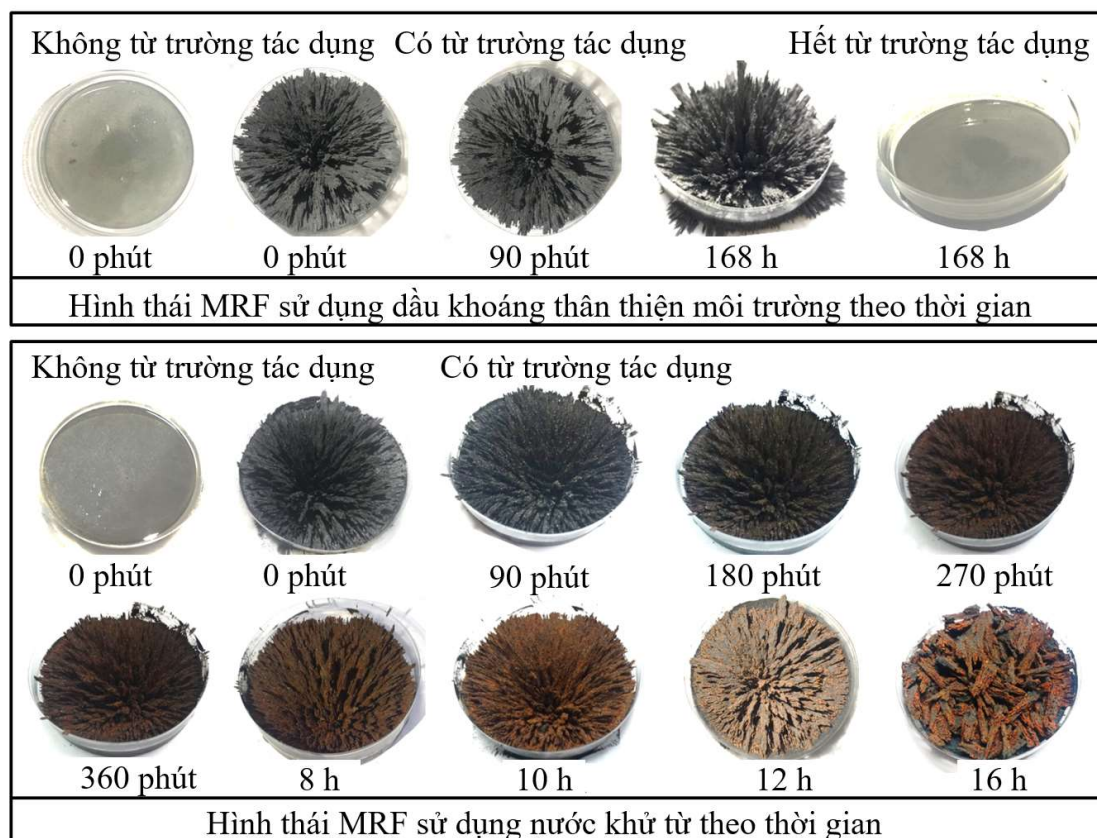
Mặc dù công nghệ đánh bóng MRF đã ghi nhận một số kết quả nhất định, song công nghệ MRF còn tồn tại một số hạn chế như tốc độ loại bỏ vật liệu không cao dẫn tới thời gian gia công kéo dài qua đó tạo ra chi phí gia công cao [54]. Để khắc phục, các nghiên cứu hiện thời tập trung tăng cường MRR thông qua tăng cường cường độ từ trường. Một giải pháp nổi bật là kỹ thuật MRF sử dụng mảng từ trường đa cực, trong đó các nam châm được bố trí đặc biệt để tạo ra từ trường mạnh tập trung tại vùng gia công. Sự kết hợp này giúp tăng cường áp lực hạt mài, cải thiện hiệu quả đánh bóng và độ ổn định. Các hạt mài trong vùng từ trường mạnh được tổ chức thành dải ổn định, vượt trội so với các hạt mài tự do trong MRF truyền thống, đặc biệt hiệu quả khi đánh bóng các bề mặt có diện tích lớn và yêu cầu độ bóng cao. Hơn nữa, nghiên cứu về các dung dịch thân thiện với môi trường cũng là một trọng tâm, sử dụng axit và hạt mài sinh học, nhằm hướng đến một quy trình đánh bóng MRF xanh và bền vững trong tương lai.

1.1.2. Tình hình nghiên cứu trong nước

Tại Việt Nam, phương pháp đánh bóng từ tính (MRF) sử dụng mảng từ tính đa cực (MMRF) được xem như một hướng nghiên cứu đầy tiềm năng và chưa được khai thác rộng rãi. Hiện nay, số lượng các nghiên cứu có liên quan đến công nghệ đánh bóng MRF trong nước vẫn hạn chế, đặc biệt liên quan đến các nghiên cứu có tính ứng dụng từ trường đa cực trong quá trình đánh bóng bề mặt.

Trong nghiên cứu năm 2022, nghiên cứu sinh đã phát triển quy trình đánh bóng MRF sử dụng hạt từ tính có kích thước micromet trong chất lỏng mang với tỷ lệ phần trăm thể tích hạt từ tính trong dung dịch từ 30% đến 40% [55]. Các kết quả thu được từ nghiên cứu cho thấy rằng trong môi trường nước khử ion, các hạt sắt từ (CIP) trong dung dịch MRF dễ bị oxy hóa và mất nước theo thời gian. Tốc độ oxy hóa tùy thuộc vào các điều kiện hoạt động như độ ẩm và nhiệt

độ, và quá trình oxy hóa này ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất từ tính của MRF, do oxit sắt có tính chất từ kém hơn so với sắt nguyên chất. Dung dịch MRF sử dụng CIP bị oxy hóa giảm hiệu ứng từ tính tới 20%.



Hình 1.2 Hình thái MRF theo thời gian khi có và không có từ trường ngoài
dụng với các dung dịch mang khác nhau

Để giải quyết nhược điểm trên, nghiên cứu sinh đã phát triển một dung dịch đánh bóng mới với độ nhớt lớn và khả năng chống oxy hóa cao, duy trì ổn định trong suốt thời gian sử dụng. Khi không có tác động của từ trường, dung dịch MRF đề xuất có thể trở về trạng thái ban đầu. Ngoài tính thân thiện với môi trường, dung dịch này còn khắc phục hiện tượng oxy hóa và mất nước của các hạt sắt từ, vốn là nguyên nhân làm giảm độ nhớt và khả năng đánh bóng theo thời gian. Nhưng với dung dịch đề xuất này cần cải thiện thêm khả năng hoạt

động của nam châm, dung dịch thiết lập có độ nhớt cao trên nền gốc dầu khoáng sẽ làm giảm tác dụng của từ trường. Cùng với đó dung dịch MRF được đặt trên nam châm cố định, qua đó giảm hiệu suất đánh bóng từ tính. Nhằm cải tiến mô hình đánh bóng từ tính, luận án này đề xuất một hệ thống MRF linh hoạt sử dụng mảng nam châm Halbach được bố trí tối ưu nhằm tạo ra vùng từ trường mạnh trong khu vực đánh bóng. Mô hình mới cho phép đánh bóng hiệu quả bề mặt vật liệu Ti-6Al-4V, đạt độ nhám mức nanomet và nâng cao tốc độ loại bỏ vật liệu. Mô hình đề xuất không chỉ có tiềm năng trong nghiên cứu công nghệ đánh bóng MRF tại Việt Nam mà còn đáp ứng các yêu cầu về gia công siêu chính xác trong các ngành hàng không, y tế, quốc phòng và tại các viện nghiên cứu chuyên sâu.

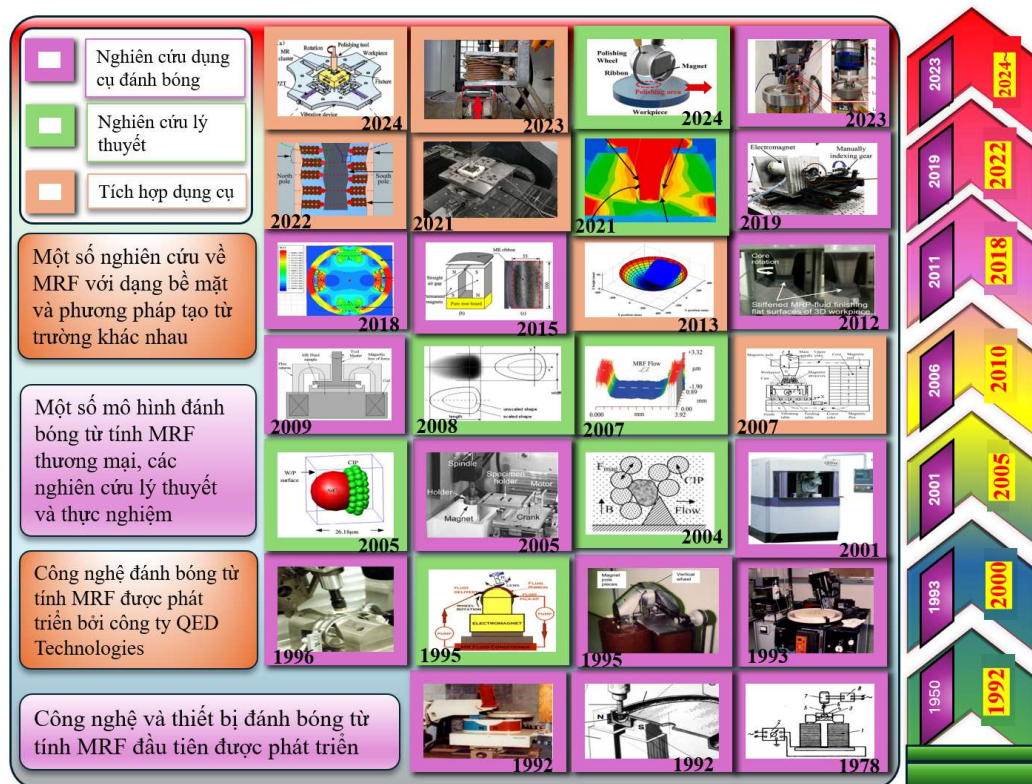
1.2. CÔNG NGHỆ ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH

1.2.1. Lịch sử phát triển công nghệ đánh bóng từ tính

Vào những năm 1970, công nghệ đánh bóng từ tính (MRF) lần đầu tiên được áp dụng trong đánh bóng thiết bị quang học. Vào đầu những năm 1990, Jacobs và cộng sự [56] từ Trung tâm Sản xuất Quang học tại Đại học Rochester, hợp tác với Kordonski, đã áp dụng MRF để đánh bóng thấu kính và đánh bóng bề mặt trong lĩnh vực quang học. Đến năm 1996, Jacobs và cộng sự [57] đã phát triển thiết bị MRF hoàn chỉnh cho quy trình đánh bóng MRF. Hệ thống này bao gồm một hệ thống tuần hoàn hạt mài, máy công cụ, hệ thống khuấy. Vào cuối thế kỷ 20, máy MRF dòng Q22, được phát triển bởi hãng QED, đã đánh dấu giai đoạn đầu thương mại hóa công nghệ MRF. Những tiến bộ này mở ra cơ hội áp dụng công nghệ MRF trong ngành công nghiệp quang học. Hình 1.3 bên dưới mô tả tiến triển của công nghệ MRF.

Vào đầu thế kỷ 21, đã có những bước tiến đáng kể trong nghiên cứu MRF. Trong 10 năm đầu thế kỷ 21, số lượng nghiên cứu về công nghệ đánh bóng MRF tăng lên đáng kể, dẫn đến sự tăng trưởng nhanh chóng trong lý thuyết, vật liệu

và công nghệ. Vào khoảng năm 2010, nhiều hệ thống lý thuyết khác nhau cho MRF đã được thiết lập, chuyển trọng tâm nghiên cứu sang tối ưu hóa lý thuyết và đánh bóng phối hợp với các công nghệ hỗ trợ. Trong giai đoạn này, công nghệ MRF bước vào giai đoạn tối ưu hóa kỹ thuật. Vào khoảng năm 2017, công nghệ MRF bắt đầu tích hợp với một số phương pháp khác như laser, siêu âm và hóa học nhằm cải thiện hiệu suất và độ chính xác của quy trình đánh bóng, đánh dấu giai đoạn đổi mới của công nghệ này. Hiện tại, mặc dù các thiết bị, công nghệ và thành phần chất lỏng đã ghi nhận tiến bộ đáng kể tuy nhiên còn những hạn chế về hiệu quả đánh bóng và môi trường cần được giải quyết.



Hình 1.3 Các giai đoạn phát triển công nghệ đánh bóng MRF

1.2.2. Ứng dụng công nghệ đánh bóng từ tính

Nhằm tạo ra chất lượng bề mặt vượt trội và độ nhám thấp trên chi tiết gia công đóng vai trò quan trọng, đặc biệt trong những lĩnh vực đòi hỏi độ chính xác

nghiêm ngặt như hàng không vũ trụ, thiết bị quang học, sản xuất chip, y học tái tạo và chất nền bán dẫn. Do đó các kỹ thuật đánh bóng MRF đang được áp dụng rộng rãi hơn trong sản xuất. Công nghệ này đã tiến bộ đáng kể và hiện nay có thể gia công các vật liệu khác nhau, bao gồm cả nhôm và thép không gỉ, titanium, đồng và nhiều kim loại và hợp kim khác như thủy tinh, silicon carbide, silicon đơn tinh thể và zirconia. Hình 1.4 trình bày một số ứng dụng điển hình của kỹ thuật MRF. Trong đó công nghệ đánh bóng MRF có ưu điểm là sử dụng lực đánh bóng nhỏ, tạo điều kiện thuận lợi cho việc gia công vật liệu mỏng, dễ gãy vỡ. Ví dụ, chất nền tấm GaN, được triển khai rộng rãi trong ngành thiết bị vi điện tử, yêu cầu tính toàn vẹn của mạng tinh thể cùng với độ phẳng và độ nhám bề mặt ở dạng nanomet. Wu và các cộng sự [58] đã áp dụng kỹ thuật đánh bóng từ tính (MRF) cho tinh thể GaN trong 240 phút, đạt được độ nhám (Ra) 0.375 nm.

Các thiết bị cấy ghép này đã được Kumar và cộng sự [9] cấy ghép thành công vào một bệnh nhân. Thiết bị cấy ghép làm từ thép không gỉ, với bề mặt được đánh bóng từ tính quay với sự sắp xếp cực từ chuyên dụng cho nhám bề mặt từ 35 đến 78 nm. Pawan và cộng sự [10] đã áp dụng kỹ thuật đánh bóng từ tính quay (RMRF) áp dụng cho bề mặt bên trong của ổ bi, một thành phần quan trọng của ổ bi, giúp giảm nhám bề mặt xuống 0.06 μm và độ gọn sóng từ 0.38 đến 0.08 μm chỉ trong 40 phút đánh bóng đồng thời cải thiện độ tròn.

Nghiên cứu bởi Xu và các cộng sự [59] thiết lập mô hình đánh bóng MRF nhằm nâng cao mức độ chính xác hình dạng bề mặt phi cầu cho hệ thống quang học. Sau quá trình đánh bóng khoảng 70 phút, các vết sai số in dập do nguyên công gia công bề mặt nhôm trước đó biến mất hoàn toàn và các giá trị PV và RMS đạt lần lượt là 0.216λ và 0.033λ . Singh và các cộng sự [60] đã phát triển mô hình đánh bóng MRF áp dụng cho bề mặt phôi có rãnh của trống dẹt, đạt được mức giảm nhám bề mặt xuống $Ra = 10 \text{ nm}$ và giảm đáng kể tình trạng đứt sợi sau 60 phút đánh bóng. Hou và các cộng sự [61] đã đánh bóng một bề mặt

thiết bị quang học phẳng có kích thước 610×440 mm bằng phương pháp MRF trong hơn 11 giờ. Kết quả thu được với PV của bề mặt giảm từ 0.5λ xuống 0.1λ với phép đo RMS đạt 0.43 nm và Rq đạt 0.2 nm, qua đó chứng minh tiềm năng gia công các chi tiết trong thiết bị quang học có khẩu độ lớn và độ chính xác cao bằng cách sử dụng MRF.



Hình 1.4 Các ứng dụng đánh bóng MRF

Luo và cộng sự [24] đã gia công gốm zirconia, một vật liệu chức năng mới được ứng dụng phổ biến trong các động cơ hàng không và tên lửa dẫn đường bằng cách sử dụng quy trình đánh bóng MRF trong 90 phút. Bằng cách sử dụng một ách từ vĩnh cửu với khe hở không khí thẳng làm bộ kích thích, họ đã đạt được bề mặt siêu mịn với Ra đạt được 0.702 nm. Công nghệ MRF cũng đã được áp dụng sáng tạo cho thấu kính quang học phi cầu, đem lại sự chính xác và khả

năng tin cậy cao. Trong đó thấu kính phi cầu được biết đến với khả năng hiệu chỉnh quang sai, kích thước nhỏ gọn và hiệu suất vượt trội so với thấu kính hình cầu, hiện nay được ứng dụng phổ biến trong các lĩnh vực như lens camera điện thoại di động, bộ chuẩn trực laser bán dẫn, máy chiếu laser và thiết bị thực tế ảo.

Mặc dù có những tiến bộ trong đánh bóng nhiều loại vật liệu và hình dạng, công nghệ MRF chủ yếu hướng tới xử lý các vật liệu phi từ. Tuy nhiên, mỗi quan tâm ngày càng lớn công nghệ này trong số các nhà sản xuất thiết bị cấy ghép, các công ty về thiết bị hàng không vũ trụ và các nhà sản xuất linh kiện quang học nhấn mạnh tiềm năng cũng như ứng dụng rộng rãi hơn nữa của công nghệ này.

1.3. MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH HỢP KIM TITANIUM

Các quy trình đánh bóng từ tính dành cho hợp kim titanium nhằm tạo ra nhám bề mặt ở cấp độ nano đã nhận được sự quan tâm đáng kể trong ngành kỹ thuật hàng không vũ trụ, kỹ thuật vật liệu, sản xuất và đặc biệt trong ngành y sinh. Nhiều nghiên cứu đã hướng tới việc phát triển và ứng dụng các kỹ thuật đánh bóng từ tính với mục tiêu đạt được chất lượng bề mặt nanomet và kiểm soát hiệu quả các mức độ nhám bề mặt cũng như khả năng bóc tách vật liệu. Các loại chất lỏng từ tính (MRF) đồng thời xem xét đến nhiều thông số công nghệ, chi tiết minh họa trong Bảng 1.1.

Bảng 1.1 Một số phương pháp đánh bóng từ tính cho bề mặt hợp kim titanium dạng nanomet

Phương pháp	Vật liệu và dạng bề mặt	Khả năng đánh bóng bởi các phương pháp	Thành phần dung dịch từ tính	Ghi chú
-------------	-------------------------	--	------------------------------	---------

AFF	Bề mặt khớp nhân tạo bằng hợp kim titanium	Nhám bề mặt thu được 95.8 nm từ bề mặt ban đầu 230 nm sau thời gian đánh bóng 5h với đường kính hạt mài là 18-8 μm	Dung dịch bao gồm các hạt mài SiC có kích thước từ 8 -18 μm	Zhang và cộng sự [62]
MFAF	Bề mặt hợp kim titanium sinh học tự do	+ MRF I cho nhám bề mặt 10 nm, mức cải thiện bề mặt 98.21 %. + MRF II cho nhám bề mặt 70 nm, mức cải thiện bề mặt là 89,06 %. + Thành phần của chất phụ gia đóng vai trò trong việc giảm nhám bề mặt	+ MRF I gồm CIP, hạt mài mòn, chất phụ gia nanomet, HF, HNO ₃ và nước khử ion + Loại MRF II, CIP, các hạt mài mòn, H ₂ O ₂ và nước khử ion	Barman và cộng sự [54]
MFAF	Vật liệu sinh học	Đạt được nhám bề mặt 46 nm từ bề mặt ban đầu 1121 nm ban đầu, giúp cải thiện nhám bề mặt tăng lên 95 %	MRF được thiết lập với kích thước hạt mài SiC (150 μm) và kích thước hạt từ tính CIP (250 μm)	Fan và cộng sự [63]
MFAF	Thiết bị cấy ghép đầu gối xương đùi vật liệu titanium	+ Nhám bề mặt đạt được 20 nm từ bề mặt ban đầu 120 nm. + Chế độ công nghệ: khoảng cách làm việc,	MRF được thiết lập bởi CIP (40 vol%) với kích thước (8 μm) và các hạt mài kim	Barman và cộng sự [64]

		tốc độ quay và thời gian phải lần lượt xác định bởi: 0.6- 0.8 mm, 1100–1200 vòng/phút và 5.5–6 giờ.	cương (7.1 vol%) có kích thước 6 μm trong môi trường cơ bản.	
MFAF	Thiết bị cấy ghép sinh học titanium	+ Nhám bề mặt đạt được 10 nm với thông số công nghệ: 1200 vòng/phút, khoảng cách làm việc 1 mm và 6.30 h + Đường chạy dao song song tạo ra nhám bề mặt vượt trội hơn đường chạy dao xoắn ốc	+ MRF với kích thước hạt từ tính 8 μm chiếm 40 % và bột kim cương có kích thước 6 μm chiếm thể tích 3.5 % kết hợp với, axit nitric (HNO_3) hàm lượng 5.5 %, axit hydrofluoric (HF) 2.7 %.	Barman và cộng sự [65]
MAF	Vật liệu sinh học titanium	Nhám bề mặt giảm từ 1.17 μm xuống 54 nm. trong các điều kiện thí nghiệm với khe hở làm việc 0.8 mm, tốc độ tiến dao 15000 mm/phút, vận tốc trục chính 900 vòng/phút.	MRF với kích thước hạt từ tính 250 μm và kích thước hạt mài SiC đường kính 150 μm	Fan và cộng sự [66]
MAF	Thiết bị sinh học titanium	+ Nhám bề mặt giảm từ 1.195 μm xuống 0.073 μm , thể hiện sự cải	MRF chứa hạt từ tính có kích thước 250 μm ,	Tian và cộng sự [67]

		thiện đáng kể nhám bề mặt (khoảng 94 %) trong điều kiện đánh bóng tối ưu. + Thông số đánh bóng tối ưu: tốc độ trục chính 900 vòng/phút, vận tốc đĩa mang MRF 160 vòng/phút và khoảng cách làm việc 0.7 mm	kích thước hạt mài SiC 150 μm với tỷ lệ trọng lượng 9:1 cùng dung dịch mang dầu bôi trơn.	
MRFAF	Hợp kim Ti-6Al-4V	Nhám bề mặt cải thiện 37,5 % với nhám bề mặt cuối cùng thu được 0.04 μm thông qua các tham số cắt được tối ưu.	MRF chứa kích thước hạt từ tính (20–30 μm) và kích thước hạt mài Al_2O_3 trung bình 30 μm.	Tien và cộng sự [55]
MRF	Ống hợp kim titanium	Nhám bề mặt giảm từ 0.251 μm đến 0.191 μm. Sau 600 chu kỳ và cùng khả năng loại bỏ vật liệu 0.0012 g	MRF chứa hạt từ tính 18 μm, hạt mài kim cương 20 μm, Glycerol và nước khử ion	Peng và cộng sự [68]
MRAF	Hợp kim Ti6Al4V	Bề mặt khớp gối dạng gương thu được sau quy trình đánh bóng từ tính với nhám bề mặt thu được từ 78 đến 35 nm	MRF chứa hạt từ tính, hạt mài SIC và môi trường gốc dầu parafin	Qamar và cộng sự [69]

MRAF	Hợp kim TiNbTaZr (β -TNTZ)	Nhám bề mặt được cải thiện 97,68 % với nhám bề mặt tốt nhất thu được ở mức 9 nm.	MRF chứa hạt từ tính với kích thước $\sim 25 \mu\text{m}$ và hạt mài kim cương với kích thước $\sim 2 \mu\text{m}$	Prakash và cộng sự [70]
MRFAF	Hợp kim β - TiNbTaZr	Quá trình đánh bóng cải thiện 95 % so với giá trị ban đầu $1.121 \mu\text{m}$ cùng nhám bề mặt cuối cùng đạt được 46 nm.	MRF chứa hạt từ tính với kích thước $\sim 25 \mu\text{m}$ cùng thể tích 30 đến 40%.	Singh và cộng sự [71]
R-MRAFF	Đánh bóng bề mặt hợp kim titanium khớp gối	+Nhám bề mặt sau khi đánh bóng thu được 190.4 đến 79.5 nm trên mặt 1. + 72.3 đến 85.3 nm trên mặt 2. + 85.7 đến 202.7 nm trên mặt 3. + 89.3 đến 121.7 nm trên mặt 4.	MRF chứa hạt từ tính có kích thước từ 1 đến $2 \mu\text{m}$ và 10% thể tích, hạt mài boron cacbua (B_4C) có kích thước 4–9 μm trong 6% dầu mỡ và 54% dầu parafin	Nagdev và cộng sự [72]
BEMRF	Ti-4Al-6C	Tốc độ quay của dụng cụ MRF, khoảng cách khe hở là thông số chính nhằm đạt được độ bóng bề mặt và bị	MRF chứa đường kính hạt từ tính 8 μm và SiC với môi trường gồm 3 ml axit HF, 6 ml axit	Bhavsar & Unune [73]

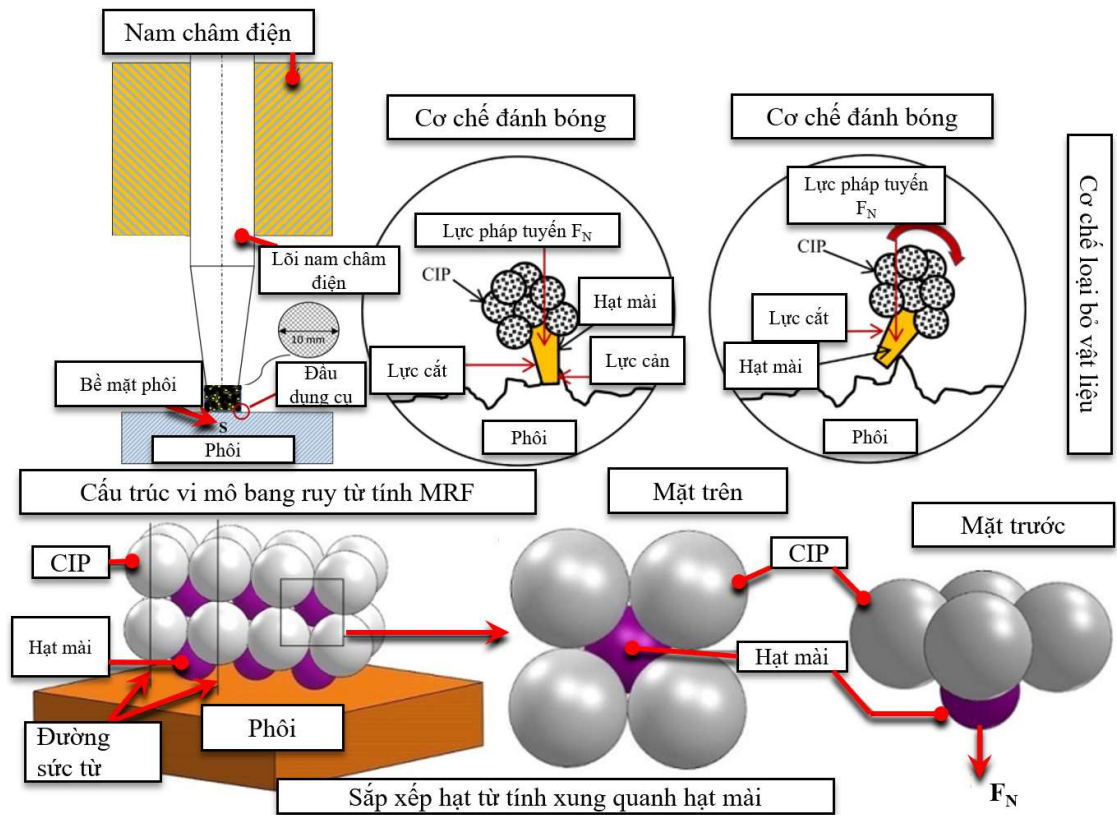
		ảnh hưởng bởi nồng độ hạt mài	HNO ₃ và 100 ml nước cất	
--	--	----------------------------------	--	--

Các công nghệ đánh bóng từ tính, tiêu biểu như MFAF, MRAFF, MAF, MRF, CMRF và R-MRAFF, thuộc nhóm phương pháp gia công tiên tiến nhằm tạo ra bề mặt hợp kim titanium có độ nhám nanomet. Bằng cách sử dụng lực từ nhằm điều khiển chuyển động, định hướng hạt mài và hạt từ tính, các công nghệ này cho phép đánh bóng đạt độ bóng cao, phù hợp yêu cầu khắt khe trong lĩnh vực như y sinh, hàng không vũ trụ, công nghiệp thực phẩm. Mặc dù có nhiều phương pháp đánh bóng MRF áp dụng cho hợp kim titanium, nhưng hai phương pháp nổi bật hiện nay bao gồm đánh bóng đầu bi (BEMRF) và đánh bóng dạng đĩa. Hai phương án này không chỉ cho phép kiểm soát tốt hình thái dòng hạt mài mà còn phù hợp với nhiều loại hình bề mặt phức tạp, đồng thời giữ được độ ổn định và hiệu quả đánh bóng cao trong gia công thực tế.

1.3.1. Phương pháp đánh bóng đầu bi dưới sự hỗ trợ bởi từ trường

Kỹ thuật đánh bóng đầu bi (BEMRF) có thể đánh bóng chính xác các cấu trúc phức tạp như bề mặt hình học lồi, lõm, hình cầu và các bề mặt tự do. Đặc biệt, khi sử dụng trên máy CNC ba hoặc năm trục, BEMRF cho phép đạt được hiệu suất cao [74]. Trong đánh bóng MRF, các hạt mài chịu tác dụng bởi lực từ trường và lực cắt từ băng ruy MRF. Sự kết hợp giữa lực pháp tuyến và lực cắt giúp các hạt mài bám chặt vào bề mặt phôi, đảm bảo quá trình mài hiệu quả. Khi đầu đánh bóng quay, các đỉnh nhám trên bề mặt phôi bị loại bỏ, hình thành lớp bề mặt mịn hơn, như minh họa trong Hình 1.6 [75]. Cụ thể, lực pháp tuyến tác động lên hạt mài nhằm hình thành vết rãnh tế vi trên bề mặt phôi, trong khi lực cắt đóng vai trò chính trong việc lấy đi các đỉnh nhấp nhô. Quá trình này chỉ diễn ra khi lực cắt lớn hơn lực cản. Khi đó, các hạt mài được giữ chặt bởi chuỗi hạt sắt từ (CIP) sẽ loại bỏ các đỉnh nhám và tiếp tục chuyển động. Giá trị lực cắt phụ

thuộc vào hai yếu tố chính: (1) diện tích phân hạt mài nhô lên khỏi bề mặt phôi và (2) ứng suất cắt của chất lỏng MRF. Nếu lực cắt không đủ lớn để vượt qua lực cản, chuỗi hạt CIP sẽ không giữ được hạt mài, khiến chúng lăn hoặc trượt tự do trên bề mặt phôi như minh họa trong Hình 1.6.



Hình 1.6 Cơ chế đánh bóng BEMRF với nam châm điện [75]

Các hạt sắt từ (CIP) dưới tác dụng bởi lực từ trường ngoài phân bố ngẫu nhiên trong dung dịch sẽ tái sắp xếp, hình thành các chuỗi liên kết dọc theo đường sức từ. Các chuỗi CIP này có khả năng kẹp giữ các hạt mài, tạo nên cấu trúc ổn định phục vụ cho quá trình đánh bóng. Việc hiểu rõ cơ chế sắp xếp này tạo cơ sở thiết lập mô hình ô đơn vị, phản ánh cấu trúc vi mô đặc trưng của dung dịch MRF. Cấu trúc lập phương tâm khối (BCC) thường được sử dụng, trong đó mỗi hạt mài được bao quanh bởi tám hạt CIP tiếp xúc tại các đỉnh của hình lập

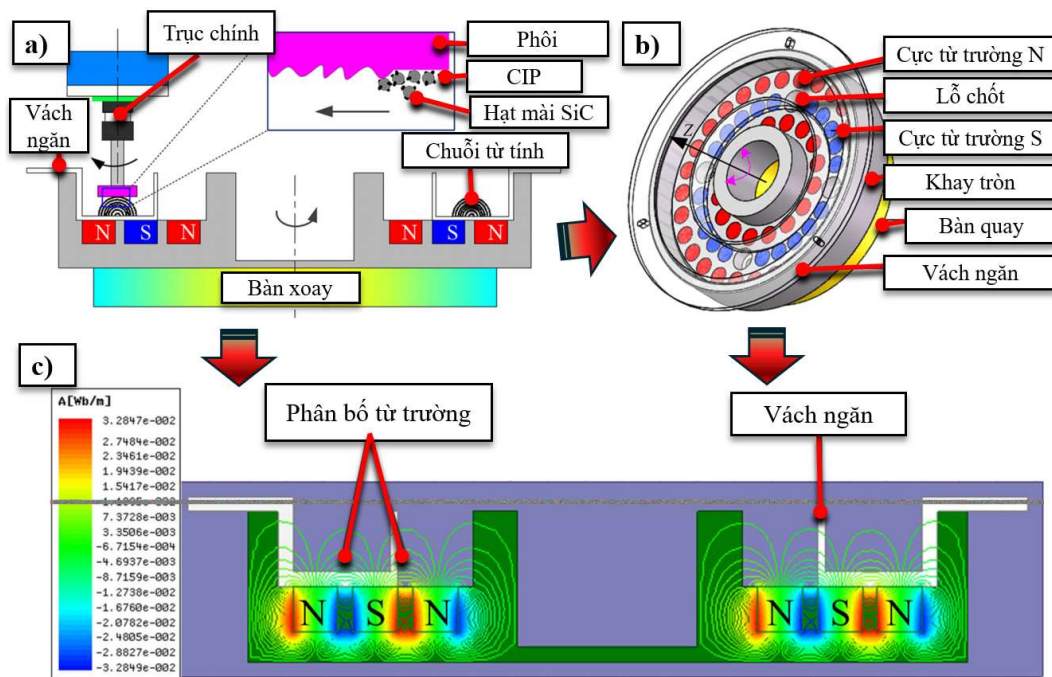
phương [76]. Tuy nhiên, khi tiếp xúc với bề mặt phôi, chỉ một nửa cấu trúc này được duy trì, do giới hạn không gian và tương tác tại bề mặt, dẫn đến hình thành mô hình bán BCC. Trong cấu trúc này, các hạt tham gia vào quá trình bóc tách vật liệu chỉ được bao quanh và giữ bởi bốn hạt CIP, như được mô tả trên Hình 1.6.

Công nghệ đánh bóng BEMRF thể hiện tiềm năng lớn trong cải thiện và tinh chỉnh chất lượng bề mặt trong lĩnh vực y sinh nhờ chất lượng bề mặt cao, ổn định và có điều khiển thông qua cường độ từ trường. Trong nghiên cứu của Bhavsar và cộng sự [73] đề xuất đánh bóng BEMRF áp dụng trên hợp kim Ti-4Al-6C với việc sử dụng MRF kết hợp bao gồm các hạt CIP có kích thước 8 μm và hạt mài SiC. Dung dịch cơ bản được chuẩn bị từ 100 ml nước cất, 3 ml axit HF và 6 ml axit HNO_3 . Cùng với đó đánh bóng MRF nhằm tạo ra bề mặt nano khác nhau áp dụng cho các hợp kim titanium sinh học bao gồm Ti-6Al-4V, Ti-Beta-EZR và hợp kim β -Ti-Nb-Ta-ZR y sinh như đã được thảo luận chi tiết trong Bảng 1.1.

Tính năng gia công của quy trình đánh bóng BEMRF là tiếp xúc điểm, áp dụng cho mặt phi cầu và bán kính cong nhỏ, các bề mặt tự do nhằm đạt được độ bóng cao. Tuy có các ưu điểm trong hoàn thiện bề mặt hợp kim titanium như đã đề cập trên, công nghệ này còn một số hạn chế, như khả năng bóc tách vật liệu thấp do chỉ tiếp xúc điểm giữa đầu đánh bóng và phôi. Gia công các phôi có bề mặt phức tạp đòi hỏi hệ thống điều khiển chính xác quỹ đạo đầu đánh bóng, làm tăng độ phức tạp của quá trình. Do đó, để nâng cao tiềm năng công nghệ đánh bóng từ tính BEMRF cần tích hợp đầu đánh bóng với cánh tay rô bốt giúp tăng khả năng linh hoạt và điều khiển trong tương lai.

1.3.2. Phương pháp đánh bóng từ tính dạng đĩa

Các bề mặt phẳng đạt được cấp độ nhám nanomet bởi đánh bóng từ tính dạng đĩa được chế tạo, trong đó tích hợp các đầu cực từ nhằm tối ưu hóa quá trình hoàn thiện bề mặt. Các kết đo và mô phỏng được phân tích nhằm khảo sát thay đổi cường độ từ trường trong vùng gia công qua đó cho thấy quá trình hình thành các chuỗi từ [77]. Các phép đo thực nghiệm đã xác nhận tính chính xác của mô phỏng, cho thấy sự nhất quán đáng kể giữa mô hình và thực nghiệm. Bề mặt phôi Ti-6Al-4V sau gia công được cải thiện đáng kể, các vết xước sâu cùng đỉnh nhấp nhô cao suy giảm đáng kể, từ đó cải thiện chất lượng sản phẩm.



Hình 1.7 Nguyên lý đánh bóng từ tính dạng đĩa [78]

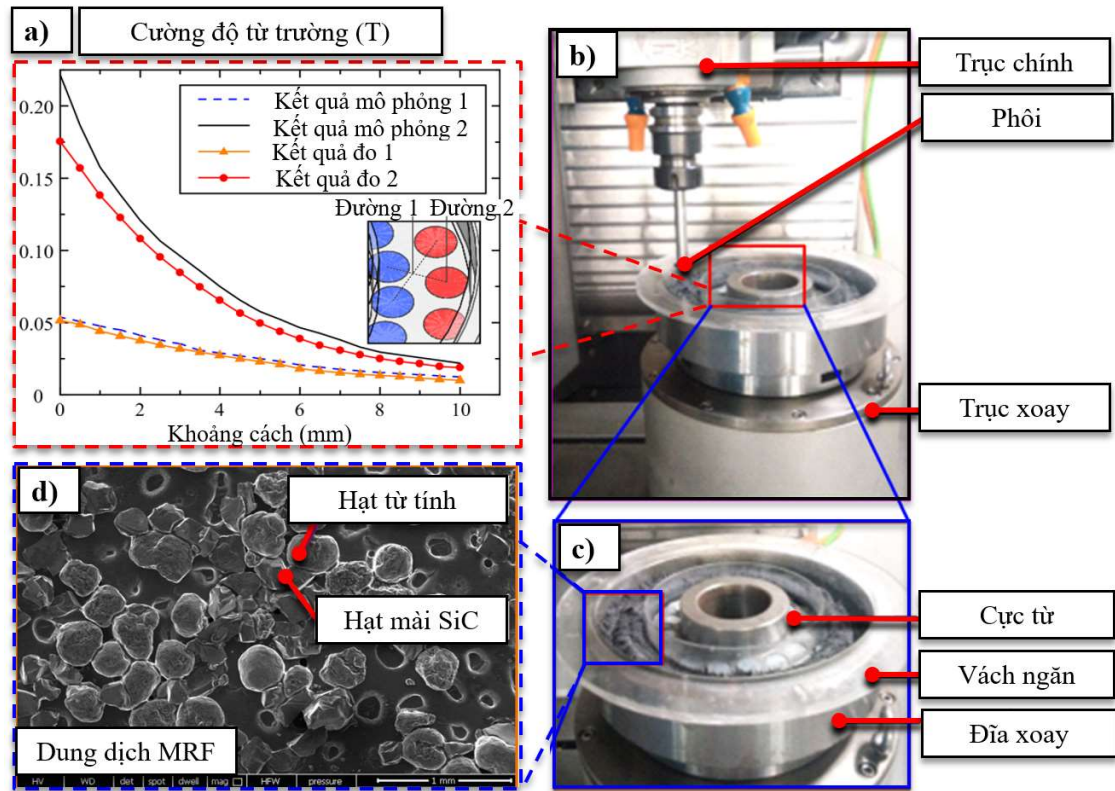
Hình 1.7a minh họa quy trình đánh bóng từ tính dạng đĩa được áp dụng cho bề mặt phôi phẳng Ti-6Al-4V [78]. Nhằm tạo từ trường tập trung cao tại khu vực đánh bóng các nam châm có cực bắc (N) được đặt trên các vòng tròn ngoài và trong, trong khi các nam châm có cực nam (S) được sắp xếp trên vòng tròn

giữa. Với phương pháp thiết lập nhằm tạo ra từ trường mạnh tác dụng lên khu vực đánh bóng. Các hạt sắt từ được trộn với hạt mài SiC theo tỉ lệ thích hợp. Khi chịu tác động của từ trường, chúng sẽ sắp xếp theo các đường sức từ, hình thành các chuỗi liên kết, hoạt động tương tự một dụng cụ đánh bóng. Trục chính máy CNC giúp giữ và quay phôi kết hợp với bàn quay được sử dụng để đảm bảo các cực từ quay ngược chiều so phôi. Điều này tạo ra ma sát tương đối giữa bề mặt phôi và chuỗi đánh bóng từ tính nhờ đó khả năng loại bỏ vật liệu được thực hiện.

Phương pháp phân bố cực từ N-S-N được sắp xếp trong mô hình mô phỏng hai chiều (2D) cùng đường sức từ được hình thành được thể hiện trong Hình 1.7b. Một lớp hạt mài cố định linh hoạt sẽ được tạo ra dọc theo đường sức từ do tác động của từ trường được áp dụng các vùng tập trung từ trường dạng vòng tròn được hình thành giữa các cực N và S như mô tả trên Hình 1.7c. Những vùng tập trung từ trường đa điểm này giúp tăng hiệu suất gia công, do đó hình thành chuỗi từ tính dày đặc và tiếp xúc nhiều hơn với bề mặt phôi trong quá trình đánh bóng.

Nhằm kiểm chứng tính hiệu quả của mô hình mô phỏng đề xuất, các phép so sánh đã được tiến hành giữa kết quả mô phỏng và dữ liệu thực nghiệm. Phân bố cường độ từ trường dọc theo đường 1 và đường 2 được thiết lập thông qua mô phỏng. Điểm bắt đầu của đường 1 được đặt tại điểm trung tâm của bốn cực, trong khi điểm đầu của đường 2 được đặt tại đầu cực N. Hình 1.8 cho thấy sự thay đổi cường độ từ trường theo khoảng cách từ điểm bắt đầu. Cường độ từ trường có mối quan hệ nghịch đảo với khoảng cách đánh bóng. Cường độ từ trường lớn nhất đạt 0.054 T tại điểm bắt đầu của đường 1 và 0.22 T tại điểm bắt đầu của đường 2. Điều này xảy ra do các đường từ bị phân tán khi khoảng cách tăng lên. Phân tích cường độ từ trường giảm đáng kể khi kích thước khe hở tăng.

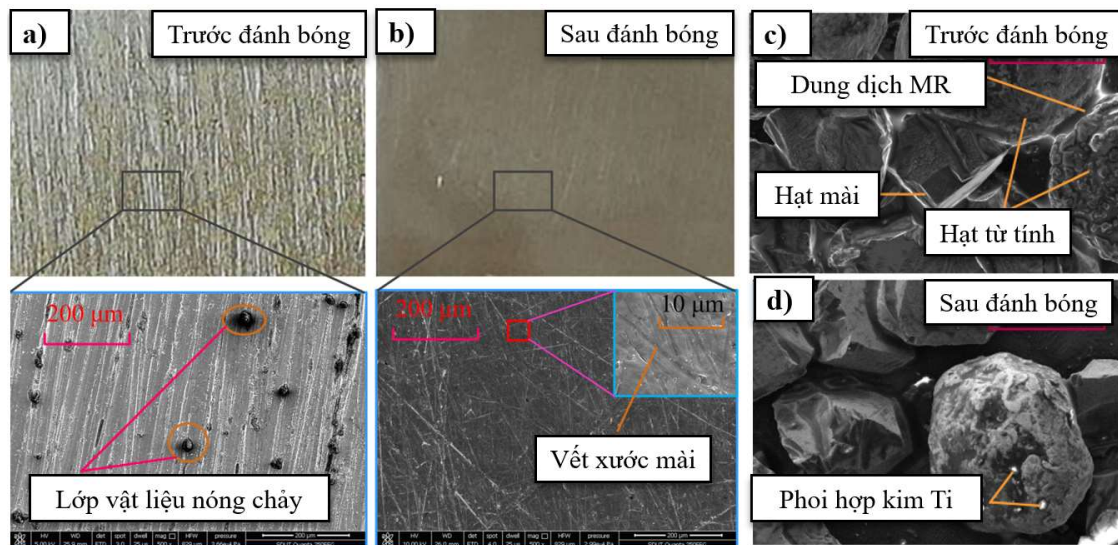
Xu hướng thay đổi của các phép đo thực nghiệm phản ánh đúng kết quả mô phỏng. Điều này chỉ ra rằng các mô phỏng có hiệu quả khi phân tích từ trường.



Hình 1.8 Mô hình thí nghiệm đánh bóng từ tính dạng đĩa cho vật liệu hợp kim Ti-6Al-4V

Hình 1.8b mô tả thiết bị đánh bóng từ tính dạng đĩa, phôi được gắn trên trục chính máy CNC với tốc độ lớn nhất 12.000 vòng/phút. Hình 1.9 minh họa sự thay đổi của bề mặt thông qua hình ảnh SEM trước và sau quá trình đánh bóng. Trước khi đánh bóng như mô tả trên Hình 1.9a, bề mặt phôi có nhiều vết xước sâu và tồn tại các lớp nóng chảy, đông đặc do khi hoàn thiện bằng tia lửa điện (WEDM). Sau khi hoàn thiện (Hình 1.9b), bề mặt trở nên mịn hơn, không còn vết xước rõ ràng hay lớp nóng chảy - đông đặc, cho thấy chất lượng bề mặt cải thiện đáng kể.

Kết quả này xác nhận rằng dụng cụ gia công được thiết kế giúp giảm đỉnh nhấp nhô trên phôi. Tuy nhiên, vẫn còn một số vết nhỏ do ma sát của hạt mài với bề mặt phôi gây ra. Việc sử dụng hạt mài có kích thước nhỏ hơn có thể giúp loại bỏ hoàn toàn những vết mài này. Điều này cho thấy hạt mài thô có ưu thế trong giai đoạn đầu để loại bỏ vật liệu nhanh chóng, trong khi hạt mài mịn giúp cải thiện chất lượng bề mặt ở giai đoạn sau. Hình 1.8 mô tả hình ảnh SEM dung dịch từ tính trước và sau đánh bóng. Các hạt mài có cạnh cắt được giữ bởi các hạt sắt carbonyl, như mô tả trong Hình 1.8c. Các đỉnh tạo ra do hạt mài di chuyển tương đối với bề mặt gia công. Một số hạt sắt carbonyl bị mài mòn và các cạnh cắt của hạt mài trở nên cùn hơn sau đánh bóng. Ngoài ra, một số mảnh hợp kim titanium xuất hiện trong môi trường mài mòn sau gia công, như thể hiện trong Hình 1.8d.



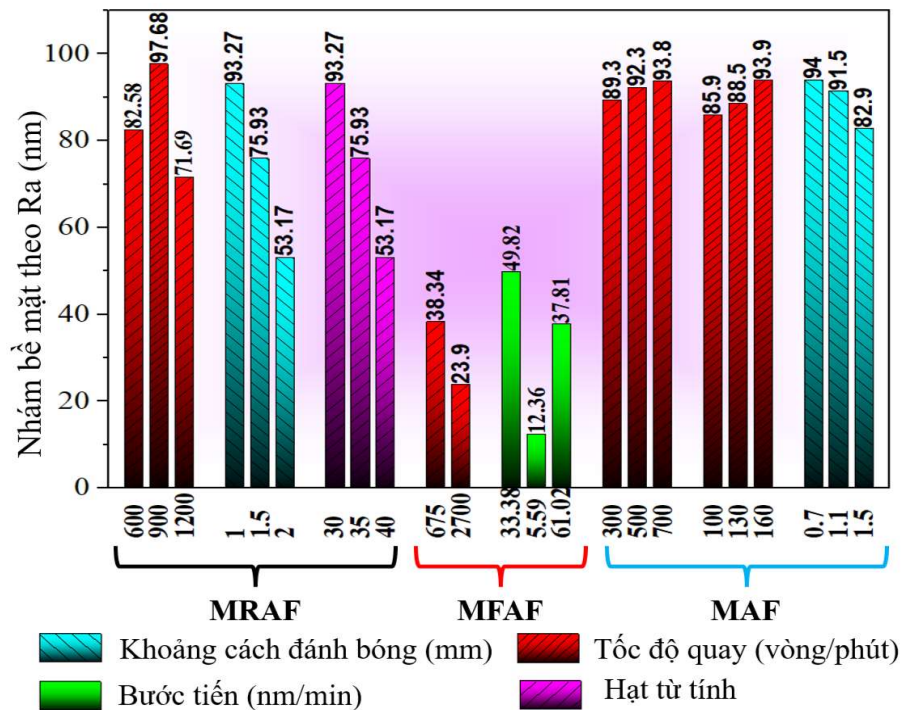
Hình 1.9 Hình thái bề mặt SEM của phôi trước và sau khi đánh bóng từ trường dạng đĩa cho phôi Ti-6Al-4V

Theo đề xuất bởi Tian và cộng sự như mô tả trên Hình 1.9 cho thấy công nghệ đánh bóng MRF được triển khai thành công và có tiềm năng áp dụng hiệu quả trong quá trình gia công hợp kim Ti-6Al-4V. Hiệu quả này được thể hiện

qua việc bề mặt phôi sau khi đánh bóng trở nên mịn hơn, với các vết xước nhỏ hơn rõ rệt, cho thấy chất lượng hoàn thiện bề mặt đã được cải thiện đáng kể.

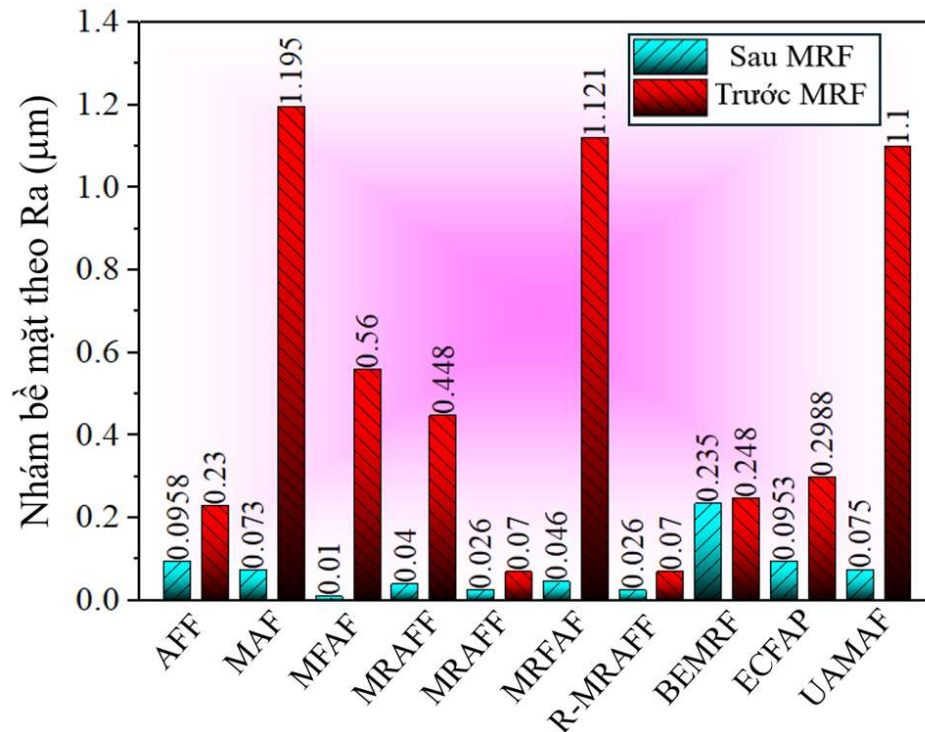
1.4. THÁCH THỨC KHI ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH VẬT LIỆU HỢP KIM TITANIUM

Hiệu ứng đánh bóng từ tính đến khả năng cải thiện nhám bề mặt như mô tả trên Hình 1.10. Hình ảnh cho thấy tốc độ quay của phôi, khoảng cách đánh bóng và nồng độ hạt sắt từ (CIP) đóng vai trò quyết định nhằm nâng cao chất lượng nhám bề mặt. Cụ thể, trong đánh bóng MRAF, độ nhám được cải thiện khoảng 97.68% khi tối ưu tốc độ quay và 93.27% khi điều chỉnh khoảng cách làm việc. Việc tăng cường tối ưu các thông số này góp phần nâng cao chất lượng bề mặt của phôi.



Hình 1.10 Ảnh hưởng chế độ công nghệ khi đánh bóng từ tính vật liệu hợp kim titanium đến chất lượng bề mặt [79-81]

Hình 1.11 mô tả khả năng đánh bóng từ tính ở cấp độ nanomet khi gia công bề mặt hợp kim titanium, giúp đạt được độ nhám bề mặt tối thiểu. Cụ thể, quá trình MFAF đã làm giảm đáng kể độ nhám bề mặt từ 0.56 μm xuống chỉ còn 0.01 μm qua đó khẳng định khả năng đánh bóng vượt trội của phương pháp này. Sự cải thiện ấn tượng này biểu hiện rõ rệt về tính hiệu quả và độ chính xác của MFAF trong việc tạo ra bề mặt siêu mịn, nhất là khi áp dụng cho các chi tiết có hình dạng khó gia công. Nhờ đó, MFAF trở thành một giải pháp đầy hứa hẹn không chỉ trong gia công hợp kim titanium mà còn trong sản xuất và hoàn thiện các chi tiết cấy ghép sinh học từ hợp kim này.



Hình 1.11 Các quy trình đánh bóng từ tính nanomet đối với hợp kim titanium
[75, 82-85]

Công nghệ đánh bóng từ tính nanomet đang nổi lên như một phương pháp hiệu quả nhằm hoàn thiện bề mặt titanium và hợp kim của chúng. Mặc dù vậy, để có thể tối ưu hóa và triển khai bền vững trong môi trường công nghiệp, tồn

tại nhiều thách thức đòi hỏi phải được khắc phục, bao gồm cơ chế hoạt động của chuỗi từ tính, kiểm soát từ trường, hiệu suất gia công và tính kinh tế. Trong bối cảnh đó, việc hình thành và duy trì chuỗi từ tính ổn định đóng vai trò như dụng cụ cắt vi mô. Điều này đòi hỏi phải kiểm soát chính xác lực từ và phân bố từ trường để đảm bảo hình dạng, độ cứng và hiệu quả loại bỏ vật liệu của chuỗi hạt mài. Ngoài ra, quá trình mòn hạt mài và biến dạng chuỗi từ tính theo thời gian cũng ảnh hưởng đến hiệu quả gia công, yêu cầu giải pháp bổ sung hạt mài liên tục.

Độ bám dính cao của titanium với hạt mài là một vấn đề kỹ thuật đáng lưu ý, có thể gây khuyết tật bề mặt. Trong đó lựa chọn hạt mài phù hợp và kiểm soát quá trình gia công là yêu cầu quan trọng để loại bỏ hiện tượng này. Đặc biệt, trong ứng dụng y sinh, cần tiến hành khảo sát tính tương thích sinh học của bề mặt sau gia công.

Bên cạnh hiệu quả được khẳng định qua các công trình nghiên cứu gần đây, các ứng dụng công nghệ này trong thực tiễn công nghiệp vẫn phải đối mặt với trở ngại lớn về chi phí đầu tư, khả năng kiểm soát và độ ổn định vận hành. Quá trình tích hợp hệ thống giám sát và điều khiển tự động theo thời gian thực là cần thiết. Cần tăng cường các thử nghiệm thực tế nhằm đảm bảo hiệu quả và độ tin cậy trong những lĩnh vực yêu cầu cao như hàng không, y tế và điện tử.

Công nghệ đánh bóng từ tính nanomet cho titanium và hợp kim titanium có nhiều ưu điểm, mặc dù vậy vẫn đặt ra nhiều thách thức. Khả năng ứng dụng hiệu quả trong công nghiệp phụ thuộc vào triển khai các nghiên cứu chuyên sâu nhằm kiểm soát lực từ, tối ưu hóa thông số gia công, tăng cường lực tác động tại vùng đánh bóng, phát triển dung dịch MRF hướng tới hiệu quả sử dụng, tính bền vững môi trường, cùng với đó là cải thiện hiệu suất và giảm chi phí vận hành.

Giải quyết những vấn đề tồn tại sẽ góp phần thúc đẩy việc mở rộng ứng dụng của phương pháp đánh bóng MRF trong tương lai.

1.5. PHÂN TÍCH DUNG DỊCH TỪ TÍNH KHI ĐÁNH BÓNG VẬT LIỆU HỢP KIM TI-6AL-4V

Ti-6Al-4V được đánh giá cao nhờ đặc tính tương thích sinh học tốt và độ bền ăn mòn cao cùng trọng lượng nhẹ, chỉ bằng 56% so với thép không gỉ. Bên cạnh đó, hợp kim này còn nổi bật với độ bền cao, sở hữu độ cứng cao và khả năng chịu nhiệt vượt trội, nhờ đó được xem là vật liệu tối ưu cho nhiều ứng dụng kỹ thuật. Chính vì vậy, Ti-6Al-4V có mặt trong hầu hết các thiết bị cấy ghép y tế, hàng không vũ trụ, ngành hóa dầu, tua bin khí, thiết bị y tế và linh kiện ô tô [55, 86, 87]. Các ứng dụng đa dạng của Ti-6Al-4V áp dụng trong những lĩnh vực kỹ thuật hiện đại, đòi hỏi chất lượng bề mặt vượt trội, không tồn tại khuyết tật. Các đặc tính không mong muốn của chúng do gia công truyền thống tạo ra, chẳng hạn như mô đun đàn hồi thấp, độ bền cao, độ dẫn nhiệt kém, độ cứng cao và phản ứng hóa học cao, cũng được tìm thấy trong quá trình gia công Ti-6Al-4V [88, 89]. Nhiều kỹ thuật khác nhau đã được đề xuất và hoàn thiện để gia công hợp kim Ti-6Al-4V, nhằm tạo ra bề mặt có độ nhẵn cao, bao gồm đánh bóng cơ học hóa học, đánh bóng điện phân, đánh bóng hóa học, và đánh bóng từ tính [67, 90]. Trong đó, đánh bóng bằng chất lỏng từ tính (MRF) nổi lên như một phương pháp hoàn thiện tiên tiến, có tính linh hoạt cao, đặc biệt với vật liệu khó gia công cho độ nhẵn cấp nano [91, 92]. Phương pháp này vừa đáp ứng yêu cầu về độ chính xác và chất lượng bề mặt, vừa mang lại sự linh hoạt, tạo đóng góp đáng kể cho sự phát triển công nghệ gia công hợp kim Ti.

Công nghệ đánh bóng MRF được xếp vào nhóm gia công đầy triển vọng, không tạo ra lớp sai hỏng trên bề mặt hoặc lớp dưới bề mặt gia công và có xu hướng được triển khai rộng rãi hơn trong các quy trình gia công nhằm đạt được

bề mặt siêu mịn [92, 93]. Dưới tác động của từ trường ngoài, dung dịch MRF chứa các hạt mài phi từ tính (như Al_2O_3 , ZrO_2 , CeO_2 , kim cương hoặc silica) và các hạt từ tính (hạt sắt cacbonyl, Fe_3O_4 , Fe_2O_3) có độ nhớt tăng đáng kể. Khi tiếp xúc với bề mặt gia công, các hạt mài phi từ tính được giữ lại trong dải băng ruy MRF nhờ các hạt từ tính dưới tác động của lực từ; lực này tạo ra hiệu ứng mài giữa các hạt mài phi từ tính và bề mặt vật liệu đã gia công khi có chuyển động giữa bề mặt phôi và dải MRF [91, 94]. Trong quá trình đánh bóng MRF, dải băng ruy MRF đóng vai trò trung tâm khi vừa bóc tách vật liệu vừa cải thiện đáng kể chất lượng bề mặt. Nghiên cứu của Murata và cộng sự [95] đã đề xuất hạt mài tổng hợp đa thành phần polyme/ CeO_2 - Fe_3O_4 mới, được áp dụng trong đánh bóng thấu kính với sự hỗ trợ của từ trường. Các hạt mài tổng hợp này này cho thấy MRR cao hơn đáng kể so với hạt mài truyền thống, giúp đạt được độ nhám bề mặt phôi thấu kính thấp. Shafrir và cộng sự [96] đã áp dụng quy trình sol-gel phức tạp để phủ hạt mài ZrO_2 lên các hạt sắt cacbonyl, đạt được MRR ổn định và chất lượng bề mặt vượt trội cho vật liệu thủy tinh quang học và vật liệu gốm thông qua quy trình đánh bóng MRF được thiết lập. Phương pháp này bao gồm việc phủ các hạt mài phi từ tính lên bề mặt của hạt từ tính, đóng vai trò là bộ phận dẫn động trong quá trình đánh bóng MRF. Nhiều quy trình phủ bề mặt khác nhau đã được triển khai, chẳng hạn như ứng dụng hạt nano polystyrene [97], silica [98] và phosphat [99] lên các hạt sắt cacbonyl từ tính qua đó nâng cao khả năng chống ăn mòn, chống oxy hóa và cải thiện khả năng phân tán. Tuy nhiên phương pháp phủ lên bề mặt hạt mài thường phức tạp và cần nghiên cứu sâu hơn. Trong các quy trình đánh bóng MRF, các hạt mài SiO_2 được chứng minh là phù hợp hơn CeO_2 và ZrO_2 trong việc đánh bóng tấm sapphire, do nó phản ứng với bề mặt sapphire và tạo ra các lớp phản ứng mềm dễ dàng loại bỏ cơ học trong quá trình đánh bóng MRF [100]. Zhai và cộng sự [101] đã phát triển hạt hỗn hợp Fe_3O_4 - SiO_2 để đánh bóng MRF các tấm sapphire, qua đó cải

thiện cả chất lượng bề mặt và hiệu quả đánh bóng so với các hạt mài từ tính, Al_2O_3 , và Fe_3O_4 . Nghiên cứu cũng tập trung vào việc làm rõ mối quan hệ giữa tốc độ loại bỏ vật liệu (MRR) của sapphire và độ nhót của dải băng ruy MRF dưới tác dụng của từ trường. Zhai và cộng sự [102] đã đề cập vai trò silica trong quy trình đánh bóng MRF, trong đó silica ngoài giảm nhám bề mặt còn hỗ trợ loại bỏ các lớp mỏng lượng dư vật liệu gia công thông qua lớp phản ứng bề mặt nhằm tạo nên bề mặt siêu mịn trong các quy trình đánh bóng MRF [103, 104]. Ngoài ra trong nghiên cứu trước đây nghiên cứu sinh và cộng sự [105] khi áp dụng vào quy trình đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V trong quy trình đánh bóng MRF với mảng Halbach vòng khi sử dụng hạt mài silica, qua đó tạo một lớp phản ứng bề mặt hình thành trên phôi góp phần cải thiện bề mặt. Qua đó thấy được khả năng ứng dụng chất mài mòn silica trong đánh bóng MRF.

Các phương pháp đánh bóng bằng chất lỏng từ tính (MRF) đã chứng tỏ khả năng tạo ra bề mặt siêu mịn, nhưng hiện tại, hai loại phương pháp đánh bóng từ tính phổ biến là đầu bi và bánh xe [40, 48] vẫn tồn tại một số hạn chế. Cả hai mô hình này cho hiệu suất đánh bóng thấp, với thời gian gia công dài và khó áp dụng sản xuất công nghiệp quy mô lớn hoặc cho các bề mặt kích thước lớn. Một phương pháp nhằm nâng cao hiệu quả của quy trình MRF là tăng cường cường độ từ trường bởi mảng Halbach [28, 106]. Mảng từ trường Halbach không chỉ tăng cường cường độ từ trường mà còn cải thiện hiệu quả tổng thể của quá trình đánh bóng. Trong các ứng dụng như máy gia tốc hạt, máy phân tích từ, động cơ hiệu suất cao và chụp cộng hưởng từ (MRI), mảng Halbach thường được sử dụng để tạo ra từ trường có cường độ cao với kích thước nam châm nhỏ gọn và số lượng ít [107, 108]. Hơn nữa, các mảng Halbach dễ dàng mở rộng diện tích tạo từ trường, qua đó nâng cao khả năng đánh bóng của các dung dịch chất lỏng từ tính và có thể áp dụng cho các bề mặt có kích thước lớn. Dựa trên các đặc điểm phân tích đã đề cập, trong nghiên cứu này, một phương pháp mới được đề xuất

nhằm đạt được chất lượng bề mặt cực mịn ở thang nanomet trong các quy trình MRF cho vật liệu Ti-6Al-4V. Phân tích cho thấy rằng việc sử dụng các hạt từ tính Fe_3O_4 kết hợp với các hạt mài mòn SiO_2 , cùng với cường độ từ trường được nâng cao từ mảng Halbach, có tiềm năng lớn trong hoàn thiện bề mặt của hợp kim Ti-6Al-4V, đặc biệt bề mặt có kích thước lớn.

Để đạt được bề mặt gương siêu mịn và khắc phục các khuyết tật trên bề mặt hợp kim Ti, nghiên cứu bởi Deng và cộng sự [109] bổ sung 3% H_2O_2 vào keo silica, cho phép họ đạt được độ nhám bề mặt ở quy mô nanomet trên phôi Ti nguyên chất, đồng thời nghiên cứu cho thấy bề mặt không tồn tại lớp phản ứng hay thành phần không mong muốn. Zhang và cộng sự [110] đã áp dụng dung dịch cơ hóa học bao gồm các hạt silica (SiO_2) và axit lactic để hình thành lớp ức chế ăn mòn trên bề mặt hợp kim Ti. Một mô hình mở rộng bởi Liang và các cộng sự [111], khi nghiên cứu của họ phát hiện rằng một lớp ức chế hình thành dựa trên sự khuếch tán và phức hợp với florua và amoniac trong dung dịch MRF. Các phát hiện bởi các tiến trình thực nghiệm được hỗ trợ bởi quy trình phân cực tuyến tính nhanh chóng của lớp oxit do H_2O_2 gây ra đã làm tăng khả năng loại bỏ vật liệu. Các quy trình đánh bóng sử dụng bùn với thành phần silica, Fe_3O_4 và H_2O_2 đã tận dụng sự kết hợp giữa chúng, qua đó thúc đẩy sự phát triển của các phương pháp đánh bóng bền vững. Trong thành phần của chất lỏng đánh bóng, axit malic, được biết đến với các đặc tính xanh, là một hợp chất có nguồn gốc từ trái cây và đã được ứng dụng rộng rãi trong thực phẩm và y tế [105]. Silica (SiO_2), với nguồn gốc từ lớp vỏ trái đất, có vai trò chính trong đánh bóng MRF, cung cấp các đặc tính đánh bóng hiệu quả trong khi đảm bảo hoàn thiện xanh. Hơn nữa, các hạt sắt từ tính (Fe_3O_4) có thể được tích hợp một cách liên mạch vào quy trình đánh bóng MRF mà không gây hại cho môi trường. Chất oxy hóa H_2O_2 , trong các ứng dụng y tế và thực phẩm, được biết đến như một chất khử trùng da hiệu quả. H_2O_2 trong tự nhiên phân hủy thành nước và oxy trong

điều kiện tiêu chuẩn qua đó tăng tính bền vững của công nghệ MRF. Quy trình hoàn thiện MRF thông qua tích hợp các vật liệu xanh trong hỗn hợp đánh bóng được đề xuất cho quy trình MRF ngoài tăng hiệu quả đánh bóng còn đóng vai trò trong sản xuất xanh.

1.6. KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Các đặc tính của công nghệ đánh bóng bằng chất lỏng từ tính (MRF) được hệ thống hóa, cho thấy tính ứng dụng cao của công nghệ MRF đối với nhiều loại vật liệu khác nhau, trong đó hiệu quả với các vật liệu khó gia công như hợp kim titanium. Đồng thời, chương này cũng khảo sát tính khả thi và tiềm năng đánh bóng MRF tại Việt Nam.

Các kỹ thuật đánh bóng từ tính cho hợp kim titanium được phân tích, cho thấy khả năng đạt độ nhám bề mặt cấp nanomet, phù hợp trong các ngành công nghệ cao như y sinh và hàng không.

Trong số các công nghệ đánh bóng từ tính, công nghệ đánh bóng dạng đĩa được công nhận về khả năng gia công hiệu quả và độ chính xác khi gia công bề mặt phẳng hợp kim titanium.

Công nghệ đánh bóng từ tính MRF cho titanium và hợp kim titanium có nhiều tiềm năng, tuy nhiên để áp dụng hiệu quả đòi hỏi nghiên cứu sâu về kiểm soát lực từ, tối ưu hóa thông số gia công, phát triển dung dịch MRF thân thiện với môi trường, kết hợp với hiệu quả cao và tiết kiệm chi phí.

Để cải thiện hiệu quả đánh bóng từ tính, nghiên cứu đề xuất ứng dụng màng Halbach cải tiến và dung dịch đánh bóng thân thiện môi trường (Fe_3O_4 , SiO_2 , H_2O_2 , axit malic) nhằm tăng chất lượng và năng suất.

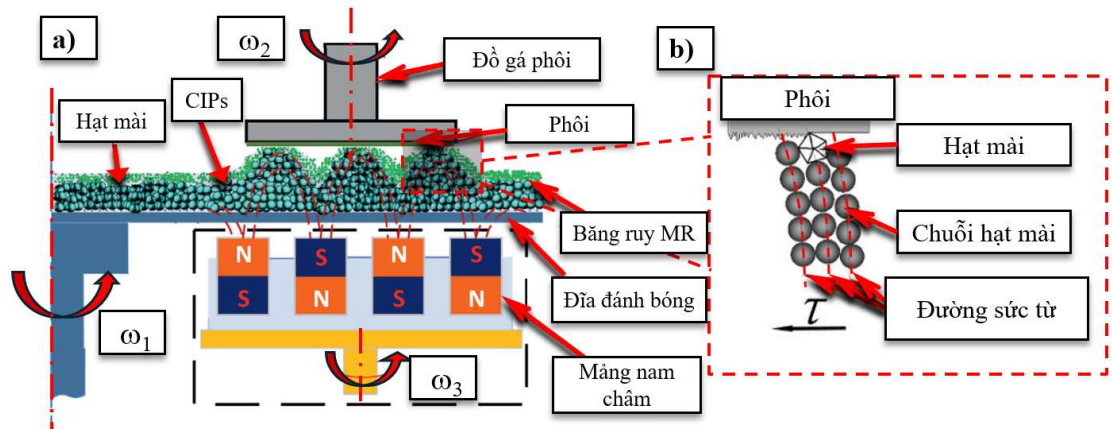
CHƯƠNG 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH SỬ DỤNG MẢNG HALBACH CẢI TIẾN

Công nghệ MRF, phương pháp xử lý bề mặt tiên tiến, tích hợp các kiến thức về vật liệu từ tính, động lực học chất lỏng và xử lý hóa học. Nguyên lý hoạt động của đánh bóng MRF dựa trên tác dụng của từ trường để kiểm soát hạt mài thông qua chuyển động hạt sắt từ, giúp đánh bóng chính xác, hạn chế vết nứt tế vi hình thành bên dưới bề mặt sau gia công và đặc biệt phù hợp cho bề mặt phức tạp. Nhờ những ưu điểm này, MRF được sử dụng trong nhiều lĩnh vực. Dựa trên phân tích trên trong chương này nguyên lý đánh bóng từ tính, cơ chế loại bỏ vật liệu và độ nhót biểu kiến của MRF đã được nghiên cứu chi tiết. Từ đó, một hệ thống đánh bóng từ tính sử dụng mảng Halbach cải tiến đã được phát triển. Tác động của từ trường đến động học của hạt từ tính và hạt mài cũng được khảo sát. Cuối cùng, một mô hình lực đánh bóng dành cho hệ thống sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi đã được xây dựng nhằm tạo ra mô hình đánh bóng từ tính hiệu quả.

2.1. NGUYÊN LÝ VÀ ĐỘ NHÓT BIỂU KIẾN TRONG QUÁ TRÌNH ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH

Hình 2.1 mô tả phương pháp đánh bóng MRF điển hình trong hoàn thiện bề mặt phẳng. Một mảng nam châm vĩnh cửu được thiết lập bên dưới đĩa mang dung dịch từ tính nhằm tạo vùng từ trường mạnh ở vùng đánh bóng. Trước khi bắt đầu quá trình đánh bóng MRF, pad đánh bóng được dán cố định trên bề mặt đĩa đánh bóng, sau đó một thể tích dung dịch từ tính phù hợp được đưa vào. Khi từ trường tác động, một lớp đệm từ lưu biến (MR) có tính đàn hồi được hình thành giữa bề mặt pad đánh bóng và bề mặt gia công [112, 113]. Trong quá trình hoạt động, đĩa đánh bóng, đầu đánh bóng và giá đỡ nam châm lần lượt quay với các tốc độ ω_1 , ω_2 và ω_3 . Khoảng cách làm việc K giữa bề mặt pad đánh bóng và

mặt dưới của phôi được điều chỉnh ở mức thích hợp để đảm bảo hiệu quả gia công. Các hạt mài được giữ và tập trung trên bề mặt băng ruy MR, đảm bảo khả năng loại bỏ vật liệu đồng đều khi tiếp xúc với bề mặt gia công. Đặc biệt, các hạt sắt carbonyl (CIPs) ở phần trên của lớp đệm đóng vai trò cố định các hạt mài, giúp quá trình gia công diễn ra hiệu quả, như mô tả trong Hình 2.1b.

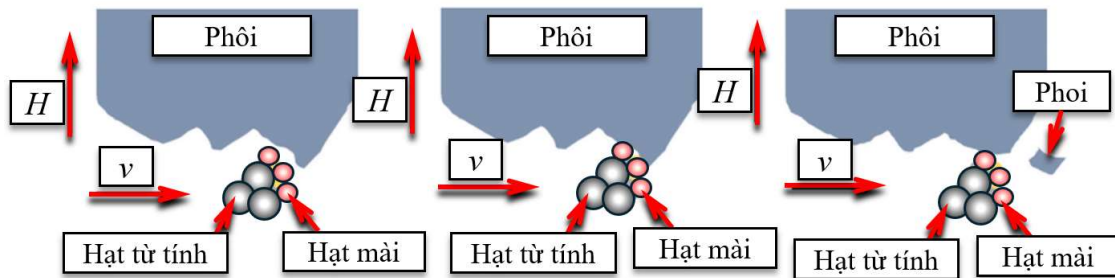


Hình 2.1 Sơ đồ nguyên lý đánh bóng MRF dạng đĩa

Trong các nghiên cứu về công nghệ đánh bóng từ tính (MRF), phân bố của từ trường đã được chứng minh có ảnh hưởng quan trọng đến hiệu quả của quá trình MRF. Kordonski [114] và Zhang [115] nhận thấy rằng vật liệu được loại bỏ cao hơn khi từ trường mạnh hơn trong vùng đánh bóng. Wang và cộng sự [116] đã phát triển một bộ khung nam châm vĩnh cửu với khe không khí thẳng để cải thiện độ phẳng của bề mặt sau khi đánh bóng. Pan và cộng sự [117] đã giới thiệu cụm đệm MR, trong đó các cực nam châm được sắp xếp theo các hình dạng khác nhau, từ đó quan sát các hiệu quả đánh bóng khác nhau.

Các nam châm được gắn vào giá đỡ và quay xung quanh trục của giá đỡ. Khoảng cách kích từ giữa mặt dưới của đĩa đánh bóng và bề mặt của các nam châm có thể được điều chỉnh, qua đó điều chỉnh mật độ từ thông tại bề mặt đĩa đánh bóng. Dưới tác động của từ trường, dung dịch MRF từ trạng thái lỏng chuyển sang tương tự như chất lỏng Bingham và hình thành dạng chuỗi dọc theo

các đường sức từ. Khi phôi di chuyển đến gần các cụm từ, áp lực P được tạo ra do sự tập trung của các cụm này. Khi này dung dịch MRF bị hút mạnh vào pad đánh bóng do lực từ tác dụng đồng thời ứng suất trượt τ sinh ra khi dung dịch từ chịu tác động bởi từ trường hình thành nên lực cắt từ các hạt mài.

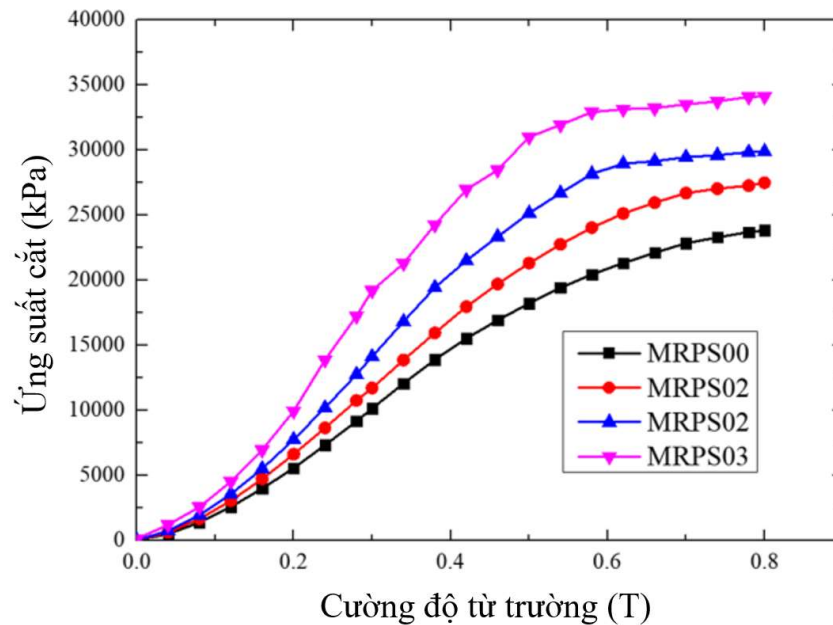


Hình 2.2 Nguyên lý quá trình loại bỏ vật liệu trong đánh bóng MRF

Quá trình loại bỏ vật liệu trong đánh bóng từ lưu biến (MRF) được xem như một dạng cắt vi cơ học, diễn ra theo hai cơ chế chính: phá vỡ do ép nén và cắt do trượt. Dưới tác động của áp lực từ các hạt mài, các vùng nhấp nhô bị biến dạng và dần bị loại bỏ theo thời gian, nhờ sự tác động liên tục của lực đánh bóng. Hình 2.2 minh họa quá trình tương tác của hạt mài lên bề mặt phôi trong đánh bóng MRF. Ban đầu, các hạt mài chịu tác động của áp suất động lực học, tạo áp lực theo phương thẳng đứng lên bề mặt chi tiết. Trong các quy trình đánh bóng MRF, các hạt mài tiếp xúc nhiều hơn với bề mặt chi tiết theo thời gian và liên tục lấy đi lớp vật liệu dư trên bề mặt gia công cho đến khi bề mặt đạt được chất lượng và nhám mong muốn.

Trong gia công từ tính chính xác, các đặc tính từ tính của dung dịch MR đề cập đến hành vi dòng chảy của dung dịch từ tính dưới ảnh hưởng của từ trường. Ứng suất cắt động lực học quyết định việc tạo ra lực đánh bóng trong quá trình MRF, từ đó tác động trực tiếp đến hiệu suất của quá trình loại bỏ vật liệu. Mật độ từ thông tác động lên ứng suất cắt đối với dung dịch có độ nhớt khác nhau được mô tả trên Hình 2.3. Kết quả thu được ứng suất cắt trên các mẫu tăng

lên khi mật độ từ thông tăng. Ứng suất cắt của dung dịch từ tính MRPS được coi là ứng suất cần thiết để vượt qua lực do từ trường tạo ra [118]. Đồng thời, nhận thấy rằng ứng suất trượt của MRPS03 lớn hơn rõ rệt so với MRPS00 khi độ nhớt tăng lên.



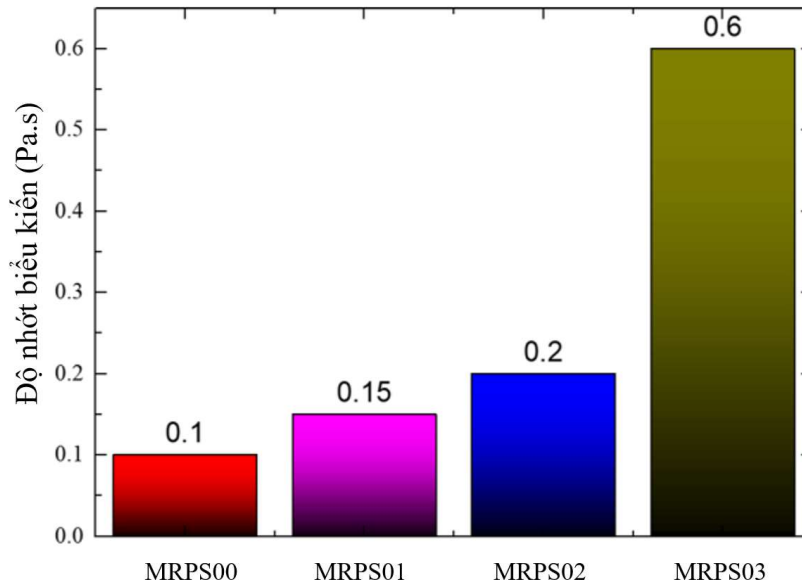
Hình 2.3 Ứng suất cắt theo mật độ từ thông và độ nhớt

Trong quá trình đánh bóng MRF, mật độ từ thông thường được sử dụng là 0.3 T. Như thể hiện trong Hình 2.3, ứng suất cắt của MRPS03 lớn hơn so với MRPS02 và MRPS01 tại mức 0.3 T. Như mô tả trên Hình 2.4 minh họa độ nhớt biểu kiến của các MRPS khác nhau trong điều kiện không có từ trường tại tốc độ cắt là 100 (1/s).

Như mô tả trong Hình 2.5, MRPS tập hợp thành cụm dọc theo các đường sức từ trong trường từ, tạo ra hiệu ứng MR trong quá trình đánh bóng. Độ cứng của các cụm tăng lên cùng với cường độ từ của các hạt CIPs bị từ hóa, cho thấy rằng ứng suất cắt τ của MRPS tăng khi mật độ từ thông tăng. Ứng suất cắt τ của MRPS được biểu diễn bởi phương trình sau [118]:

$$\tau = k \frac{\pi^2 r \varphi \chi^2 B^2}{72 \mu_o \delta} \quad (2.1)$$

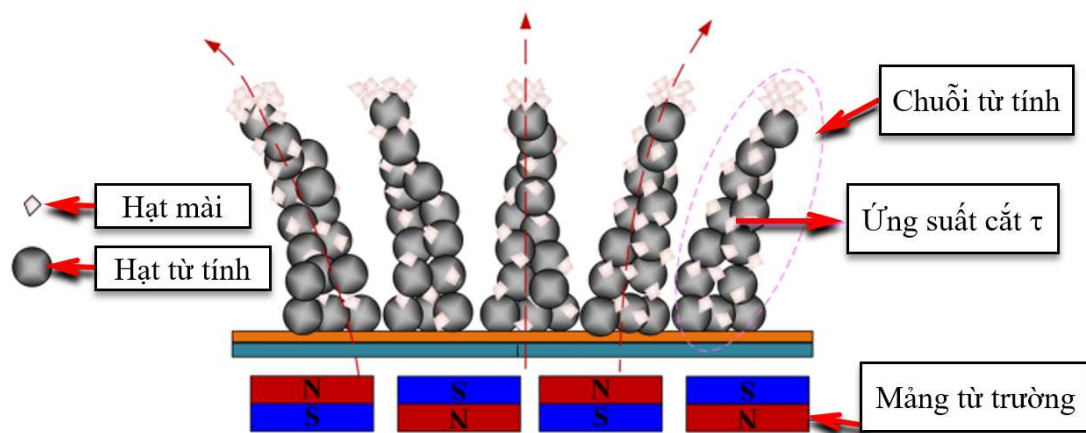
Trong đó: φ khối lượng CIPs trong MRPS, r là bán kính của các hạt CIPs, χ là độ từ cảm của các hạt CIPs, B là mật độ từ thông, μ_o là độ thấm từ chân không.



Hình 2.4 Độ nhớt biểu kiến của các dung dịch từ tính MRPS khác nhau

Chất lỏng Newton có đặc tính biến dạng cắt tăng giảm theo tỷ lệ với tốc độ cắt. Trong khi đó, chất lỏng phi Newton có mối quan hệ phi tuyến tính giữa biến dạng cắt và tốc độ cắt. Chất lỏng từ lưu biến (MR) đại diện cho chất lỏng thông minh, thể hiện khả năng thay đổi đặc tính ngay lập tức khi chịu tác động của từ trường. Trong trạng thái ban đầu, chất lỏng MR chứa các hạt phân tán ngẫu nhiên và có độ nhớt ổn định. Tuy nhiên, khi tiếp xúc với từ trường ngoài, các hạt trong chất lỏng MR tự tổ chức thành các chuỗi, làm cho chất lỏng chuyển thành trạng thái bán rắn, qua đó tăng khả năng chịu tải, và mức độ thay đổi này tăng theo cường độ từ trường bên ngoài (H) như minh họa trong Hình 2.6.

Các nghiên cứu cho thấy độ nhớt phi tuyến là nhân tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng làm việc của dung dịch từ lưu biến (MR). Để hiểu rõ cơ chế động lực học chi phối chất lỏng MR, cần áp dụng các kỹ thuật hiện đại để đo lường và đặc trưng hóa độ nhớt phi tuyến. Một số nghiên cứu đã đánh giá hiệu suất của chất lỏng MR, tuy nhiên việc xác định chính xác độ nhớt phi tuyến vẫn là một thách thức lớn. Điều này chủ yếu do sự biến đổi trong cấu trúc vi mô ban đầu của chất lỏng MR, làm gia tăng độ phức tạp khi đánh giá hiệu suất, do độ nhớt thay đổi đáng kể theo cấu hình và thành phần dung dịch từ tính.

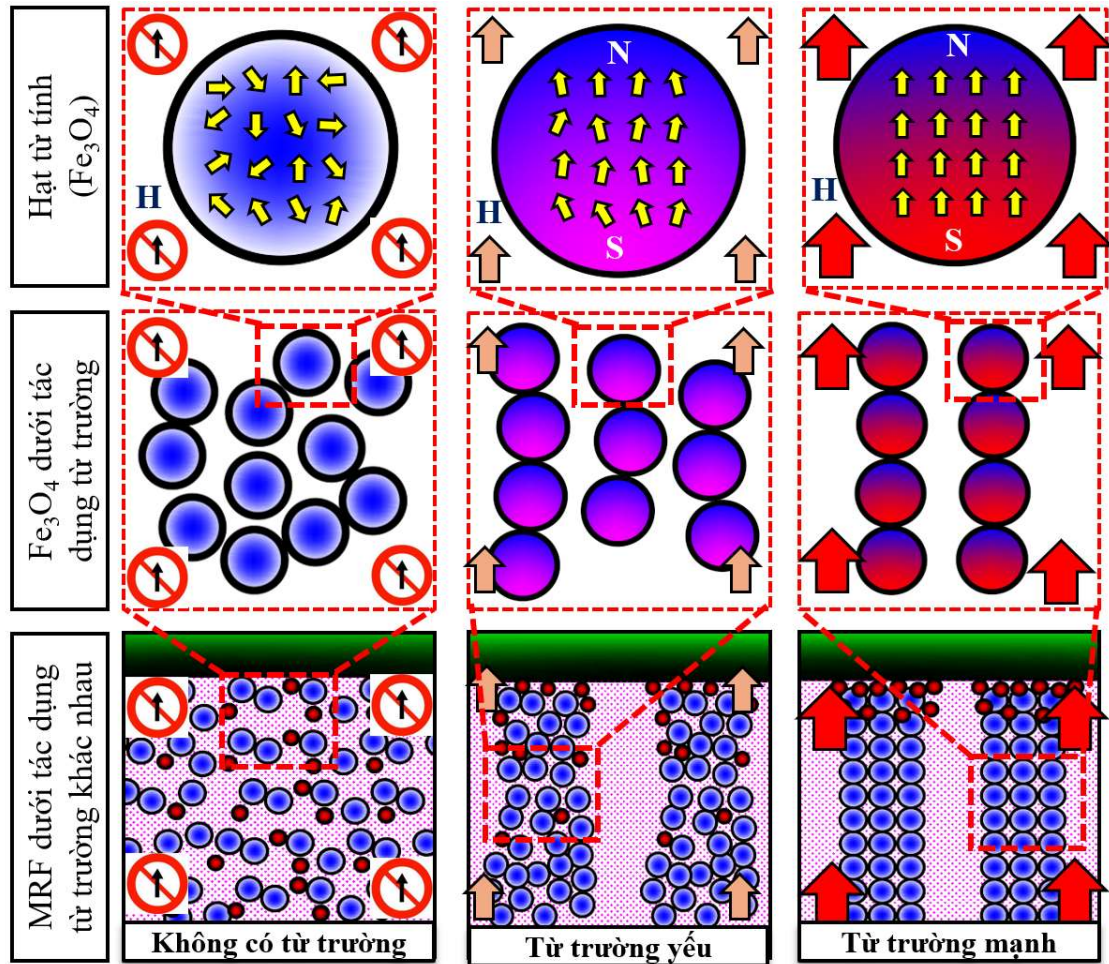


Hình 2.5 Sơ đồ minh họa sự hình thành chuỗi từ dưới tác động của từ trường

Nhằm khắc phục thách thức đề cập trên cùng với đó nâng cao độ chính xác trong đánh giá hiệu suất, cần tiếp tục thúc đẩy các nghiên cứu nhằm hiểu sâu và chính xác hơn về độ nhớt phi tuyến của chất lỏng MR trong các quy trình đánh bóng MRF. Việc dự đoán và đặc trưng hóa hành vi phi tuyến này đóng vai trò quan trọng trong tối ưu hóa dung dịch MR và là nền tảng cho thiết kế và phát triển các hệ thống đánh bóng MRF hiệu suất cao.

Hình 2.7 minh họa thay đổi ứng suất cắt và ứng suất nén trong chất lỏng MR khi cường độ từ trường thay đổi. Trong điều kiện cường độ từ trường thấp, ứng suất cắt trong chất lỏng MR chủ yếu được điều khiển bởi sự tương tác giữa các hạt phân tán trong dung dịch. Do các hạt không có liên kết mạnh mẽ với

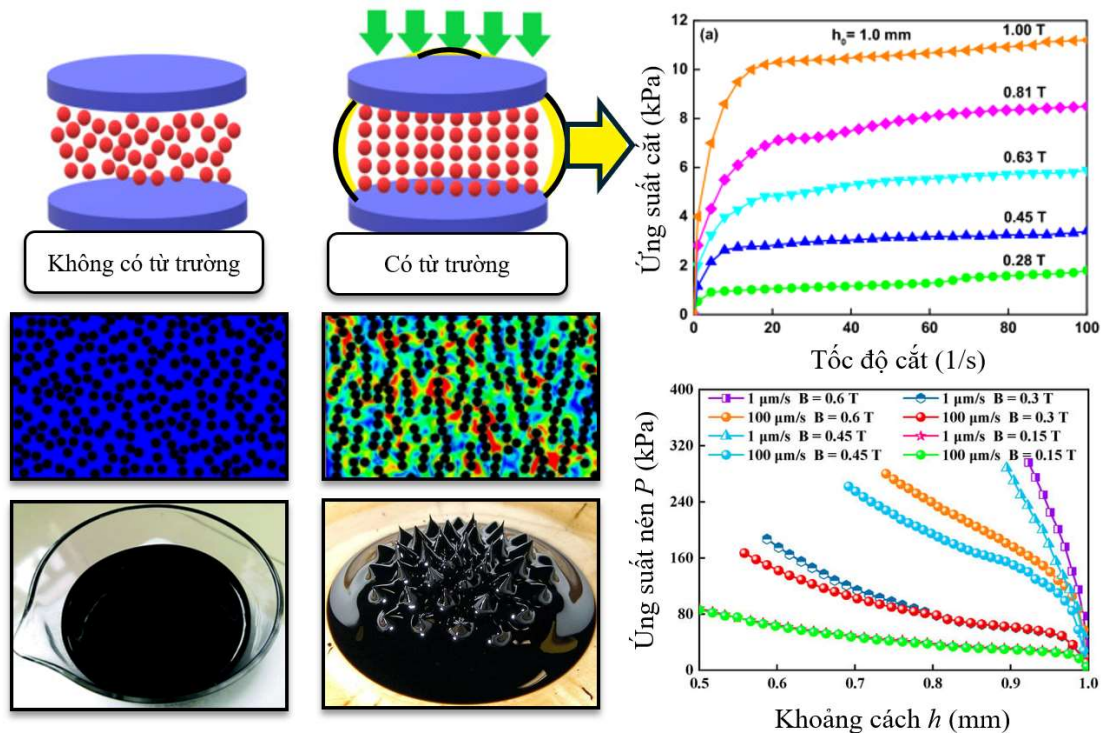
nhau, ứng suất cắt duy trì ở mức thấp, giúp chất lỏng giữ được độ linh hoạt cao. Tuy nhiên, khi cường độ từ trường tăng lên, các hạt từ tự tổ chức thành các chuỗi dưới tác động của lực từ do đó gia tăng ứng suất cắt. Các chuỗi từ tính này tạo ra lực cản sinh ra trong chất lỏng khi lực cắt được áp dụng, làm chất lỏng trở nên cứng và hình thành theo đường sức từ.



Hình 2.6 Hành vi cơ học của chất lỏng từ tính dưới tác động của từ trường ngoài khác nhau

Hành vi này đóng vai trò lớn nhằm kiểm soát hiệu suất vận hành của quá trình đánh bóng MRF, khi tối ưu hóa ứng suất cắt trở thành phần thiết yếu nhằm thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật đánh bóng cụ thể. Đối với ứng suất nén, khi các

chuỗi hạt từ tính hình thành dưới tác động của từ trường mạnh, khả năng chống lại lực nén của chất lỏng MR tăng lên. Khi cường độ từ trường càng cao, ứng suất nén trong chất lỏng MR càng tăng do các chuỗi hạt trở nên dày đặc và khó nén tại vùng tập trung từ trường cao. Điều này không chỉ làm thay đổi độ cứng của chất lỏng MR mà còn ảnh hưởng tới khả năng hấp thụ và truyền lực. Ứng suất nén cao hơn có thể giúp cải thiện hiệu quả đánh bóng MRF khi thay đổi thông số từ trường và chất lỏng MR.



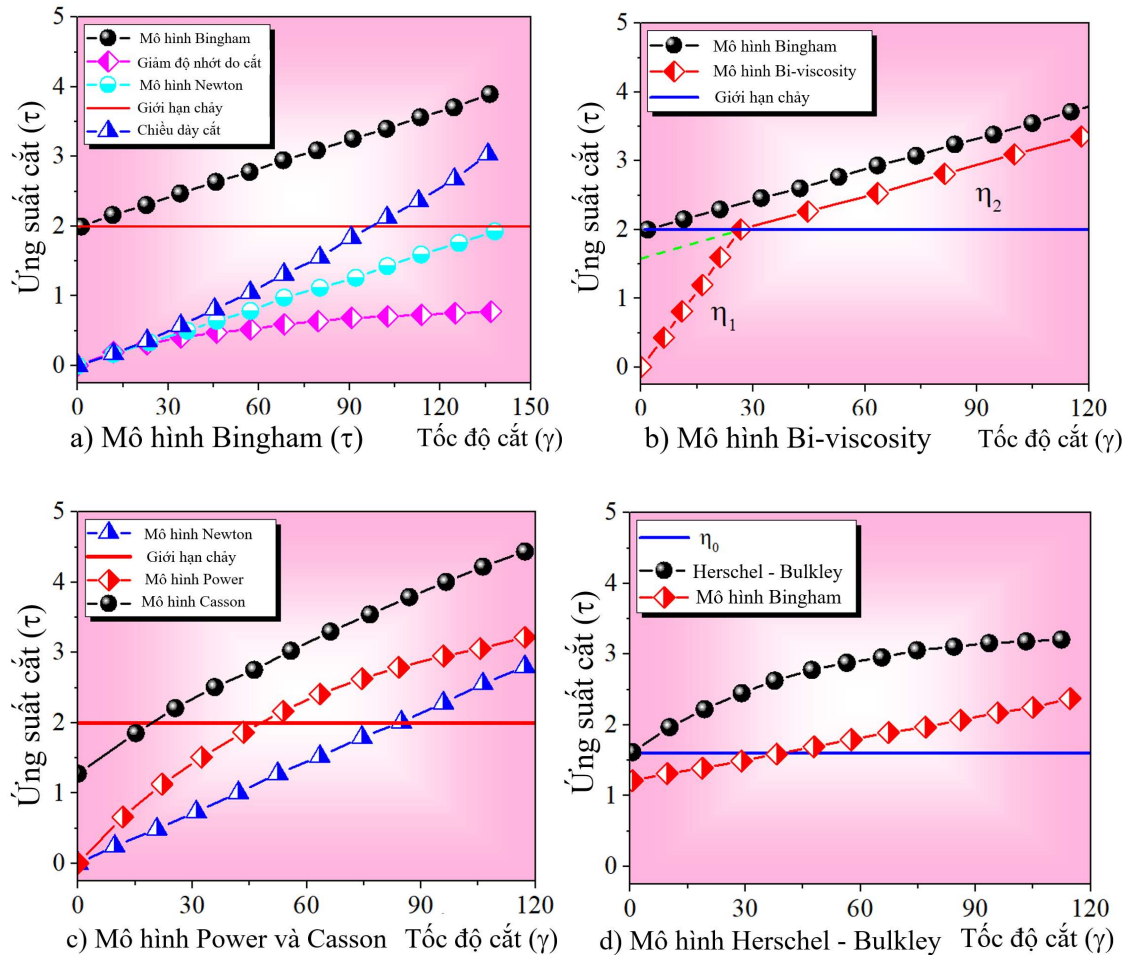
Hình 2.7 Tính chất từ lưu biến (MR) dưới tác dụng của cường độ từ trường khác nhau (H)

Mối tương quan giữa ứng suất cắt và tốc độ cắt giúp làm rõ tiềm năng và hiệu quả của đánh bóng từ tính của chất lỏng MR như được biểu diễn trong phương trình (2.2). Trong đó $\dot{\gamma}$ biểu thị thành phần đặc trưng của tốc độ cắt, trong khi η đại diện cho độ nhớt hiệu dụng.

$$S = \eta \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

Chất lỏng Newton có độ nhớt không đổi bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ, được biểu diễn bằng η . Sự liên hệ giữa độ nhớt, tốc độ cắt ($\dot{\gamma}$) và nhiệt độ (θ_i) được mô tả trong phương trình (2.3).

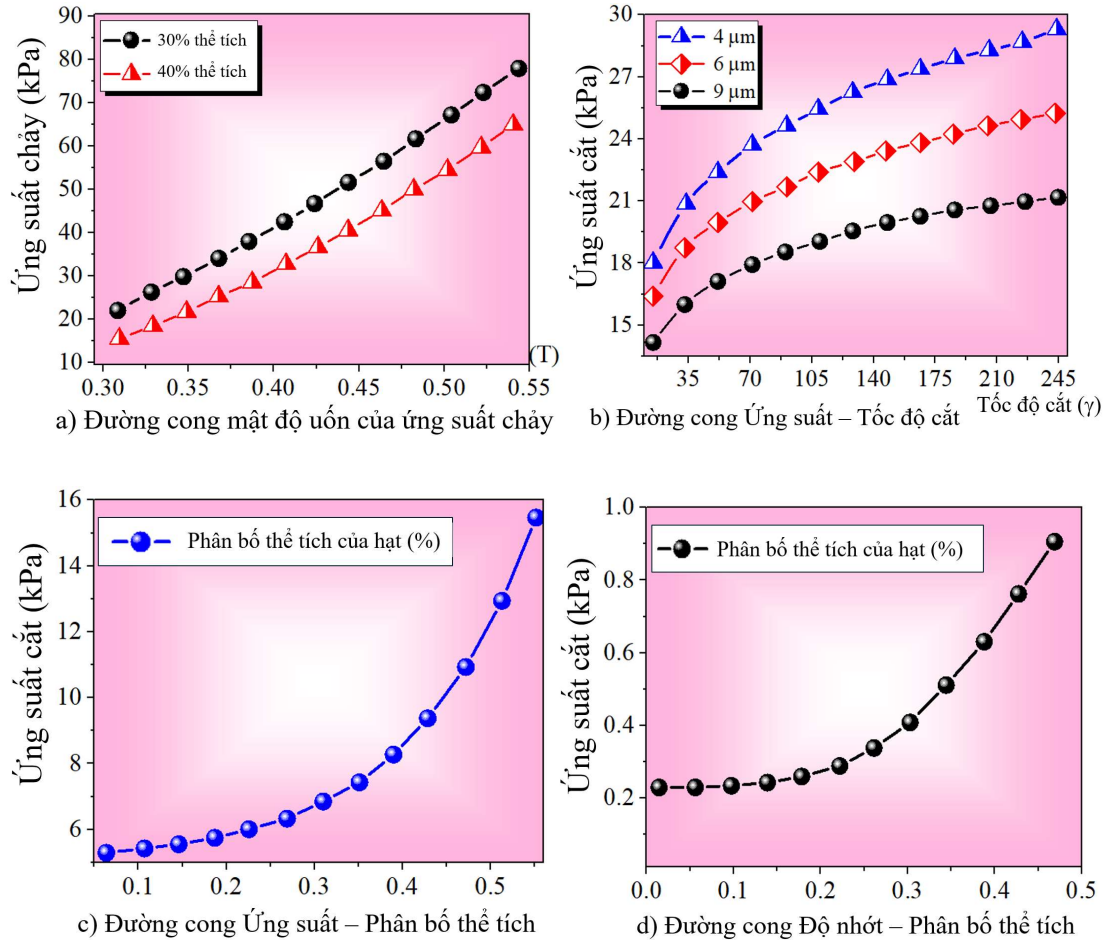
$$\eta = (\theta_i, \dot{\gamma}) \quad (2.3)$$



Hình 2.8 Động lực của hành vi dòng chảy trong các mô hình lưu biến từ khác nhau

Chất lỏng phi Newton thường được phân thành hai nhóm chất lỏng: tốc độ cắt tăng độ nhớt giảm và tốc độ cắt tăng độ nhớt tăng. Để mô tả hành vi phi Newton của chất lỏng MR, những mô hình phổ biến thường áp dụng bao gồm

Bingham, Herschel-Bulkley, định luật mũ Powers và Casson biểu diễn trên Hình 2.8.



Hình 2.9 Hành vi dòng chảy động của chất lỏng MR thông thường [119]

Mô hình Bingham đặc trưng bởi sự đơn giản và dễ triển khai trong thực tiễn và sớm nhất giúp dễ tiếp cận và ứng dụng trong số mô hình phi Newton. Tuy nhiên, hạn chế chính của nó nằm ở chỗ không thể nắm bắt chính xác hành vi của chất lỏng ở tốc độ cắt thấp, khiến nó chỉ thích hợp cho các điều kiện cụ thể. Mô hình Casson cung cấp độ chính xác được cải thiện trong việc mô tả hành vi phi tuyến tính của chất lỏng ở tốc độ cắt thấp, mặc dù nó không đủ khả năng dự đoán hành vi ở tốc độ cắt cao hơn. Mặt khác, mô hình Bi-viscosity có lợi thế trong

việc mô tả chất lỏng có các đặc tính độ nhớt thay đổi. Tuy nhiên, là một mô hình thực nghiệm không có nền tảng vật lý vững chắc, các tham số của nó thường được xác định từ dữ liệu thực nghiệm thay vì các đặc tính nội tại của chất lỏng MR. Sự phụ thuộc vào dữ liệu thực nghiệm này giới hạn phạm vi ứng dụng của mô hình Bi-viscosity khi không có xác nhận thực nghiệm toàn diện. Mô hình luật lũy thừa chủ yếu có hiệu quả đối với chất lỏng có độ nhớt giảm nhưng kém hiệu quả hơn trong trường hợp độ nhớt tăng. Hơn nữa, ước tính tham số trong khuôn khổ luật lũy thừa tính phức tạp cao, nhất là khi ứng dụng để mô tả các hiện tượng phi tuyến hoặc đặc tính của chất lỏng phức tạp. Ngược lại, mô hình Herschel-Bulkley đưa ra các giải thích vật lý mạnh mẽ và có khả năng dự đoán động lực học chất lỏng dưới các điều kiện khác nhau như tốc độ cắt cao hoặc nhiệt độ tăng.

Nhìn chung mỗi mô hình chất lỏng MR đều sở hữu ưu điểm và nhược điểm riêng, do đó chọn đúng mô hình trở thành một nhiệm vụ cần phân tích và cân nhắc thận trọng. Không tồn tại một mô hình nào có thể áp dụng cho tất cả các trường hợp, do đó việc lựa chọn cần được điều chỉnh phù hợp với yêu cầu cụ thể của từng ứng dụng. Do đó, để nắm bắt hiệu quả hành vi của chất lỏng MR trong bối cảnh vận hành cụ thể, việc xác định mô hình thích hợp dựa trên nhu cầu thực tiễn là cần thiết.

Trong nghiên cứu về chất lỏng từ tính (MR), các kỹ thuật tiếp cận và cơ hội mới tiếp tục xuất hiện. Phần giới thiệu chi tiết về chất lỏng MR phi tuyến tính được cung cấp trong phần này giúp thuận lợi trong phân tích và mô tả các đặc tính lưu biến của chúng, cung cấp nền tảng để dự đoán hiệu suất của chúng và tối ưu hóa thiết kế của chúng cho các quy trình đánh bóng.

Hiệu ứng MR có thể được điều chỉnh bằng cách cấu hình cẩn thận thành phần và cường độ của từ trường. Độ nhớt động học của chất lỏng MR được tạo

ra thông qua quá trình từ hóa các hạt phân tán khi có từ trường tác dụng. Mỗi hạt từ hoạt động như một lưỡng cực và liên kết với các hạt lân cận, tạo thành chuỗi dưới tác dụng của từ trường. Sự kích hoạt của các hạt từ này khiến các hạt tự sắp xếp theo đường cảm ứng từ, dẫn đến việc tạo ra cấu trúc dạng chuỗi. Cấu trúc này giúp thay đổi độ nhớt, tăng cường khả năng chống lại lực cắt. Do đó, có một ngưỡng cắt tại điểm mà các chuỗi hạt bị phân rã khi lực cắt vượt quá giới hạn này. Chất lỏng MR vẫn giữ được tính lưu động của chúng ngay cả ở tốc độ cắt cao, cho thấy lực cắt tối đa là giá trị cực đại của ứng suất cắt được áp dụng.

Lực cắt giới hạn trong chất lỏng từ lưu biến (MR) tỷ lệ thuận với cường độ từ trường hoặc mật độ từ thông, ảnh hưởng cơ bản đến các đặc tính lưu biến của chất lỏng như thể hiện trong Hình 2.9a. Mỗi quan hệ này đóng vai trò thiết yếu vì ảnh hưởng đến khả năng chống biến dạng của chất lỏng dưới tác dụng của lực cắt, do đó chi phối hiệu quả của hiệu ứng MR. Ảnh hưởng của thành phần hạt, kích thước và hình thái cấu trúc là đa diện và phức tạp. Các yếu tố này không chỉ xác định phản ứng ban đầu của chất lỏng MR đối với từ trường mà còn có vai trò then chốt trong việc duy trì ổn định và nâng cao hiệu suất lâu dài của chất lỏng MR trong thông số đánh bóng khác nhau. Các nghiên cứu gần đây đã cung cấp hiểu biết khi tăng phần thể tích của các hạt từ trong chất lỏng dẫn đến sự gia tăng đồng thời của cả lực cắt giới hạn và độ nhớt như được mô tả trong Hình 2.9c-d. Đây là một phát hiện quan trọng cho thấy rằng nồng độ các hạt từ kết quả này nhấn mạnh rằng chiến lược để tinh chỉnh các đặc tính lưu biến của chất lỏng, tối ưu hóa nó cho các ứng dụng đánh bóng. Nagdeve và các cộng sự chứng minh rằng các hạt nhỏ hơn, thường có kích thước từ 4-6 μm , có xu hướng làm giảm lực cắt như mô tả trong Hình 2.9b.

Trong quá trình đánh bóng, khi cường độ từ trường không đổi lực tiếp tuyến và pháp tuyến trên hạt mài ảnh hưởng bởi số lượng, sự sắp xếp ở cấp độ vi mô và kích thước của các hạt sắt cacbonyl (CI). Lực từ tác dụng lên từng hạt CI có

mối quan hệ với thể tích hạt, với kích thước hạt CI là nhân tố quan trọng để kiểm soát độ nhám bề mặt trong quá trình đánh bóng MR.

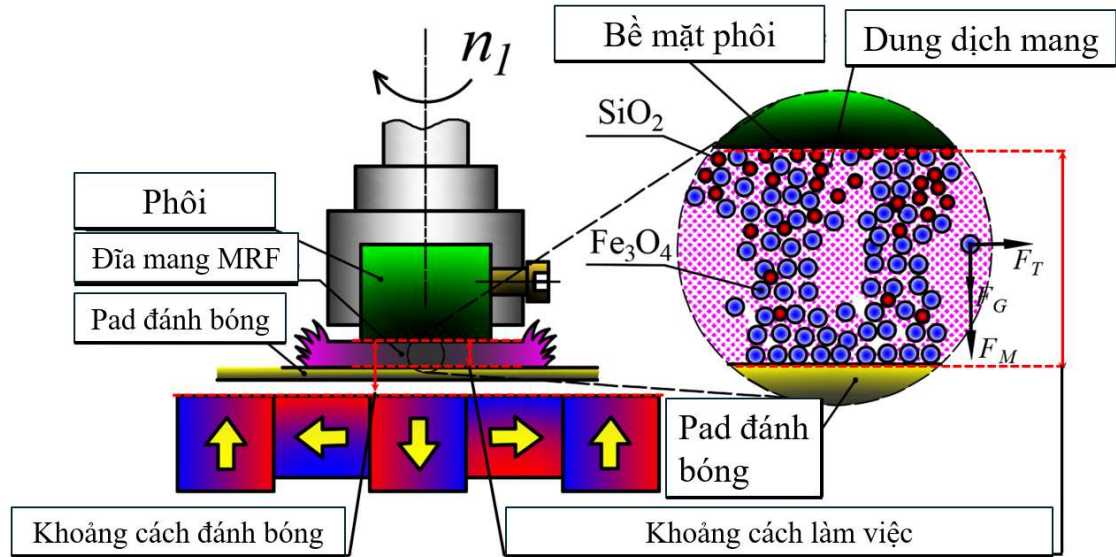
2.2. THIẾT LẬP SƠ ĐỒ ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH VỚI MẢNG HALBACH CẢI TIẾN

Ngày nay, nhu cầu sử dụng các bề mặt vật liệu Ti-6Al-4V với độ nhám bề mặt đạt mức nanomet cùng diện tích lớn đã tăng nhanh trong những lĩnh vực tiên tiến như hàng không vũ trụ, công nghiệp hóa dầu, thiết bị y tế, y học và nhiều lĩnh vực tiên tiến khác [120, 121]. Các kỹ thuật đánh bóng MRF đảm bảo tốt với các yêu cầu nhằm tạo ra bề mặt với độ chính xác cũng độ bóng cao. Hai loại mô hình đánh bóng MRF phổ biến gồm đầu bi và bánh mài [40, 48], được sử dụng trong hoàn thiện các bề mặt với kích thước lớn theo các quỹ đạo chuyển động chạy dao. Tuy nhiên với hai mô hình này cho hiệu suất hoàn thiện thấp và cần nhiều thời gian đánh bóng. Vì vậy chúng không phù hợp trong sản xuất loạt lớn. Hiệu suất và hiệu quả của đánh bóng từ tính nâng cao thông qua tăng cường độ từ trường và mở rộng vùng làm việc của thiết bị đánh bóng từ tính. Nhằm tạo ra mặt phẳng lớn, Wang và các cộng sự [113] đã đề xuất một ách từ vĩnh cửu áp dụng trong hoàn thiện bề mặt phẳng siêu mịn; họ đã đạt được từ trường rộng và cho thấy hiệu quả trong các quy trình đánh bóng MRF được thiết lập với bề mặt thu được dạng nanomet. Nhằm cải tiến mô hình của Wang, Luo và các cộng sự đã đề xuất một ách từ không khí thẳng cải tiến [24] nhằm hoàn thiện bề mặt vật liệu zirconia với hiệu suất đánh bóng cùng chất lượng bề mặt cao. Tuy nhiên mô hình đề xuất của Luo không thay đổi cường độ từ trường do sử dụng ách từ vĩnh cửu. Nhằm giải quyết vấn đề này, nghiên cứu sinh đã phát triển một ách điện từ với các nam châm điện đã được thiết lập [93] và áp dụng thành công vào hoàn thiện vật liệu Ni-P với bề mặt thu được dạng nanomet cùng với hiệu suất đánh bóng cao. Tuy nhiên, với các ách từ đã phát triển, từ trường ở vùng được đánh

bóng không mở rộng vô hạn do hạn chế về kích thước ách từ cũng như khả năng tạo ra từ trường. Một mảng từ trường vô hạn được tạo ra thông qua sự sắp xếp nam châm có thể khắc phục nhược điểm tạo từ trường. Wang và cộng sự [122] đã phát triển một quy trình đánh bóng bằng các cụm nam châm trong các quy trình MRF để mở rộng khả năng vận hành từ trường. Phân bố mật độ từ trường và hiệu suất đánh bóng được đánh giá thông qua cả thí nghiệm và mô phỏng [92, 118]. Tuy nhiên, hiện nay các nghiên cứu mới chỉ tập trung tạo ra từ trường thông qua phương pháp sắp xếp nam châm đơn giản và chưa khám phá các phương pháp nâng cao chất lượng và bóc tách vật liệu trong các quy trình đánh bóng MRF bằng cách tăng cường độ từ trường. Một giải pháp lý tưởng có thể cải thiện hiệu quả đánh bóng của MRF là tăng cường độ từ trường bằng mảng Halbach [27, 123]. Với mảng từ trường Halbach có khả năng tăng cường cường độ từ trường và mở rộng vùng kích thích, qua đó tăng hiệu quả đánh bóng trong các quy trình MRF. Các mảng Halbach đang được ứng dụng phổ biến trong máy gia tốc hạt, động cơ hiệu suất cao, chụp cộng hưởng từ và máy phân tích từ. Trong đó mảng Halbach thường được sử dụng nhằm tạo cường độ từ trường cao tập trung ở một bên trong khi chỉ cần sử dụng kết cấu nam châm nhỏ [28, 106]. Hơn nữa, mảng Halbach dễ dàng mở rộng vùng tạo từ trường, qua đó nâng cao hiệu suất đánh bóng cho dung dịch lỏng từ tính.

Dựa trên các đặc điểm phân tích đã thảo luận ở trên, chương này giới thiệu một chiến lược nghiên cứu mới đạt được nhám bề mặt ở quy mô nanomet thông qua hoạt động hóa học và cơ học bởi hạt mài kích thước nanomet trong quy trình đánh bóng MRF. Phương pháp đánh bóng với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi được áp dụng trong hoàn thiện hợp kim Ti-6Al-4V. Các quy trình đánh bóng MRF được thiết lập bởi hỗn xanh gồm các hạt từ tính Fe_3O_4 , hạt mài SiO_2 , chất oxy hóa H_2O_2 , nước tinh khiết và axit malic. Quá trình phối hợp này nhằm tăng khả năng trong đánh bóng từ tính và hiệu quả của quy trình được tăng cường

thông qua mảng Halbach cải tiến nhằm khuếch đại cường độ từ trường và mở rộng vùng kích thích qua đó cải thiện hiệu quả đánh bóng cho bề mặt có diện tích lớn vật liệu Ti-6Al-4V.

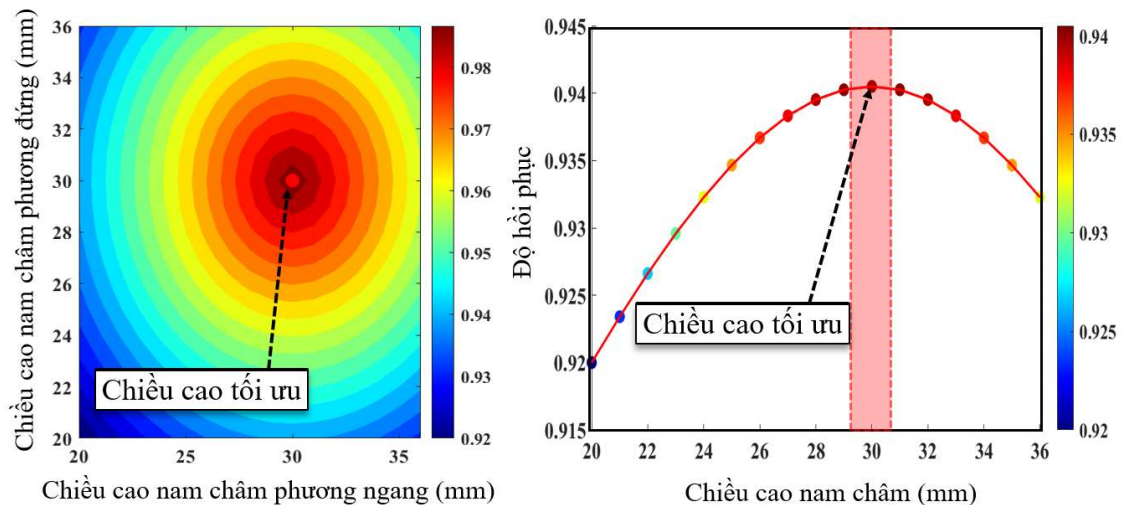


Hình 2.10 Sơ đồ đánh bóng đề xuất với lực hấp dẫn (F_G), lực từ (F_M) và lực cản (F_T) dưới tác dụng của từ trường tạo bởi mảng Halbach

Quy trình đánh bóng được thiết lập bởi mảng từ trường Halbach cải tiến đã được thiết lập trong mô hình đánh bóng MRF, với khả năng phục hồi được tối ưu hóa theo các điều kiện mô phỏng. Các thành phần trong hỗn hợp MRF và sơ đồ nguyên lý trong quá trình MRF như đề cập trong Hình 2.10. Các lực từ trường, lực nâng thủy động, chuyển động Brown và Vander Waals, lực cản và lực hấp dẫn chịu ảnh hưởng của từ trường do mảng Halbach tạo ra. Lực từ, lực cản và lực hấp dẫn lớn hơn đáng kể so với các lực khác do đó trong nghiên cứu này, các thành phần lực khác trong quy trình phân tích lực không được xem xét trong các quy trình phân tích lực.

2.2.1. Xác định mảng Halbach tối ưu thông qua hàm hồi phục

Lực từ tác dụng lên hạt từ tính tăng dần theo kích thước chiều cao của nam châm; tuy nhiên, khi khoảng cách các hạt từ so với nam châm tăng lên, lực từ suy giảm nhanh chóng theo cả phương ngang và dọc. Kết quả phân tích khả năng phục hồi (Hình 2.11) mô tả vai trò của chiều cao nam châm đối với khả năng phục hồi được đo lường bằng phần trăm khả năng khôi phục hoặc nâng cao đặc tính từ tính và bề mặt của vật liệu sau khi đánh bóng bằng phương pháp MRF. Chiều cao nam châm lớn có thể gây hạn chế trong quá trình lắp ráp và việc lựa chọn nam châm phụ thuộc vào ảnh hưởng của từ trường theo cả hai hướng. Phạm vi chiều cao từ 20–36 mm trong xác định từ trường tối ưu.

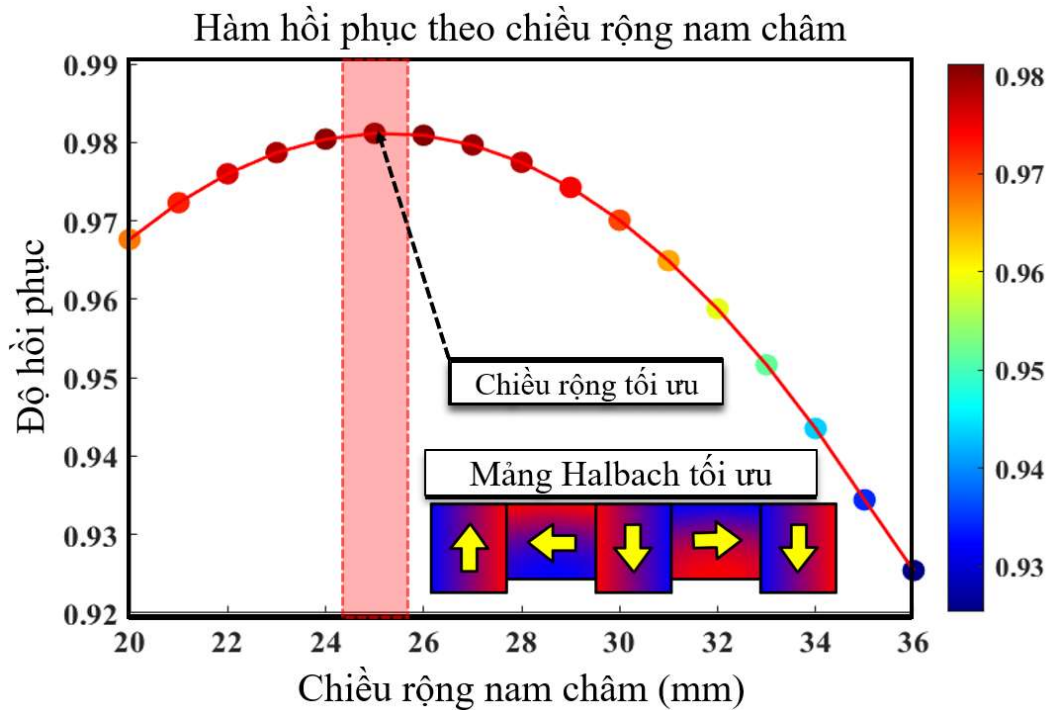


Hình 2.11 Khả năng phục hồi theo chiều cao nam châm khác nhau

Phân tích trong Hình 2.12 chỉ ra rằng chiều cao nam châm tối ưu là 30 mm. Ngoài ra, kết quả trong Hình 2.13 cho thấy chiều cao nam châm cũng ảnh hưởng đến tham số chiều rộng tối ưu. Mô phỏng cho thấy chiều cao 30 mm và chiều rộng nam châm 25 mm là các thông số cho khả năng phục hồi tốt nhất.

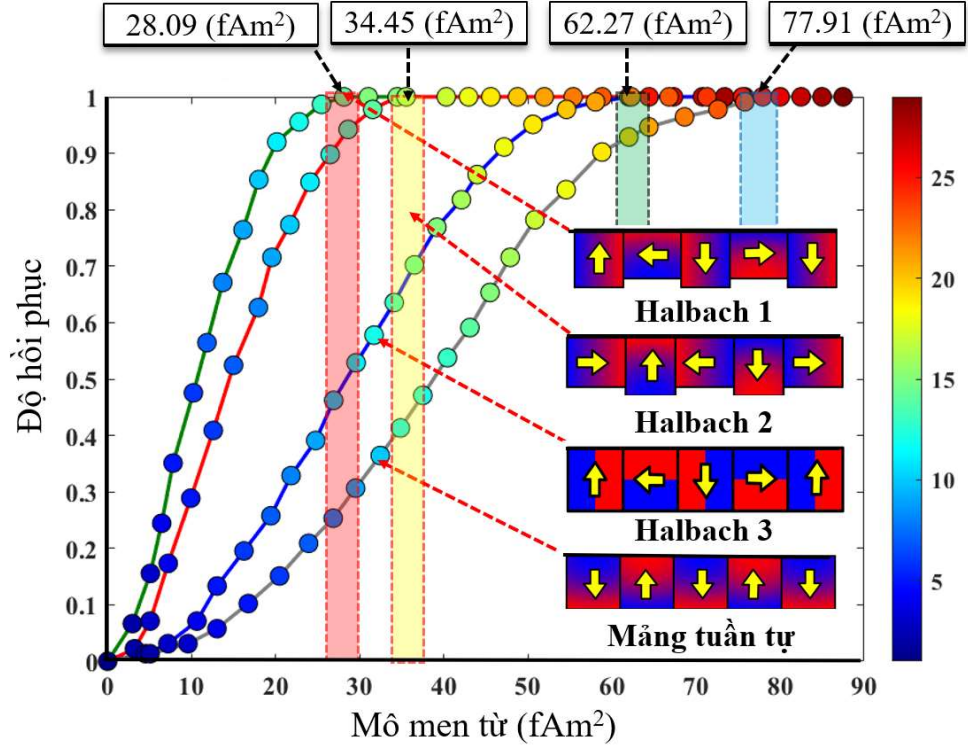
Mảng Halbach tối ưu với các kích thước nam châm có chiều cao 30 mm và chiều rộng 25 mm được sử dụng trong phân tích qua đó thấy được tính ưu việt

của Halbach được đề xuất. Các nam châm thông thường có thông số chiều rộng và cao là 40 mm. Độ phục hồi được xác định là hàm của mômen từ với kết quả phân tích trong Hình 2.13. Trong đó ba cấu hình Halbach khác nhau cùng phương pháp sắp xếp tuần tự được khảo sát thông qua khả năng phục hồi.



Hình 2.12 Khả năng phục hồi theo chiều rộng nam châm

Mô phỏng thu được cho thấy các mảng Halbach 1 và Halbach 2 có kích thước lần lượt là 30×25 mm và 25×30 mm. Các mảng Halbach 3 và mảng thông thường 30×30 mm và 40×40 mm tương ứng mô men từ ở mức 28.09, 34.45, 62.27 và 77.91 (fAm^2) cho khả năng phục hồi 100%. Phân tích này làm rõ vai trò và đóng góp của các mảng Halbach được đề xuất, đặc biệt với mảng sử dụng nam châm có kích thước 30×25 mm được sử dụng vào hiệu suất phục hồi tối ưu. Đáng chú ý, khi mảng Halbach 1 đạt mức phục hồi 100% với mômen từ đạt mức 28,09 (fAm^2), thấp hơn so với các mảng khác, qua đó cho thấy mảng Halbach 1 là lựa chọn cho hiệu quả cao với quy trình đánh bóng MRF.



Hình 2.13 Khả năng phục hồi bằng ruy MRF theo các phương pháp sắp xếp mảng nam châm khác nhau

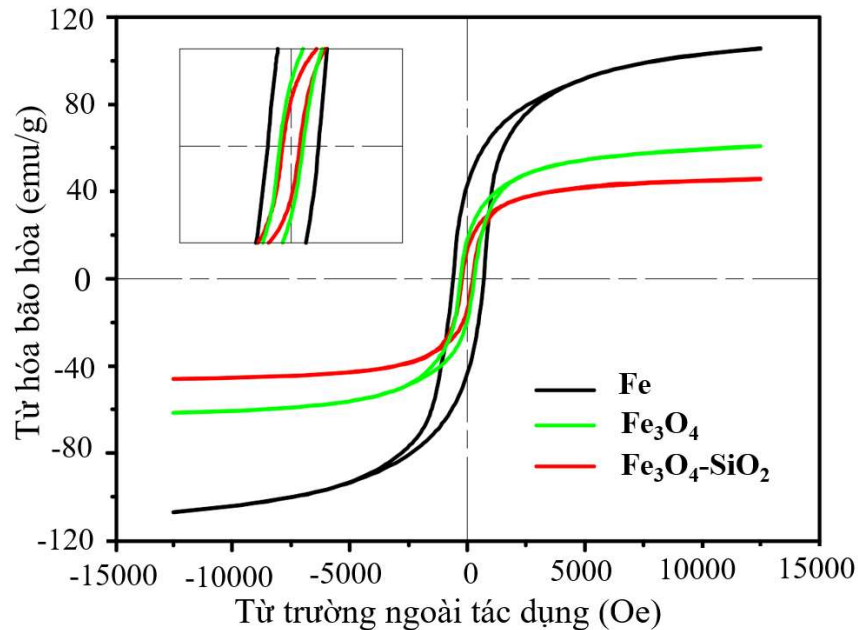
2.2.2. Lực từ tác dụng lên các hạt từ tính khi có từ trường

Trong cấu hình từ trường được thiết lập các hạt từ chịu tác động bởi lực từ trong dung dịch MRF với các hiệu ứng từ bị chi phối bởi các đặc tính vật liệu và kích thước hạt từ và hạt không từ trong chất lỏng mang, thông lượng và độ dốc thông lượng từ. Dưới tác động từ trường B (T) lên dung dịch MRF, lực từ tác động lên một hạt từ có thể tích V_p (m^3), độ từ hóa M (A/m) và mômen từ $m = M \times V_p$ (Am^2) được xác định theo phương trình [124]:

$$F_M = (m \times \nabla) B \quad (2.4)$$

Trong đó ∇ gradient từ trường theo phương x, y và z, với mômen từ rất quan trọng đối với lực từ F_M như đề cập trong Phương trình (2.4). Các hạt từ

Fe_3O_4 tự sắp xếp thành chuỗi khi có từ trường. Trạng thái từ bão hòa tương ứng với các đặc tính từ của vật liệu, như mô tả trên Hình 2.6, các đặc tính từ của các hạt Fe_3O_4 với từ trường khác nhau. Các kỹ thuật dùng để đánh giá lực từ trường tác động lên các hạt từ dựa trên các giả định rằng các hạt thể hiện một mức độ cảm từ và mômen từ của các hạt từ hoàn toàn bão hòa.

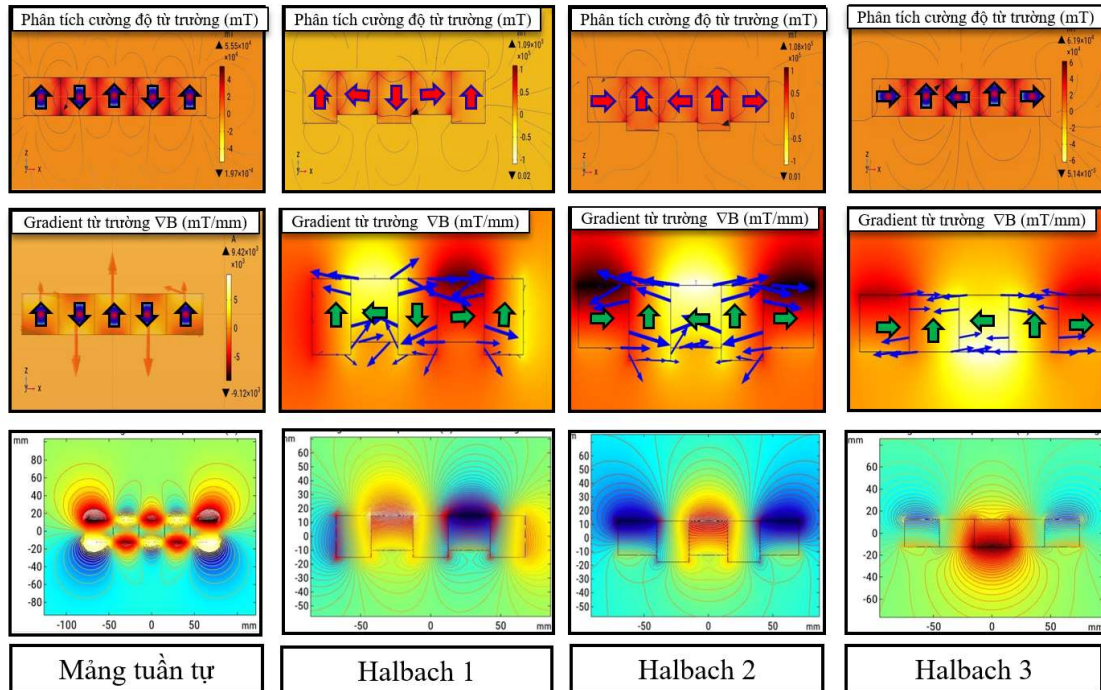


Hình 2.14 Mỗi quan hệ giữa từ trường và mômen từ tác dụng lên hạt từ tính trong quy trình đánh bóng MRF

Hình 2.14 minh họa mối tương quan giữa đặc điểm từ hóa và từ trường giữa các dung dịch khác nhau trong dung dịch MRF ở nhiệt độ phòng với các hạt từ Fe, Fe_3O_4 và $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$. Khi từ trường ngoài là 12.500 (Oe), các giá trị từ bão hòa của Fe, Fe_3O_4 và $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ tương ứng 112.6, 60.6 và 45.3 (emu/g) [125]. Đối với vật liệu ở quy mô vi mô và nano, tham số từ bão hòa thấp do tỷ lệ bề mặt trên thể tích cao vốn có trong vật liệu có cấu trúc vi mô. Mômen từ tổng thể giảm đáng kể do quá trình oxy hóa bề mặt và rối loạn chuyển động bề mặt. Trong các cấu trúc vi mô có hoạt động cường bức tăng cường do dị hướng hình dạng,

các giá trị lực kháng từ đối với $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$, Fe_3O_4 và Fe tương ứng 128.6, 198.2 và 476.8 (Oe).

Trong các mảng nam châm tạo từ trường, khi các cặp nam châm lân cận được định hướng ngược chiều nhau tại điểm tiếp xúc, cường độ từ trường biến thiên nhanh chóng, dẫn đến sự hình thành gradient từ trường cao. Gradient này tạo ra lực từ đáng kể tác động lên các hạt trong dung dịch MRF. Lực này tác động mạnh lên bề mặt hạt từ tính khi gradient từ trường tại đó có sự thay đổi lớn. Tuy nhiên, sự gia tăng nhanh của gradient đồng thời làm cường độ từ trường giảm mạnh, dẫn đến lực từ chủ yếu chỉ tác động trong khoảng cách ngắn gần bề mặt.



Hình 2.15 Độ dốc và cường độ từ trường thu được thông qua các phương pháp sắp xếp nam châm khác nhau

Mô phỏng sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics cho thấy sự phân bố của độ dốc từ trường và từ thông tương ứng với các cấu trúc nam châm khác

nhau (Hình 2.15). Khi độ dốc từ trường tăng, các tham số từ trường giảm. Khi các nam châm được sắp xếp vuông góc với nhau, các đường sức từ tập trung mạnh về một phía, tạo ra cấu trúc từ trường không đối xứng. Các mảng nam châm được sắp xếp theo cấu hình này được gọi là mảng Halbach. Trong đó, mảng Halbach 1 và Halbach 2 tạo ra từ trường tập trung hơn về một phía so với mảng Halbach 3 (mảng Halbach thông thường) và so với cách sắp xếp nam châm tuần tự theo phương pháp thông thường.

Trong quá trình phân tích lý thuyết, lực từ tác động lên các hạt từ trong dung dịch MRF thường được lý tưởng hóa bằng cách giả định rằng môi trường chất lỏng bao quanh hạt Fe_3O_4 là phi từ tính. Các hạt từ được xem xét như các hình cầu chịu sự từ hóa song song với hướng của từ trường bên ngoài được xem xét, đồng thời giả định rằng không có sự kết nối giữa các hạt với nhau. Lực từ tác động lên các hạt từ được tính toán dựa trên biểu thức sau [126]:

$$F_M = [m \times \nabla] B = \frac{MV_\rho}{2B} \nabla(B^2) \quad (2.5)$$

Từ trường tác dụng lên các hạt từ Fe_3O_4 hình cầu có độ từ thẩm chân không $\mu_0 = 1.26 \left(\frac{\mu\text{N}}{\text{A}^2} \right)$ và độ cảm từ $B \times \nabla(B) = \frac{\nabla(B^2)}{2}$, được xác định bởi:

$$M = \frac{3\chi_\rho}{\mu_0(\chi_\rho + 3)} B \quad (2.6)$$

Khi các hạt từ Fe_3O_4 trong quá trình MRF được coi là các thực thể đơn lẻ và độ cảm từ rất nhỏ $\chi_\rho + 3 \approx 3$. Do đó, Phương trình (2.6) được triển khai thành:

$$F_M = \frac{V_\rho \chi_\rho}{2\mu_0} \nabla(B^2) \quad (2.7)$$

Do tính độ thâm từ tương đối của các hạt từ tính Fe_3O_4 xác định bởi $\chi_\rho = \mu_\rho - 1$, phương trình (2.7) được mô tả như sau:

$$F_M = \frac{2\pi R^3 (\mu_\rho - \mu_f) \mu_f \mu_0}{(2\mu_f + \mu_\rho)} \nabla (H^2) \quad (2.8)$$

Bán kính hạt từ Fe_3O_4 được biểu diễn bằng R . Khi dung dịch mang được coi là không từ tính $\chi_\rho B = H$ và $\mu_f = 1$. Phương trình (2.8) được mô tả như sau:

$$F_M = \frac{3(\mu_\rho - 1)V_\rho}{2\mu_0(2 + \mu_\rho)} \nabla (B^2) \quad (2.9)$$

2.2.3. Lực đẩy và lực hấp dẫn tác động lên các hạt từ tính

Trong các quy trình đánh bóng MRF, dòng chảy của chất lỏng quanh các hạt từ tính tạo ra lực cản. Khi chịu tác động của từ trường, các hạt Fe_3O_4 hình cầu phải chịu lực cản, bị chi phối bởi các yếu tố như vận tốc hạt, bán kính hạt R , độ nhớt η , vận tốc v_f của dòng chất lỏng từ tính và vận tốc v_ρ của hạt từ tính [127]. Lực cản này được biểu diễn bằng phương trình sau:

$$F_T = 6\eta\pi R (v_\rho - v_f) \quad (2.10)$$

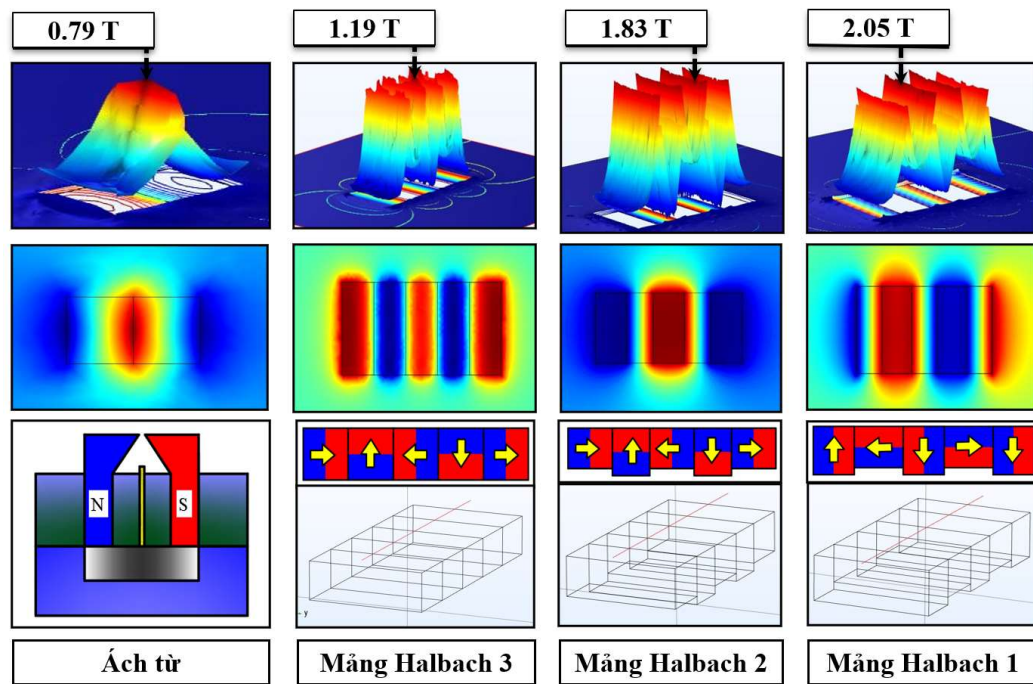
Các hạt từ tính trong dung dịch MRF với lực trọng trường trong dung dịch mang tạo ra được gọi là lực hấp dẫn với thể tích hạt mài (V_ρ), khối lượng riêng hạt từ tính (ρ_ρ) và khối lượng riêng của dung dịch mang (ρ_f) được mô tả theo phương trình sau:

$$F_G = V_\rho \times g \times (\rho_\rho - \rho_f) \quad (2.11)$$

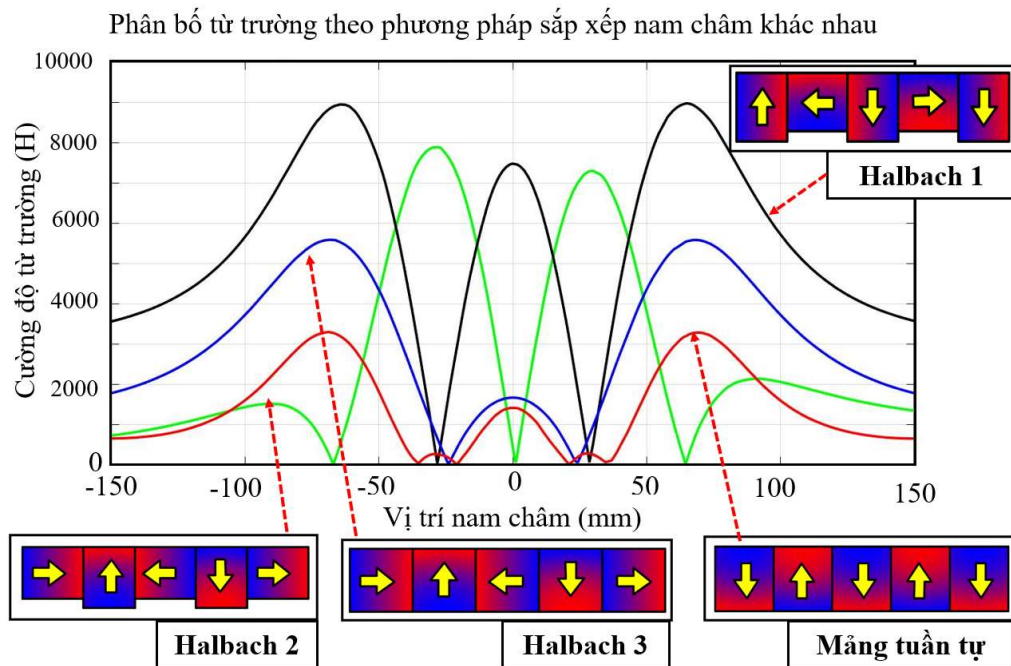
2.3. ỨNG DỤNG MẢNG HALBACH CẢI TIẾN TRONG ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH

Kết quả phân tích trên Hình 2.16 và 2.17 cho thấy mảng Halbach cải tiến (Halbach 1) có khả năng tạo ra mật độ từ thông cao hơn đáng kể, với các vùng kích thích từ có mật độ từ thông gấp 2.8 lần so với ách từ được Wang và cộng sự đề xuất [30], và gấp 1.7 lần so với mảng Halbach đề xuất bởi Guo và cộng sự [34] (Halbach 3). Mặc dù có cấu trúc nhỏ hơn, mảng Halbach cải tiến vẫn có thể tạo ra vùng kích thích từ rộng hơn so với ách từ vĩnh cửu, mảng nam châm xen kẽ kích thước 40×40 mm, và mảng Halbach kích thước 30×30 mm. Giá trị thu được cho thấy mảng Halbach cải tiến tạo ra một từ trường mạnh với phạm vi kích thích lớn. Hình 2.18 mô tả nguyên lý đánh bóng MRF với mảng Halbach cải tiến, được bố trí dưới đĩa chứa dung dịch MRF được chế tạo từ vật liệu SUS 304. Mảng Halbach cải tiến được thiết kế chuyển động tịnh tiến khứ hồi nhờ cơ cấu tay quay thanh trượt, trong khi phôi được cố định trên trục chính của máy CNC 5 trục Mori DMU. Trên đĩa mang MRF, một miếng Pad đánh bóng da lộn được dán vào bề mặt nhằm chứa lượng băng ruy MRF phù hợp. Khoảng cách làm việc được điều chỉnh bằng cách di chuyển phôi lên xuống dọc theo trục chính của máy CNC. Phôi được lắp cố định vào trục chính máy phay 5 trục thông qua đồ gá có tốc độ n_1 . Cùng với đó động cơ của thiết bị đánh bóng MRF tạo ra tốc độ quay n_2 lên cơ cấu tay quay thanh trượt qua đó tạo ra chuyển động tịnh tiến khứ hồi cho mảng Halbach cải tiến.

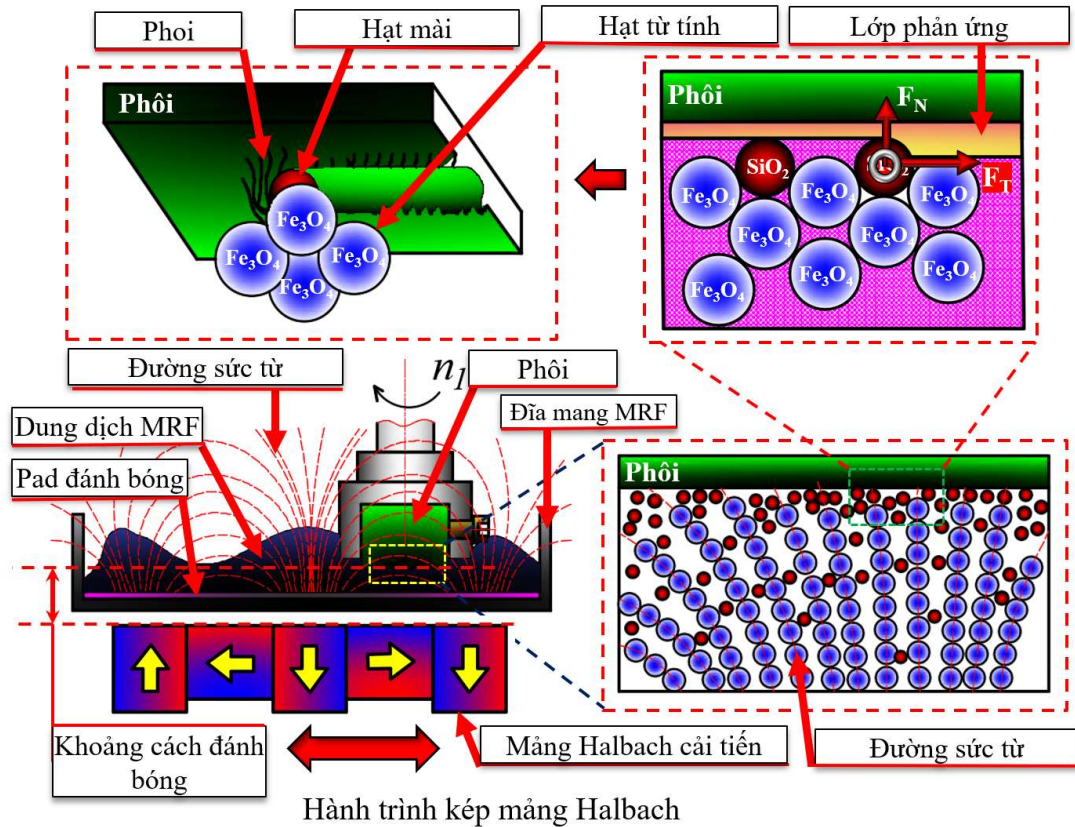
Nam châm vĩnh cửu trong mảng Halbach cải tiến với kích thước $30 \times 25 \times 150$ mm. Cấu trúc băng ruy bán rắn MRF được hình thành với các hạt từ tính Fe_3O_4 trong dung dịch MRF sắp xếp thành chuỗi dọc theo các đường sức từ của mảng Halbach cải tiến. Gradient từ trường tạo ra bởi mảng Halbach cải tiến góp phần thúc đẩy sự hình thành này, khi các hạt từ tính bám vào Pad đánh bóng và di chuyển tịnh tiến khứ hồi theo chuyển động của mảng Halbach.



Hình 2.16 Mật độ từ thông dưới tác động của các từ trường khác nhau được áp dụng



Hình 2.17 Mật độ từ thông với các mảng từ trường khác nhau



Hình 2.18 Nguyên lý đánh bóng MRF và cơ chế bóc tách vật liệu với mảng Halbach cải tiến

Hạt mài SiO_2 không từ tính được đẩy lên bề mặt phôi Ti-6Al-4V như mô tả trên Hình 2.18, tạo ra lực F_T và F_N tác động lên bề mặt phôi khi có từ trường bởi mảng Halbach tác dụng. Kích thước nanomet của hạt mài SiO_2 di chuyển tương đối so với phôi, sự kết hợp giữa tốc độ phôi và chuyển động mảng Halbach giúp băng ruy MRF loại bỏ một lớp vật liệu gia công rất mỏng. Trong quá trình đánh bóng bằng băng ruy bán rắn MRF gồm các hạt Fe_3O_4 , SiO_2 , chất oxy hóa H_2O_2 , nước tinh khiết và axit malic luôn duy trì tiếp xúc với phôi. Khi băng ruy MRF di chuyển, các hạt mài và hạt từ tính mới liên tục hình thành nhờ quá trình phân phối lại dải MRF trong vùng đánh bóng tạo ra bởi cơ cấu tay quay thanh trượt. Điều này giúp nâng cao khả năng hoàn thiện bề mặt của vật liệu trong quá trình đánh bóng bằng mảng Halbach cải tiến.

2.4. PHÂN TÍCH TỪ TRƯỜNG VÀ ĐỘNG HỌC HẠT TỪ TÍNH Fe_3O_4 DƯỚI TÁC DỤNG MẢNG HALBACH CẢI TIẾN

Các đường sức từ, mật độ từ thông và lực từ được cải thiện trong mảng Halbach cải tiến đề xuất. Phân bố mật độ từ thông và các thay đổi trong các thành phần được cung cấp trực quan bằng hình ảnh 3D. Các thông số vật liệu được thiết lập trong phần mềm COMSOL multiphysics cung cấp lực kháng từ và từ hóa. Các kết quả mô phỏng được đề xuất đã được xác minh bằng thiết bị đo từ thông. Thiết bị đo KT-101 Digital Gauss Meter có diện tích cảm biến đo 1.5×1.5 mm nhưng chỉ có thể đo từ trường vuông góc với cảm biến. Do đó, đo từ trường trong không gian là một thách thức và chỉ có thể thử nghiệm các thành phần định hướng từ trường vuông góc so với vùng đo của cảm biến. Trong mặt phẳng khảo sát, vectơ biểu diễn mật độ từ thông có các thành phần dọc theo hướng x và z trong mặt phẳng Oxz, theo đường song song với trục x tương ứng với B_{xz} và B_{xx} . Do sự phân bố đối xứng của từ trường theo hướng Y, từ thông theo hướng này bằng không khi này được đánh giá thông qua:

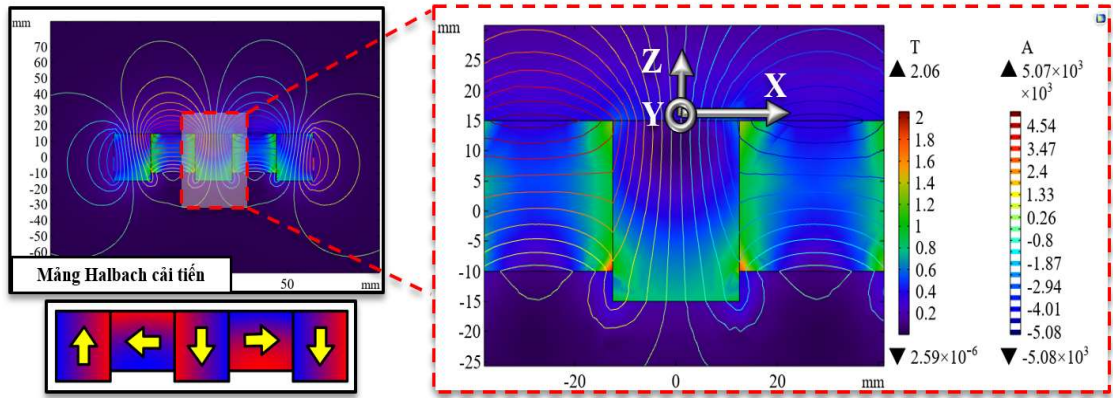
$$|B| = \sqrt{B_{xz}^2 + B_{xx}^2} \quad (2.12)$$

Theo lý thuyết bởi Wang và các cộng sự [38], hạt từ trong dung dịch chất lỏng từ bị ảnh hưởng bởi lực từ, lực hấp dẫn, lực cản nhớt, lực Vander Waals và lực đẩy trong quá trình đánh bóng MRF. Lực từ và lực hấp dẫn là những nhân tố chính của các hạt mài mòn và hạt từ trong quá trình đánh bóng. Theo quan điểm này, lực lên hạt từ tính và hạt mài Fe_3O_4 và SiO_2 trong hỗn hợp đánh bóng MRF được đề cập trong Phương trình (2.9) và (2.11). Như đề cập trong nghiên cứu bởi Wang và cộng sự [113] đã đưa ra phương trình sau:

$$F_{\text{Fe}_3\text{O}_4-z} = \frac{3\mu_0 V_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \chi_{\text{Fe}_3\text{O}_4}}{2\mu_0 + \mu} \left[\frac{H_x \partial H_z}{\partial x} + \frac{H_y \partial H_z}{\partial y} + \frac{H_z \partial H_z}{\partial z} \right] + V_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \times g \times (\rho_{\text{Fe}_3\text{O}_4} - \rho_f) \quad (2.13)$$

$$F_{SiO_2-Z} = V_{SiO_2} \times g \times (\rho_{SiO_2} - \rho_f) - \mu_0 V_{SiO_2} \chi'_{Fe_3O_4} \left[\frac{H_X \partial H_Z}{\partial x} + \frac{H_Y \partial H_Z}{\partial y} + \frac{H_Z \partial H_Z}{\partial z} \right] \quad (2.14)$$

trong đó $F_{Fe_3O_4-Z}$, F_{SiO_2-Z} là lực tác dụng lên Fe_3O_4 và SiO_2 theo phương thẳng đứng; $V_{Fe_3O_4}$, V_{SiO_2} là thể tích của Fe_3O_4 và SiO_2 ; $\chi_{Fe_3O_4}$ là độ cảm từ; H_X , H_Y , và H_Z là các thành phần từ trường có độ dốc H_Z theo các hướng X, Y và Z tương ứng với $\frac{\partial H_Z}{\partial x}$, $\frac{\partial H_Z}{\partial y}$, $\frac{\partial H_Z}{\partial z}$. Hình 2.19 cho thấy lực từ tác dụng lên các hạt từ theo các khoảng cách kích thích từ khác nhau.



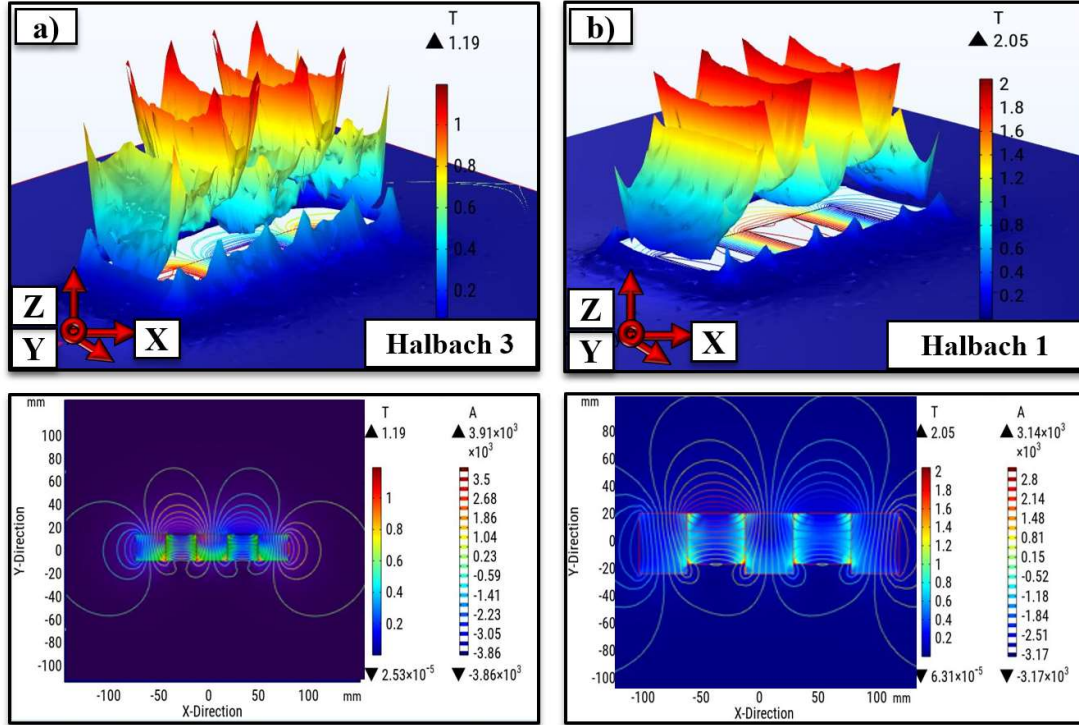
Hình 2.19 Ảnh hưởng của mảng Halbach cải tiến đến lực từ tác dụng lên các hạt từ Fe_3O_4

2.5. PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA HẠT TỪ TÍNH Fe_3O_4 VÀ HẠT MÀI SiO_2 DƯỚI TÁC DỤNG TỪ TRƯỜNG HALBACH CẢI TIẾN

Cường độ từ trường của mảng Halbach được tập trung về một phía như mô tả trong Hình 2.20, với mật độ từ thông cao tập trung ở phía trên. Khi năng lượng từ được giải phóng, từ trường có độ dốc lớn được tạo ra.

Một biến thể cải tiến của mảng Halbach đã được đề xuất, đem lại cường độ từ trường cao hơn so với mảng Halbach thông thường như được mô tả trên Hình 2.20a. Cụ thể, mật độ từ thông trong mảng Halbach cải tiến cường độ cao hơn

nhieu so với mảng Halbach thông thường, như trình bày ở Hình 2.20b, góp phần nâng cao năng suất cho đánh bóng từ tính.

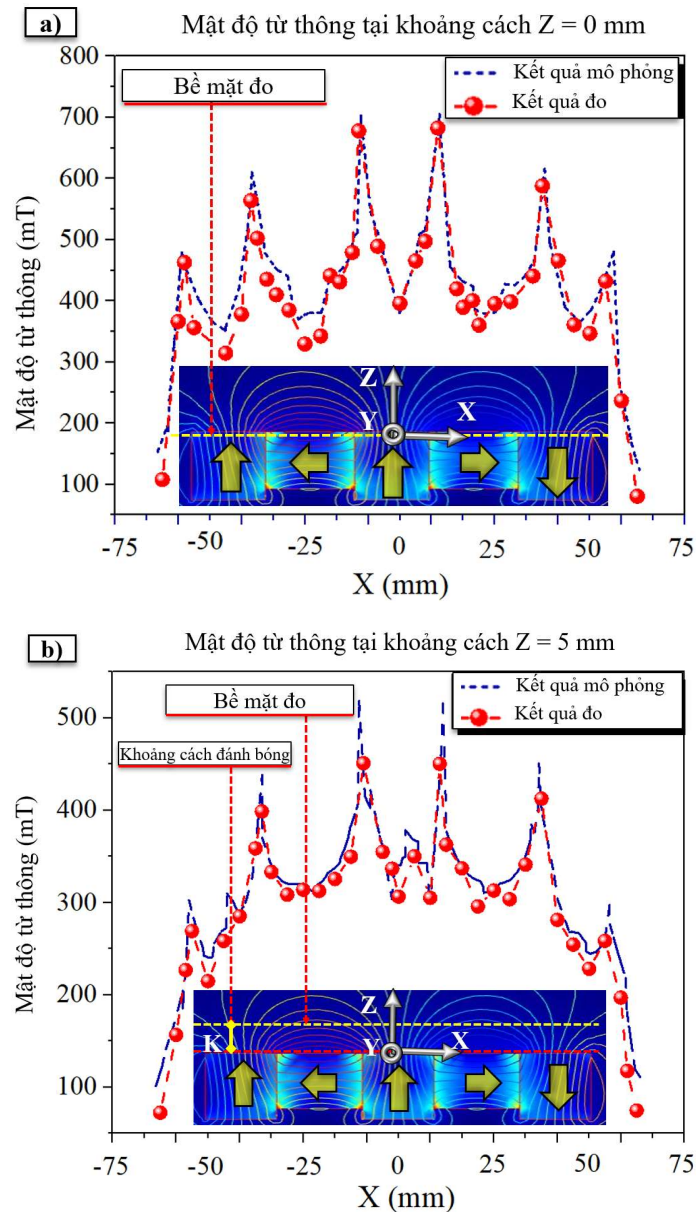


Hình 2.20 Phân tích từ trường với mảng Halbach thông thường và mảng Halbach cải tiến tại khu vực đánh bóng ($z=5$ mm)

Khi mảng Halbach cải tiến được thiết lập, hình thành một từ trường mạnh tương tác với dung dịch từ tính, tạo ra các dải băng ruy bán rắn MRF. Khi có chuyển động giữa phôi Ti-6Al-4V và dải băng ruy MRF, một lớp rất mỏng bề mặt của phôi được loại bỏ. Do sự tăng cường từ trường từ mảng Halbach cải tiến, các hạt từ tính Fe_3O_4 tập trung tại những vùng có lực từ tác dụng mạnh nhất (tại khu vực ranh giới của nam châm). Tại đây, lực tác động lên các hạt mài SiO_2 tăng lên, dẫn đến khả năng đánh bóng bề mặt được cải thiện đáng kể.

Hiệu ứng từ trường tăng cường này giúp độ cứng của dải băng ruy MRF tăng lên, góp phần nâng cao đáng kể hiệu quả của quá trình đánh bóng. Phân tích từ trường trong quá trình đánh bóng tương đương với các giá trị đo như được mô

tả trên Hình 2.21. Khi mảng Halbach cải tiến di chuyển theo quỹ đạo tịnh tiến khứ hồi, nó tạo ra các dải băng ruy MRF di chuyển đều trên bề mặt gia công, liên tục cung cấp các hạt từ Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2 mới, góp phần duy trì hiệu suất đánh bóng cao.



Hình 2.21 Kết quả đo và mô phỏng từ thông đo theo hướng X

Mật độ từ thông của mảng Halbach thông thường đạt khoảng 1.19 T, trong khi mảng Halbach cải tiến tạo ra mật độ từ thông cao gấp 1.7 lần, đạt đến 2.05 T. Dưới tác động của mảng Halbach cải tiến, các hạt từ Fe_3O_4 sắp xếp thành chuỗi, tạo ra ứng suất cắt hiệu quả giúp nâng cao khả năng loại bỏ vật liệu. Trong quá trình đánh bóng MRF, các chuỗi từ hoạt động hiệu quả khi từ thông vượt ngưỡng 200 mT. Phân tích cho thấy mảng Halbach cải tiến có thể tạo ra từ thông lớn hơn 300 mT, đáp ứng tốt các yêu cầu về từ trường trong quá trình đánh bóng MRF, đồng thời qua đó góp phần nâng cao rõ rệt hiệu suất và chất lượng bề mặt sau gia công.

Bảng 2.1 Vật liệu trong đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi

Đặc tính	Kích thước (mm)	Vật liệu	Độ lớn (A/m)	Độ thấm từ
Nam châm vĩnh cửu	30×25×150	-	-890000	1.09977
Đĩa mang MRF		Al		1
Dung dịch		MRF		5
Phôi	32×32×15	Ti-6Al-4V	Độ lớn (A/m)	1

Giá trị đo và mô phỏng từ thông thu được trong Hình 2.21 có khác biệt giữa kết quả đo và mô phỏng không nhiều. Giá trị mô phỏng lớn hơn kết quả đo ở vùng trung tâm và tại vị trí đánh bóng. Sự khác biệt là rất nhỏ, nhưng các giá trị thay đổi nhiều hơn ở vùng ngoài của nam châm. Lý do là hướng từ hóa, tính chất vật liệu và kích thước nam châm trong mô phỏng là lý tưởng. Trong các mô hình thực, hướng và từ hóa không nhất quán, dẫn đến biến dạng từ không đồng đều khi sản xuất nam châm, đặc biệt vùng góc của nam châm. Sai khác giữa giá trị đo và mô phỏng liên quan đến quy trình sản xuất và lắp ráp nam châm, trong đó khác biệt chỉ ở vùng ngoại vi của mảng Halbach. Do đó không ảnh hưởng đến

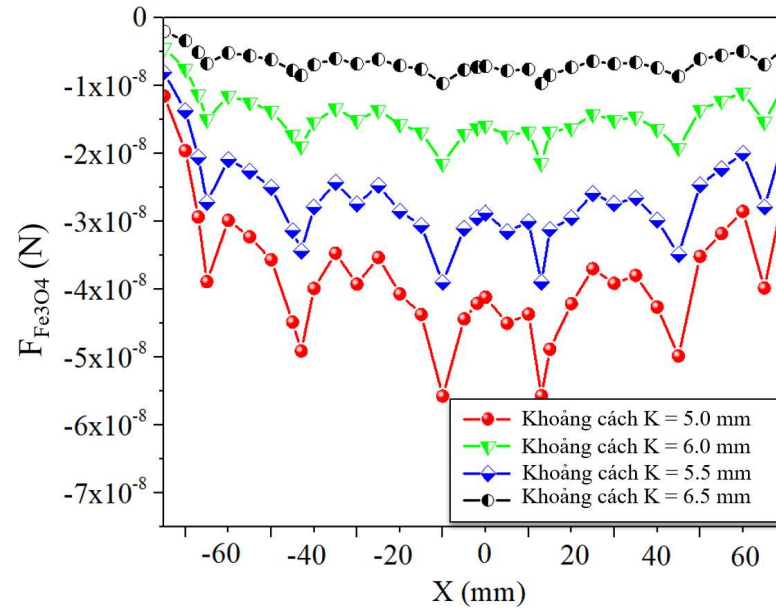
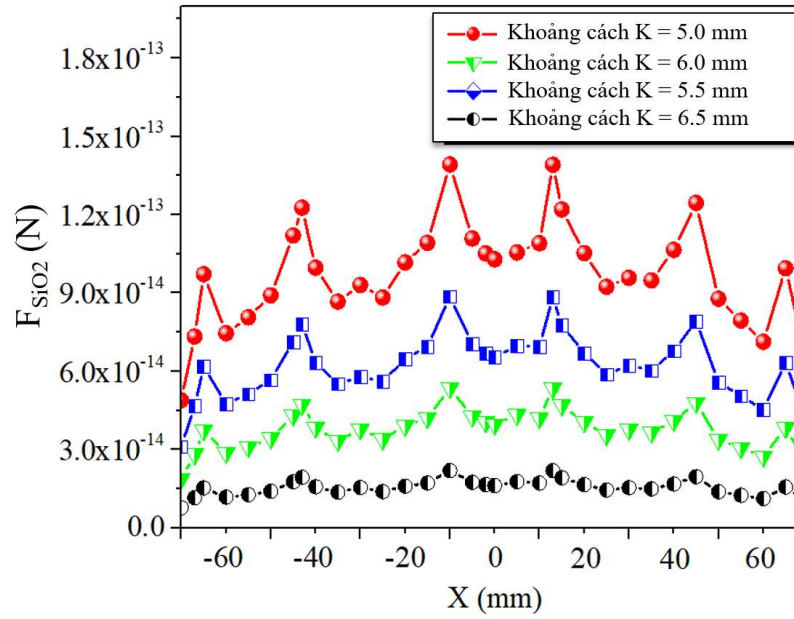
quy trình đánh bóng vì kết quả đo thu được lớn hơn 200 mT ở vùng đánh bóng, cho thấy đảm bảo các yêu cầu đánh bóng do MRF tạo ra.

Hình 2.21a trình bày kết quả đo và mô phỏng mật độ từ thông tại khoảng cách $z = 0$ mm. Đánh giá tương quan giữa các hướng khác nhau cho thấy sự tương đồng đáng kể giữa đo và mô phỏng, đặc biệt tại vùng trung tâm của mảng từ. Tại vị trí làm việc chính, các giá trị lệch không đáng kể, với sự khác biệt chỉ xuất hiện tại các vùng biên của mảng Halbach. Trong Hình 2.21b, khi khoảng cách z được tăng lên 5 mm, sự chênh lệch giữa kết quả đo và mô phỏng bắt đầu xuất hiện, nhưng mức độ sai lệch này vẫn nhỏ và không ảnh hưởng nhiều đến tổng thể kết quả. Cả hai biểu đồ đều cho thấy xu hướng mật độ từ thông tăng khi khoảng cách z giảm, minh chứng cho hiệu ứng từ trường mạnh hơn tại các vị trí gần mảng Halbach. Kết quả này khẳng định hiệu ứng tăng cường từ trường của mảng Halbach cải tiến, đặc biệt tại vùng làm việc. Sự gia tăng lực từ tạo ra không chỉ tối ưu hóa khả năng kiểm soát các hạt từ tính trong quá trình đánh bóng, mà còn nâng cao đáng kể hiệu quả đánh bóng MRF, mang lại chất lượng cao hơn.

Bảng 2.2 Các thông số hạt từ Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2

Vật liệu	Thông số	Độ từ thẩm (N/A^2)	Độ cảm từ (m^3/kg)	Tỉ trọng (kg/cm^3)
Fe_3O_4	$d_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 1\mu m$	$\mu = 5,03.10^{-4}$	$\chi_m = 0.5 \times 10^{-3}$	$\rho_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 5.17 \times 10^{-3}$
SiO_2	$d_{\text{SiO}_2} = 300nm$	-	$\chi'_m = 0$	$\rho_{\text{SiO}_2} = 2.65 \times 10^{-3}$

Lực tác dụng lên các hạt từ tính Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2 đã được nghiên cứu với thông số vật liệu trong MRF mô tả trên Bảng 2.1. Theo cấu hình từ trường này, thành phần theo phương Y của từ trường bằng 0 tại các vị trí ngẫu nhiên trong bất kỳ phần nào đi qua tâm của nam châm. Do đó, thay thế vào Phương trình (2.13) và (2.14) từ trường thẳng đứng tác dụng lên hạt từ tính Fe_3O_4 và SiO_2 , được thể hiện trong Phương trình (2.15) và (2.16) tương ứng như mô tả dưới đây:

a) Fe_3O_4 b) SiO_2

Hình 2.22 Lực từ tác dụng lên các hạt từ tính hạt từ Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2 dưới tác dụng của mảng Halbach cải tiến

$$F_{\text{Fe}_3\text{O}_4-Z} = \frac{3\mu_0 V_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \chi_{\text{Fe}_3\text{O}_4}}{2\mu_0 + \mu} \left[\frac{H_X \partial H_Z}{\partial x} + \frac{H_Z \partial H_Z}{\partial z} \right] + V_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \times g \times (\rho_{\text{Fe}_3\text{O}_4} - \rho_f) \quad (2.15)$$

$$F_{SiO_2-Z} = V_{SiO_2} \times g \times (\rho_{SiO_2} - \rho_f) - \mu_0 V_{SiO_2} \chi'_{Fe_3O_4} \left[\frac{H_x \partial H_z}{\partial x} + \frac{H_z \partial H_z}{\partial z} \right] \quad (2.16)$$

Lực tác dụng lên các hạt từ tính Fe_3O_4 được tạo ra bởi các thông lượng từ thu được từ mô phỏng, như được mô tả trong Phương trình (2.12) với các lực được minh họa như trên Hình 2.22a. Lực lớn nhất tác dụng lên các hạt từ tính Fe_3O_4 được quan sát thấy ở các cạnh liền kề của nam châm. Các hạt từ có giá trị lực cao thường dịch chuyển ra khỏi bề mặt phôi và hướng về mảng Halbach. Khi các hạt từ và hạt mài được mô tả bởi hình cầu như mô tả trên Bảng 2.2, lực tác dụng lên SiO_2 theo phương Z trong băng ruy MRF dưới tác dụng của từ trường thu được bằng cách thay thế dữ liệu mô phỏng vào Phương trình (2.16).

Các kết quả mô tả trên Hình 2.22b tại các vị trí khác nhau các giá trị lực F_{SiO_2-Z} khác nhau. Tuy nhiên, tất cả các vị trí đều hiển thị $F_{SiO_2-Z} > 0$ do đó các hạt mài SiO_2 di chuyển về phía bề mặt gia công nhiều hơn trong các quy trình đánh bóng MRF với các mảng Halbach cải tiến.

2.6. THIẾT LẬP MÔ HÌNH LỰC ĐÁNH BÓNG CHO QUY TRÌNH ĐÁNH BÓNG VỚI MẢNG HALBACH TỊNH TIẾN KHỨ HỒI

Nhằm thiết lập mô hình toán học mô tả các thành phần lực tiếp tuyến (F_T) và lực pháp tuyến (F_N) sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi trong các quy trình đánh bóng MRF sử dụng hạt mài SiO_2 và hạt từ tính Fe_3O_4 đề xuất, một số giả định nhằm đơn giản hóa mô hình được áp dụng giúp thuận tiện hơn cho quy trình phân tích. Các giả định chính thiết lập gồm: hạt từ tính, hạt mài được coi có dạng hình cầu; các chuỗi từ tính hình thành lớn hơn đáng kể so với khoảng cách đặc trưng giữa các hạt; các hiện tượng rò rỉ và tổn thất từ trường được bỏ qua; các lực đẩy cũng như lực hấp dẫn được xem là không đáng kể so với lực từ trường tác động trong quá trình đánh bóng. Những giả định này nhằm đơn giản hóa mô hình trong khi duy trì được độ chính xác. Trong đánh bóng sử dụng mảng

Halbach cải tiến và công nghệ đánh bóng MRF, nhân tố chủ đạo quyết định đến chất lượng bề mặt sau gia công là cường độ liên kết của các hạt dưới tác động của từ trường nhằm hình thành các dải băng ruy bán rắn MRF. Chính khả năng chống biến dạng của chuỗi hạt từ tính tạo ra ứng suất pháp và tiếp đáng kể, khi có chuyển động tương đối giữa băng ruy bán rắn MRF và phôi sẽ tạo nên hiệu suất đánh bóng lớn. Ứng suất cắt hình thành dưới ảnh hưởng của từ trường từ dải băng ruy MRF được xác định bởi:

$$\tau_i(\alpha) = \frac{2}{3} \pi \mu_0 \sum_{k=1}^{n-1} (\chi H)^2 E_k R^5 \sin \alpha \cos^4 \alpha \quad (2.17)$$

Công thức (2.14) mô tả sự tương tác giữa từ trường và các hạt từ tính, trong đó lực từ tạo ra ứng suất cắt cần thiết để bóc tác vật liệu trong đánh bóng MRF. Lực từ này không chỉ đảm bảo khả năng cắt bỏ vật liệu hiệu quả mà còn giúp ổn định cấu trúc chuỗi từ tính. Nhờ đó, quá trình đánh bóng diễn ra ổn định, đảm bảo bề mặt gia công chất lượng cao. Trong đó giá trị bán kính của các hạt từ Fe_3O_4 (R), độ từ thẩm chân không (μ_0), số lượng các hạt từ trong một chuỗi (n), cường độ từ trường (H), góc nghiêng chống biến dạng cắt (α), độ nhảy thể tích hạt từ (E_k) và giá trị χ được thiết lập như sau:

$$E_k = \frac{2k(R+s)[R+2k(s+R)]}{\left[(R \cos \alpha)^2 + 4k^2(R+s)^2 + 4kR(R+s) \cos^2 \alpha\right]^{\frac{5}{2}}} - \frac{2k(R+s)[2k(s+R)-R]}{\left[(R \cos \alpha)^2 + 4k^2(R+s)^2 - 4kR(R+s) \cos^2 \alpha\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (2.18)$$

$$\chi = \chi_m \times \rho \quad (2.19)$$

Độ nhảy của thể tích (χ_m) và mật độ (ρ) của hỗn hợp Fe_3O_4 - SiO_2 được biểu thị. Ở đây χ_m được xác định bởi đường cong từ trễ như minh họa trong Hình 2.3, thông qua đường cong này χ_m được xác định bởi:

$$\chi_m = \frac{M}{H} = \mu_0 \times \frac{M}{B} \quad (2.20)$$

Nồng độ các hạt từ tính Fe_3O_4 trong dung dịch MRF được ký hiệu là G , xác định số lượng hạt từ tính ở vùng đánh bóng xác định bởi:

$$N_{Fe-s} = \frac{3\Delta AG}{4\pi(R+s)^3} \quad (2.21)$$

Khoảng cách làm việc và diện tích phôi Ti-6Al-4V được biểu diễn tương ứng bằng K và A . Sự tham gia của các hạt từ tính Fe_3O_4 trong chuỗi đánh bóng được xác định bởi:

$$n = \frac{\Delta}{R+s} \quad (2.22)$$

Tổng số chuỗi từ được quy đổi về diện tích đơn vị dựa trên mật độ phân bố của các hạt từ tính trong không gian. Trong đó, số lượng chuỗi từ này phụ thuộc vào số lượng hạt từ tính Fe_3O_4 và cách chúng liên kết thành các chuỗi dưới tác động của từ trường. Số chuỗi từ tác dụng lên diện tích đơn vị của phôi được tính công thức:

$$P = \frac{N_{Fe-s}}{n} = \frac{3G}{4\pi(R+s)^2} \quad (2.23)$$

Đóng góp của các chuỗi từ tính và hạt mài trong vùng đánh bóng vào ứng suất cắt tổng thể của băng ruy MRF phụ thuộc vào sự tương tác qua lại giữa các chuỗi từ và hạt mài. Các chuỗi chịu ảnh hưởng bởi từ trường truyền lực cắt vào hạt mài tác động lên phôi, tạo ra ứng suất cắt cho đánh bóng MRF. Biểu thức toán học sau đây cho phép đánh giá định lượng tác động của các chuỗi từ tính lên ứng suất cắt của băng ruy MRF trong quy trình đánh bóng:

$$\tau(\alpha) = \sum_{i=1}^P \tau_i(\alpha) = \frac{2}{3} \pi \mu_0 \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^{n-1} E_k (\chi H)^2 R^5 \sin \alpha \cos^4 \alpha \quad (2.24)$$

Ứng suất cắt của dải băng ruy MRF được thiết lập theo công thức (2.24) và (2.14):

$$\tau(\alpha) = \frac{2}{3} \pi \mu_0 \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^{n-1} E_k R^5 (\rho \chi_m H)^2 \sin \alpha \cos^4 \alpha \quad (2.25)$$

Các hạt mài được đẩy lên bề mặt gia công dưới tác động của từ trường, liên tục tái sinh trong quá trình tách ra và biến dạng do tác động cắt. Phương trình phân bố mô tả độ lệch chuẩn α cùng với giá trị trung bình ε và θ được mô tả bởi Huang và cộng sự [127], và được biểu diễn như sau:

$$T(\alpha) = \frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{\pi\varepsilon}} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha-\theta}{\varepsilon}\right)^2} \quad (2.26)$$

Trong điều kiện gia công thực tế, các thông số ε và θ được quyết định và chi phối bởi nhiều yếu tố, trong đó có chất lượng bề mặt phôi, kích thước bề mặt và hình dạng phôi và hạt mài. Ứng suất cắt và ứng suất pháp tuyến được mô tả bởi phương trình (2.25) và (2.26) như được đề cập dưới đây:

$$\tau = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} [T(\alpha) \tau(\alpha)] d\alpha = \frac{\mu_0 (\rho \chi_m H)^2 GR^5}{(R+s)^2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{n-1} \left[\frac{\sqrt{2} E_k}{2\sqrt{\pi\varepsilon}} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha-\theta}{\varepsilon}\right)^2} \sin \alpha \cos^4 \alpha \right] d\alpha \quad (2.27)$$

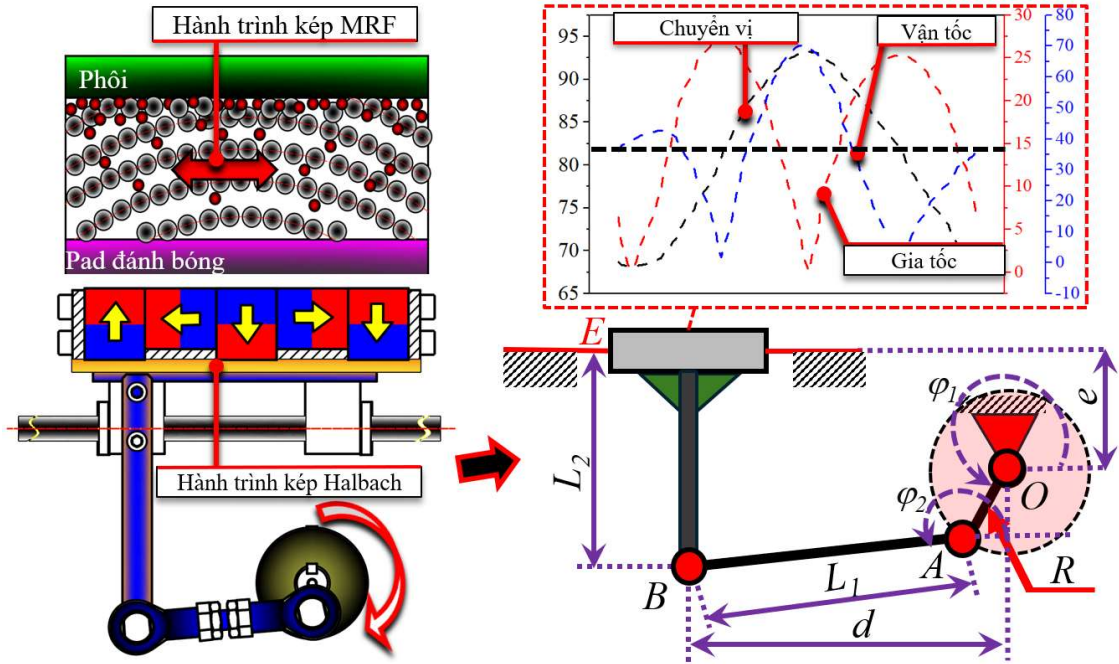
$$\sigma = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{T(\alpha) \tau(\alpha)}{\tan \alpha} \right) d\alpha = \frac{\mu_0 GR^5 \rho^2}{(R+s)^2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{n-1} \left[\frac{\sqrt{2} E_k}{2\sqrt{\pi\varepsilon}} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha-\theta}{\varepsilon}\right)^2} \cos^5 \alpha \right] d\alpha \quad (2.28)$$

Lực tiếp tuyến và pháp tuyến tác dụng lên bề mặt phôi Ti-6Al-4V trong điều kiện không có chuyển động tịnh tiến khứ hồi do cơ cấu tay quay thanh trượt được mô tả bởi công thức sau:

$$F_{\sigma_0} = \iint_{\alpha} \sigma dA = \frac{\mu_0 GR^5 \rho^2}{(R+s)^2} \iint_A (H^2 \chi_m^2) dA \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{n-1} \left[\frac{\sqrt{2} E_k}{2\sqrt{\pi\varepsilon}} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha-\theta}{\varepsilon}\right)^2} \cos^5 \alpha \right] d\alpha \quad (2.29)$$

$$F_{\tau_0} = \iint_{\alpha} (\tau) dA = \frac{\mu_0 GR^5 \rho^2}{(R+s)^2} \iint_A (H^2 \chi_m^2) dA \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{n-1} \left[\frac{\sqrt{2} E_k}{2\sqrt{\pi\varepsilon}} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha-\theta}{\varepsilon}\right)^2} \sin \alpha \cos^4 \alpha \right] d\alpha \quad (2.30)$$

Khi xét đến tịnh tiến khứ hồi tạo ra bởi cơ cấu tay quay thanh trượt, mảng Halbach di chuyển tịnh tiến khứ hồi theo hướng x, tạo ra các dải băng ruy MRF chuyển động tịnh tiến khứ hồi trên bề mặt phôi Ti-6Al-4V. Hình 2.23 minh họa phạm vi dịch chuyển theo hướng x trên bề mặt phôi, được tạo ra bởi tác động của cơ cấu tay quay thanh trượt.



Hình 2.23 Đặc điểm chuyển động của dải băng ruy MRF dưới tác động của mảng Halbach tịnh tiến

Khoảng cách dịch chuyển s được xác định bởi:

$$\begin{cases} l_2 \cdot \cos \varphi_2 + l_1 \cdot \cos \varphi_1 = -s \\ l_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_1 \cdot \sin \varphi_1 = e - l_3 \end{cases} \quad (2.31)$$

Trong đó, l_1 biểu diễn độ dài của khâu kết nối với động cơ. Khi động cơ quay đều, nó khiến khâu l_1 quay đều quanh điểm A. Khâu l_1 truyền chuyển động đến thanh trượt D thông qua thanh truyền l_2 . Do đó, khâu l_3 di chuyển qua lại, khiến dải MRF chuyển động qua lại theo thanh trượt D mang mảng Halbach. Với

chuyển động của động cơ n_1 , góc φ_1 được xác định theo hàm thời gian t được mô tả bởi phương trình:

$$\varphi_1 = \omega_1 t = \frac{2\pi n_1 t}{60} = \frac{\pi n_1 t}{30} \quad (2.32)$$

Vận tốc mảng Halbach được tính thông qua đạo hàm theo thời gian của chuyển vị với hệ phương trình (2.28) như được mô tả bởi phương trình sau:

$$\begin{cases} l_2 \cdot \omega_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_1 \cdot \omega_1 \cdot \sin \varphi_1 = v \\ l_2 \cdot \omega_2 \cdot \cos \varphi_2 + l_1 \cdot \omega_1 \cdot \cos \varphi_1 = 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

trong đó, ω_1 là vận tốc góc tuyệt đối của khâu l_1 , ω_2 là vận tốc góc tuyệt đối của khâu l_2 . v là vận tốc dọc tuyệt đối của thanh trượt D hoặc khâu l_3 .

Gia tốc của mảng Halbach được xác định theo đạo hàm phương trình (2.33), như được thể hiện trong phương trình sau:

$$\begin{cases} l_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_2 \cdot \omega_2^2 \cdot \cos \varphi_2 + l_1 \cdot \omega_1^2 \cdot \cos \varphi_1 + l_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sin \varphi_1 = a \\ l_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \cos \varphi_2 - l_2 \cdot \omega_2^2 \cdot \sin \varphi_2 + l_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \cos \varphi_1 - l_1 \cdot \omega_1^2 \cdot \sin \varphi_1 = 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

Trong đó ε_1 là gia tốc góc tuyệt đối của khâu l_1 , ε_2 là gia tốc góc tuyệt đối của khâu l_2 , a là gia tốc thẳng tuyệt đối của thanh trượt D hoặc khâu l_3 .

Bề mặt băng ruy MR khi tiếp xúc với phôi Ti-6Al-4V, tác động một lực lên bề mặt phôi. Dưới tác động của cơ cấu tay quay thanh trượt, mảng Halbach di chuyển theo hướng x, hình thành nên các dải băng ruy MRF di chuyển theo chuyển động của mảng Halbach. Với gia tốc a và khối lượng của các hạt mài, lực quán tính tiếp tuyến được xác định phương trình sau:

$$F_{ti} = PXma \quad (2.35)$$

Khi cơ cấu tay quay–thanh trượt chuyển động, mảng Halbach sinh ra các thành phần lực tiếp tuyến và pháp tuyến động tác động lên bề mặt phôi theo thời gian t được xác định bởi:

$$F_N = F_{\sigma_0}(t) = \left(\frac{\mu_0 G R^5 \rho^2}{(R+s)^2} \iint_A (H^2 \chi_m^2) dA \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{n-1} \left[\frac{\sqrt{2} E_k}{2\sqrt{\pi \varepsilon}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha - \theta}{\varepsilon} \right)^2} \cos^5 \alpha \right] d\alpha \right) (s(t)) \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} F_T &= F_{\tau_0}(t) + F_{\tau_i} = F_{\tau_0}(t) + P X m a \\ &= \left(\frac{\mu_0 G R^5 \rho^2}{(R+s)^2} \iint_A (H^2 \chi_m^2) dA \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{n-1} \left[\frac{\sqrt{2} E_k}{2\sqrt{\pi \varepsilon}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha - \theta}{\varepsilon} \right)^2} \sin \alpha \cos^4 \alpha \right] d\alpha \right) (s(t)) + P X m a \end{aligned} \quad (2.37)$$

Bề mặt băng ruy MRF khi tiếp xúc với phôi Ti-6Al-4V sẽ tác động một lực đáng kể lên bề mặt phôi, góp phần tạo ra quá trình bóc tách vật liệu gia công hiệu quả. Dưới ảnh hưởng của cơ cấu tay quay thanh trượt, mảng Halbach di chuyển theo hướng x, dẫn đến sự hình thành và di chuyển của các dải băng ruy MRF theo chuyển động của mảng Halbach. Lực quán tính tiếp tuyến của các hạt mài, phụ thuộc vào gia tốc a và khối lượng của các hạt, được tính toán thông qua phương trình (2.35). Khi cơ cấu tay quay thanh trượt hoạt động, lực tiếp tuyến và pháp tuyến động sinh ra bởi mảng Halbach sẽ thay đổi theo thời gian t . Lực pháp tuyến, phụ thuộc vào sự tương tác giữa từ trường của mảng Halbach và bề mặt phôi, được tính bằng phương trình (2.36), giá trị lực được chi phối bởi tốc độ dịch chuyển cũng như khối lượng hạt mài, được xác định bởi phương trình (2.37). Hai lực này kết hợp tạo ra các tác động cắt, giúp bóc tách vật liệu hiệu quả khỏi bề mặt phôi, đồng thời duy trì chuỗi từ ổn định và các hạt mài trong quá trình đánh bóng. Các lực biến đổi đồng thời với chuyển động của cơ cấu tay quay thanh trượt, qua đó chi phối trực tiếp hiệu quả loại bỏ vật liệu và độ nhẵn bề mặt đạt được trong quá trình MRF.

2.7. KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Chương 2 tập trung phân tích cơ chế hoạt động công nghệ đánh bóng MRF dạng đĩa và đặc tính độ nhót của chất lỏng MRF, nhằm làm rõ cơ chế hình thành áp lực đánh bóng trong đánh bóng từ tính.

Một phương pháp đánh bóng từ tính mới sử dụng mảng nam châm Halbach cải tiến được đề xuất nhằm tạo vùng từ trường tập trung tại khu vực đánh bóng, giúp tăng hiệu quả đánh bóng.

Các cấu hình mảng nam châm khác nhau được phát triển và kiểm chứng dựa trên khả năng phục hồi, trong đó cấu hình tối ưu sử dụng nam châm 25×30 mm đạt mômen từ $\geq 28.09 \text{ fAm}^2$ và vùng từ trường $150 \times 135 \text{ mm}^2$ với mật độ từ thông 2.05 T.

Một mô hình toán học được thiết lập nhằm mô phỏng lực đánh bóng từ tính sử dụng mảng Halbach cải tiến kết hợp chuyển động tịnh tiến khứ hồi, nhằm tăng hiệu quả bóc tách vật liệu và chất lượng bề mặt của phôi Ti-6Al-4V.

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ THỰC NGHIỆM ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH SỬ DỤNG MẢNG HALBACH CẢI TIẾN GIA CÔNG HỢP KIM TI-6AL-4V

3.1. MỤC TIÊU VÀ YÊU CẦU

3.1.1. Mục tiêu

Hệ thống thực nghiệm được thiết lập nhằm kiểm chứng tính khả thi mô hình đánh bóng từ tính MRF sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi. Trong đó, các thực nghiệm đơn yếu tố được tiến hành để phân tích tác động của các thông số công nghệ quan trọng, bao gồm tốc độ quay của phôi, khoảng cách làm việc, hành trình tịnh tiến khứ hồi của mảng Halbach và thể tích dung dịch MRF, đến hiệu suất đánh bóng. Dung dịch MRF đóng vai trò then chốt trong cơ chế đánh bóng, với thành phần chính bao gồm hạt mài, hạt từ tính và các tác nhân hóa học. Với mục tiêu tối ưu hóa hiệu suất gia công, các thí nghiệm được thiết kế để đánh giá vai trò của nồng độ pH trong dung dịch MRF đến tốc độ loại bỏ vật liệu và chất lượng bề mặt sau đánh bóng. Đồng thời, hàm lượng chất oxy hóa H_2O_2 cũng được phân tích nhằm xác định cơ chế ảnh hưởng đến hiệu suất đánh bóng. Tiến trình thực nghiệm không chỉ mô tả chi tiết về ảnh hưởng của từng thành phần trong dung dịch MRF mà còn hỗ trợ lựa chọn chế độ công nghệ hợp lý cho mô hình đánh bóng đề xuất, đảm bảo sự cân bằng giữa hiệu suất loại bỏ vật liệu và nhám bề mặt đạt được.

Để hình thành chuyển động tương đối giữa bề mặt phôi và các hạt mài trong khi vẫn đảm bảo chuyển động ổn định giữa phôi và băng ruy MRF trong suốt quá trình đánh bóng vật liệu Ti-6Al-4V, cơ cấu tay quay thanh trượt được thiết lập nhằm tạo ra chuyển động tịnh tiến khứ hồi cho mảng Halbach cải tiến. Việc duy trì tính ổn định của băng ruy MRF sau mỗi chu kỳ khứ hồi đóng vai trò quyết định trong việc nâng cao hiệu quả loại bỏ lượng dư vật liệu và chất lượng bề mặt. Trong hệ thống thực nghiệm được thiết lập, các hạt từ tính Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2

có trong dung dịch MRF có vai trò lớn giúp tăng khả năng bóc tách lượng dư vật liệu gia công khi đánh bóng phôi Ti-6Al-4V. Các chỉ số như chất lượng bề mặt và khối lượng vật liệu bị loại bỏ trước và sau khi đánh bóng được đo lường chính xác, giúp đánh giá hiệu suất toàn diện của thiết bị đánh bóng MRF đề xuất.

Thông qua các phương pháp thực nghiệm, nghiên cứu không chỉ xác nhận hiệu quả đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến, mà còn nâng cao tính linh hoạt các yếu tố công nghệ kết hợp với cải tiến về lực cắt và khả năng loại bỏ vật liệu nhằm chứng minh tiềm năng của hệ thống đánh bóng được thiết lập trong gia công siêu chính xác, đặc biệt đối với những bề mặt đòi hỏi độ bóng cao của vật liệu Ti-6Al-4V.

3.1.2. Yêu cầu

Thiết kế và triển khai hệ thống thiết bị thí nghiệm cho quá trình đánh bóng từ tính (MRF) sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi cần đáp ứng các tiêu chí sau:

- Hệ thống được yêu cầu thiết kế đảm bảo tính thuận tiện trong quá trình chế tạo, lắp ráp và vận hành. Các bộ phận, đặc biệt là hệ thống tạo chuyển động tịnh tiến khứ hồi của mảng Halbach, phải đảm bảo tính tương thích và khả năng kết nối với các hệ thống thiết bị sẵn có, giảm thiểu yêu cầu bảo dưỡng phức tạp. Điều này đảm bảo rằng quá trình thực nghiệm có thể tiến hành liên tục và không bị gián đoạn.

- Mảng Halbach trong hệ thống được điều khiển chuyển động tịnh tiến khứ hồi bởi cơ cấu tay quay thanh trượt, giúp duy trì sự ổn định và đồng nhất trong quy trình đánh bóng MRF. Hệ thống này cần đảm bảo rằng lực từ sinh ra từ mảng Halbach luôn tác động lên chi tiết gia công với cường độ nhất quán, tạo ra áp lực lớn giữa các hạt mài SiO_2 dưới tác dụng hạt từ tính Fe_3O_4 trong dung dịch MRF

và bề mặt chi tiết, giúp nâng cao khả năng loại bỏ vật liệu và đạt được độ nhám bề mặt mong muốn.

- Tất cả các yếu tố thiết kế cần phải hướng đến việc hoàn thiện và tối đa hóa hiệu quả đánh bóng từ tính, đảm bảo rằng hệ thống có thể duy trì hoạt động ổn định và liên tục trong suốt quá trình thí nghiệm, đồng thời cho phép dễ dàng điều chỉnh các thông số như tốc độ quay, khoảng cách đánh bóng và chuyển động của mảng Halbach.

3.2. THIẾT LẬP HỆ THỐNG THỰC NGHIỆM

3.2.1. Máy gia công

Trong luận án này, các tiến trình thực nghiệm đánh bóng MRF được tiến hành trên máy phay 5 trục DMU50, một thiết bị gia công tiên tiến với độ chính xác cao. Một nhân tố quan trọng trong áp dụng công nghệ đánh bóng từ tính, nơi chất lượng bề mặt và độ ổn định trong quá trình gia công đóng vai trò then chốt.



Hình 3.1 Hình ảnh thiết bị thực nghiệm đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V trên máy CNC 5 trục DMU50

Hình 3.1 mô tả máy DMU50, thiết bị có độ chính xác cao cho vật liệu khó gia công và đảm bảo chất lượng bề mặt theo yêu cầu công nghệ. Do đó, máy đảm bảo yêu cầu cùng độ tin cậy cao trong các thí nghiệm đánh bóng. Các thông số kỹ thuật của máy DMU50 được mô tả trên Bảng 3.1, bao gồm các thông số quan trọng như tốc độ trục chính, hành trình trục X, Y, Z, B, C đóng vai trò quan trọng trong đánh bóng MRF và đảm bảo ổn định trong suốt các thí nghiệm. Với các đặc tính kỹ thuật này, máy DMU50 trở thành lựa chọn lý tưởng cho nghiên cứu, đáp ứng tốt hiệu suất và độ chính xác trong quy trình đánh bóng MRF đã đề xuất.

Bảng 3.1 Thông số kỹ thuật của trung tâm gia công DMU50

Thông số kỹ thuật	Giá trị	Thông số	Giá trị
Hành trình trục B	-5° đến +110°	Số dài dao	16
Hành trình Z/Y/Y	400/450/500 mm	Trục quay B và C	Lớn nhất 20 (vòng/phút)
Hành trình trục C	360 độ	Chiều dài dao tối đa	300 mm
Công suất trục chính	20.3 kW	Đường kính bàn máy	630 mm
Tốc độ trục chính	14.000 (vòng/phút)	Trọng lượng dao tối đa	6 kg
Côn trục chính	Tiêu chuẩn DIN69871: SK40	Tốc độ chạy dao nhanh	30000 mm/phút

3.2.2. Vật liệu

Nhằm xác định các yếu tố ảnh hưởng chính và tối ưu hóa thông số công nghệ trong quá trình đánh bóng, các thí nghiệm đơn yếu tố kết hợp với thí nghiệm trực giao đã được thực hiện trên vật liệu Ti-6Al-4V. Trong các thí nghiệm đơn yếu tố, từng yếu tố công nghệ như tốc độ quay, khoảng cách đánh bóng, hành

trình của mảng Halbach và thể tích dung dịch MRF được thay đổi độc lập nhằm tìm ra thông số phù hợp cho các yếu tố, nhằm tối đa hóa hiệu suất bóc tách vật liệu và giảm thiểu nhám bề mặt. Bên cạnh đó, các thí nghiệm theo phương pháp thiết kế trực giao được tiến hành nhằm đánh giá tương tác giữa các yếu tố và xác định tập thông số công nghệ tối ưu cho quá trình đánh bóng.

Bảng 3.2 Thành phần hóa học của hợp kim Ti-6Al-4V [105]

Thành phần	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
Hàm lượng (%)	Còn lại	5.5÷6.8	3.5÷4.5	0.30	0.1	0.05	0.015	0.20

Bảng 3.3 Thành phần dung dịch MRF với hạt mài SiO_2 và hạt từ tính Fe_3O_4 được sử dụng

Số thứ tự	Đặc điểm	Thông số	Thể tích (%)	Hãng sản xuất
1	Hạt mài (SiO_2)	300 nm	10 Vol%	Luoyang Tongrun Info Technology Co., Ltd.
2	Hạt từ tính (Fe_3O_4)	1 μm	30 Vol%	Changsha Zhonglong Chemical Co., Ltd.
3	Chất oxi hóa (H_2O_2)	-	2 Vol%	Shanghai Arkema Hydrogen Peroxide Co., Ltd.
4	Axit Malic	pH = 4	-	Shanghai Aladdin Biochemical Technology Co., Ltd.
5	Nước tinh khiết	-	40-45 Vol%	Fisher Scientific Korea Co., Ltd.

Trong các thiết lập thực nghiệm, các phôi Ti-6Al-4V có kích thước tương ứng $32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ được sử dụng trong đánh bóng MRF với mảng Halbach cải tiến với thông số vật liệu như được mô tả trên Bảng 3.2. Bề mặt phôi Ti-6Al-4V trước khi đánh bóng được mài với Ra xấp xỉ 500 nm. Thể tích dung dịch MRF sử dụng trong đánh bóng MRF được thiết lập ở mức 500 mL. Thành phần cụ thể được mô tả trong Bảng 3.3. Hạt mài SiO_2 (với kích thước hạt trung

bình 300 nm) được cung cấp bởi Luoyang Tongrun Info Technology. Các hạt từ tính được sử dụng là Fe_3O_4 với kích thước hạt trung bình 1 μm do công ty Changsha Zhonglong Chemical. Nước tinh khiết được cung cấp bởi Fisher Scientific Korea. Với dung dịch MRF cho thấy hiệu suất và chất lượng cao ở độ pH thấp, độ pH được đặt ở mức 4 với axit malic (56%).

3.2.3 Thiết bị đo

Thiết bị đo lực ba thành phần F_x , F_y , F_z được sử dụng trong nghiên cứu đo lực đánh bóng với cảm biến Kistler Type 9139AA từ hãng Kistler, Thụy Sĩ, với khả năng đo trong khoảng từ -3 kN đến 3 kN như được thể hiện trên Hình 3.2. Dữ liệu lực được thu nhận và đánh giá bằng hệ thống thu và xử lý loại 3160-B-042 và phần mềm DynoWare. Hệ thống này đảm bảo độ chính xác đến 0.1 N, cung cấp dữ liệu ổn định và đáng tin cậy cho quá trình phân tích thực nghiệm.



Hình 3.2 Thiết bị đo lực Kistler Type 9139AA

Thông số nhám bề mặt được đo bởi thiết bị đo quang học Keyence-VHX-7000 như được mô tả trên Hình 3.3. Thiết bị cho phép quan sát, chụp ảnh và cho ra giá trị độ nhám với các tiêu chuẩn ISO-643, ISO-16232, ISO 4287, ASTM-E1382, JIS-G0551 và ISO-25178. Độ phóng đại của hệ thống hỗ trợ từ 1 đến 5000 lần, với độ nhám bề mặt có thể đo được 0,001 μm (tương ứng mức 1 nm).

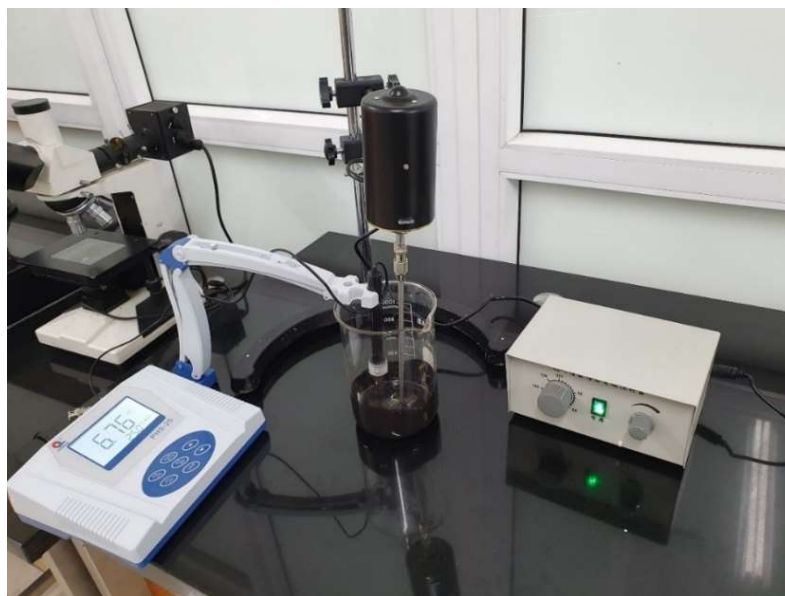
Phạm vi dịch chuyển của thiết bị bao gồm: trục Z từ 0 đến 46 mm, trục X từ 0 đến 100 mm, và trục Y từ 0 đến 100 mm. Khả năng xoay đầu đo theo trục Y từ 60° đến 90° , trong khi góc xoay $\pm 90^\circ$ theo trục X và Y.



Hình 3.3 Thiết bị đo nhám bề mặt Keyence VHX 7000

Để chuẩn bị dung dịch đánh bóng từ tính đạt trạng thái đồng nhất trong các quy trình đánh bóng MRF, dung dịch được khuấy đều với tốc độ ổn định trong 30 phút. Quá trình khuấy này giúp phân bố đồng đều các hạt mài, hạt từ tính và các thành phần khác trong dung dịch MRF. Sau khi khuấy, độ pH của dung dịch MRF được xác định thông qua thiết bị đo pH PHS-25 như mô tả trên Hình 3.4.

Hình 3.5 mô tả hai thiết bị đo cường độ từ trường KT-101 và nhám SJ-201. Thiết bị KT-101 được sử dụng để đo cường độ từ trường với độ chính xác 0.1 mT, cho phép xác định quy luật phân bố từ trường trong vùng đánh bóng. Trong khi đó, thiết bị đo nhám bề mặt SJ-201 có khả năng xác định nhám sau khi gia công. Quá trình sử dụng kết hợp hai thiết bị này giúp làm rõ mối quan hệ giữa cường độ từ trường và độ nhám bề mặt, từ đó hỗ trợ tối ưu hóa các thông số công nghệ để đạt chất lượng bề mặt tối ưu.



Hình 3.4 Thiết bị đo pH và máy khuấy dung dịch từ tính trước khi đánh bóng



Hình 3.5 Thiết bị đo cường độ từ trường KT-101 và nhám bề mặt Sj-201

Hình 3.6 minh họa quy trình xác định khả năng loại bỏ vật liệu trước và sau khi đánh bóng bằng thiết bị đo ViBRA có độ chính xác cao đến 0.1 mg. Trước và sau quy trình đánh bóng mẫu được cân để xác định khối lượng trước và sau đánh bóng. Chênh lệch khối lượng phản ánh chính xác lượng vật liệu đã được bóc tách trong quá trình đánh bóng.



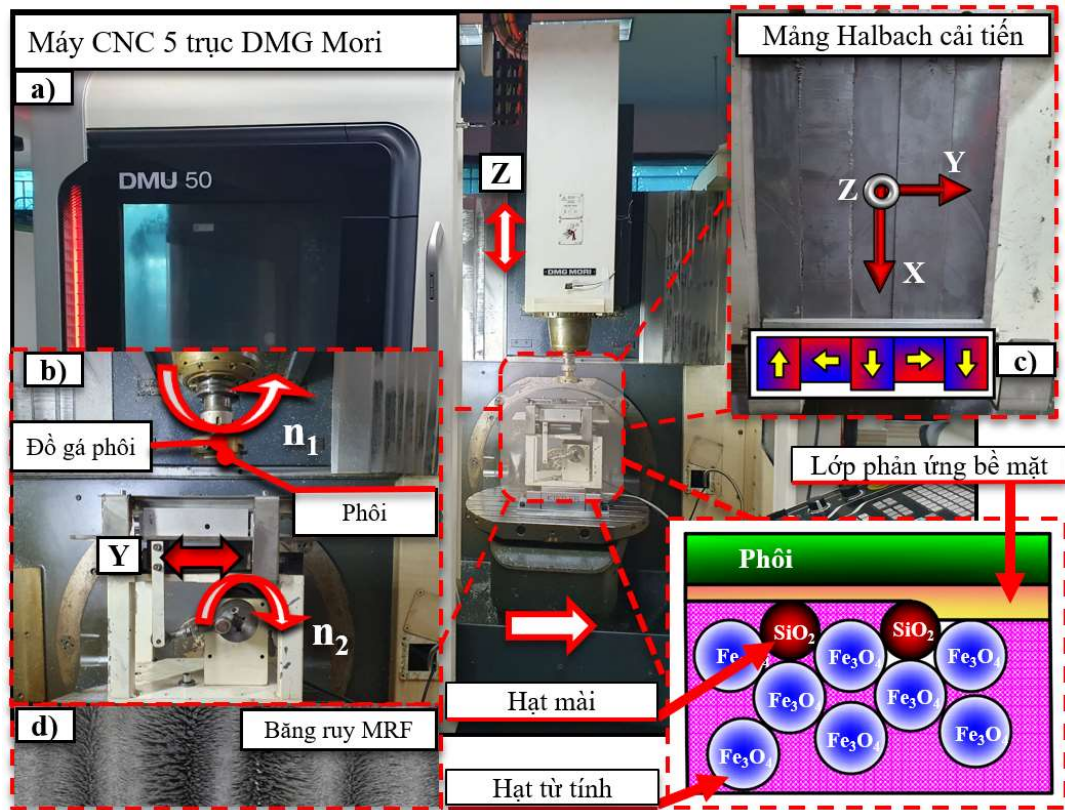
Hình 3.6 Cân chính xác ViBRA phôi trước và sau khi đánh bóng

3.3. THIẾT LẬP CÁC THỬ NGHIỆM ĐƠN YẾU TỐ

Nhằm xem xét đặc tính bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu khi đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V do mảng Halbach mang lại, các thực nghiệm được tiến hành theo điều kiện đánh bóng và thông số công nghệ được mô tả trong Bảng 3.4. Quy trình thử nghiệm đầu tiên tập trung phân tích vai trò của tốc độ quay của phôi tới chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu. Trong bộ thí nghiệm thứ hai, hiệu suất đánh bóng với dải tốc độ khác nhau của mảng Halbach được thực hiện nhằm làm rõ tác động của mảng Halbach lên chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu. Bộ thí nghiệm thứ ba nhằm kiểm tra ảnh hưởng giữa khoảng cách đánh bóng tới hiệu quả đánh bóng, trong khi bộ thí nghiệm cuối cùng khảo sát ảnh hưởng của thể tích dung dịch MRF đến khả năng bóc tách vật liệu và chất lượng bề mặt.

Thiết bị đánh bóng MRF với mảng từ trường Halbach tịnh tiến khứ hồi như mô tả trong Hình 3.7, hệ tọa độ bề mặt Oxyz tại tâm của nó trong cấu hình mảng Halbach cải tiến được thiết lập. Hướng Z theo hướng trục chính của máy CNC được đặt vuông góc với đĩa mang dung dịch MRF và bề mặt làm việc của mảng Halbach cải tiến, hướng Y theo hướng chuyển động tịnh tiến của mảng Halbach

và hướng X theo chiều dài của nam châm. Mảng Halbach cải tiến được thiết lập với năm nam châm có kích thước 30×25×150 mm như mô tả trong Hình 3.7c, chuyển động tịnh tiến khứ hồi được thiết lập bằng cơ cấu tay quay thanh trượt như mô tả trong Hình 3.7b.

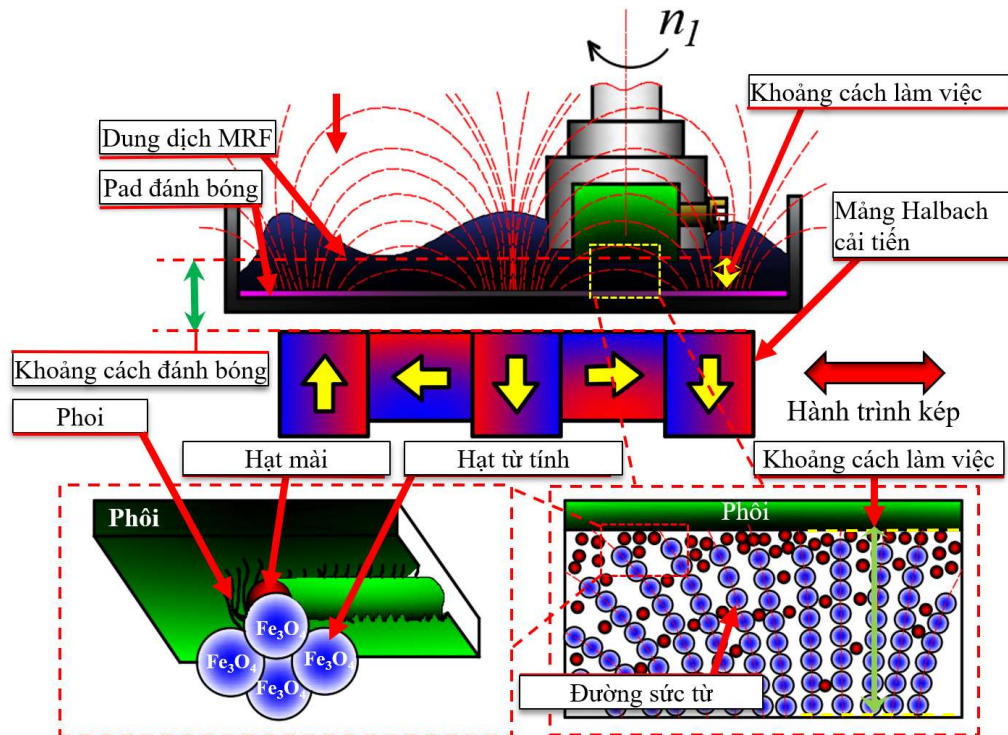


Hình 3.7 Mô hình thực nghiệm đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi

Bảng 3.4 Các thông số đánh bóng với mảng Halbach cải tiến

Mức	Tốc độ phôi (vòng/phút)	Hành trình kép mảng Halbach (hành trình/phút)	Khoảng cách làm việc	Thể tích MRF
1	200	15	1 mm	200 ml
2	300	20	1.5 mm	300 ml
3	400	25	2 mm	400 ml
4	500	30	2.5 mm	500 ml

Nguyên lý hoạt động của quy trình MRF sử dụng mảng Halbach cải tiến được mô tả trên Hình 3.8. Trong đó mảng Halbach được thiết lập bên dưới đĩa mang dung dịch MRF được làm từ vật liệu SUS 304, mảng Halbach cải tiến tạo ra chuyển động khứ hồi bởi cơ cấu tay quay thanh trượt. Phôi được gắn chặt vào trục chính của máy phay CNC 5 trục Mori DMU. Trên đĩa mang dung dịch MRF, một miếng đánh bóng bằng da lộn, được đặt một lượng dung dịch MRF thích hợp lên trên. Khoảng cách làm việc được điều chỉnh thông qua dịch chỉnh trục chính của máy CNC 5 trục theo phương Z. Phôi gắn với trục chính máy phay và được thiết lập với tốc độ quay n_1 . Trong khi đó, động cơ trong thiết bị đánh bóng MRF quay với tốc độ n_2 , tạo ra chuyển động tịnh tiến khứ hồi cho mảng Halbach được cải tiến.



Hình 3.8 Sơ đồ nguyên lý đánh bóng MRF với mảng Halbach cải tiến

Dưới tác động của từ trường do mảng Halbach tạo ra, cấu trúc các cụm hạt từ tính Fe_3O_4 trong dung dịch MRF đã gia tăng, như mô tả trong Hình 3.8, khi

các hạt này sắp xếp thành chuỗi theo các đường sức từ. Độ dốc của từ trường do mảng Halbach cải tiến tạo ra, khiến các hạt từ tính bám chặt vào Pad đánh bóng và di chuyển tịnh tiến khứ hồi đồng bộ với mảng Halbach.

Dưới ảnh hưởng của từ trường được áp dụng, các hạt từ tính bị hút chặt về phía mảng Halbach trong khi các hạt mài SiO_2 phi từ tính bị đẩy về phía bề mặt phôi Ti-6Al-4V như được minh họa trong Hình 3.8. Bên cạnh đó các hạt mài SiO_2 này được giữ chặt bởi các hạt từ tính Fe_3O_4 trong dải băng ruy MRF tạo thành lực cắt tác dụng lên bề mặt phôi.

Bảng 3.5 Thông số kỹ thuật vật liệu cho quy trình đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi

Đặc tính	Vật liệu	Kích thước (mm)	Độ thấm từ	Độ lớn (A/m)
Nam châm vĩnh cửu	Nd-Fe	30×25×150	1.09977	-890000
MRF carrier	Al		1	
Slurry	MRF		5	
Workpiece	Ti-6Al-4V	32×32×15	1	

Bảng 3.6 Các thông số của hạt từ tính Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2

Vật liệu	Thông số	Độ thấm từ (N/A^2)	Độ cảm từ (m^3/kg)	Mật độ (kg/cm^3)
Fe_3O_4	$d_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 1\mu m$	$\mu = 5,03.10^{-4}$	$\chi_m = 0.5 \times 10^{-3}$	$\rho_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 5.17 \times 10^{-3}$
SiO_2	$d_{\text{SiO}_2} = 300nm$	-	$\chi'_m = 0$	$\rho_{\text{SiO}_2} = 2.65 \times 10^{-3}$

Chuyển động phối hợp, bao gồm tốc độ phôi do trục chính máy phay tạo ra và chuyển động khứ hồi bởi mảng Halbach, hình thành chuyển động tương đối giữa các hạt mài SiO_2 có kích thước nanomet và phôi. Chuyển động phối hợp này hỗ trợ loại bỏ một lượng rất nhỏ vật liệu gia công. Trong phương pháp đánh bóng MRF đề xuất với hạt Fe_3O_4 và SiO_2 quá trình tiếp xúc liên tục giữa các hạt

mài với phôi được duy trì thông qua chuyển động tịnh tiến khứ hồi. Khi các hạt di chuyển và phân tách khi tiếp xúc với bề mặt phôi, ngay lập tức hình thành nên dải băng ruy MRF mới được phân phối lại trong vùng đánh bóng, qua đó liên tục tạo ra các hạt mài và hạt từ tính mới. Quá trình này nhằm đảm bảo hiệu quả đánh bóng MRF được tạo điều kiện thuận lợi bởi mảng Halbach cải tiến. Những thông số đặc trưng của vật liệu sử dụng trong quy trình MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi và các đặc tính của hạt từ tính Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2 được mô tả chi tiết trong Bảng 3.5 và 3.6.

Fe_3O_4 là một dạng oxit sắt có trong tự nhiên với độ ổn định hóa học cao cùng khả năng tương thích sinh học tốt, nhờ ưu điểm về độ an toàn và khả năng thân thiện môi trường, vật liệu này thích hợp cho các quy trình đánh bóng dựa trên dung dịch MRF. Với độ từ hóa bão hòa cao trong khoảng 92–100 emu/g, Fe_3O_4 có khả năng hình thành các cấu trúc chuỗi dưới tác dụng của từ trường, từ đó hình thành lực tác dụng lên hạt mài trong các quy trình đánh bóng. Bên cạnh đó, khả năng ổn định huyền phù tốt của Fe_3O_4 giúp ngăn ngừa hiện tượng lắng đọng nhanh, đảm bảo hiệu suất đánh bóng ổn định theo thời gian. Các hạt từ tính Fe_3O_4 được lựa chọn có kích thước trung bình 1 μm nhằm đảm bảo tính ổn định của cấu trúc chuỗi từ và khả năng phân tán đồng nhất của các hạt trong dung dịch. Khi đường kính hạt từ tính Fe_3O_4 lớn hơn ($>3 \mu\text{m}$) thường có xu hướng kết tụ, dẫn đến quá trình đánh bóng không đồng đều, trong khi các hạt nhỏ hơn ($<500 \text{ nm}$) sẽ làm giảm lực tương tác từ tính qua đó giảm hiệu quả đánh bóng [128, 129].

Hạt mài SiO_2 được sử dụng trong đánh bóng MRF nhờ tính trơ, không độc và sẵn có trong tự nhiên dưới dạng cát và thạch anh. Với độ cứng Mohs ở mức 7, SiO_2 có khả năng loại bỏ lớp bề mặt bị oxy hóa một cách hiệu quả, cùng với đó duy trì khả năng cân bằng giữa tốc độ loại bỏ vật liệu và chất lượng bề mặt, qua đó giảm thiểu nứt vi mô dưới bề mặt gia công. Kích thước hạt mài SiO_2 được

lựa chọn tương ứng đường kính trung bình 300 nm nhằm tối ưu hóa hiệu quả đánh bóng. Các nghiên cứu cho thấy rằng hạt mài trong khoảng 100–500 nm mang lại độ hoàn thiện bề mặt cao; trong khi các hạt lớn hơn (>500 nm) dễ gây xước bề mặt, còn các hạt nhỏ hơn (<100 nm) lại không đủ lực tác động để loại bỏ vật liệu hiệu quả [94].

Sự kết hợp giữa hạt từ tính Fe_3O_4 kích thước 1 μm và hạt mài SiO_2 kích thước 300 nm, được hỗ trợ bởi phân tích lý thuyết và kiểm chứng thực nghiệm, đã chứng minh khả năng đánh bóng hiệu quả và mang lại độ hoàn thiện bề mặt vượt trội, phù hợp cho các ứng dụng gia công chính xác cao. Dung dịch đánh bóng MRF được chuẩn bị bằng cách trộn các hạt Fe_3O_4 và SiO_2 trong môi trường nước khử ion. Trước tiên, các hạt từ tính Fe_3O_4 (1 μm , chiếm 30% theo thể tích) được khuấy trong nước khử ion với tốc độ 200 vòng/phút trong 30 phút nhằm ngăn ngừa hiện tượng kết tụ và đảm bảo phân tán đồng đều. Tiếp theo, các hạt mài SiO_2 (300 nm, chiếm 10% theo thể tích) được thêm vào từ từ trong quá trình khuấy liên tục để duy trì tính đồng nhất của huyền phù. Để tăng cường hiệu ứng đánh bóng cơ - hóa, chất oxy hóa H_2O_2 ở nồng độ 2% được bổ sung nhằm xúc tiến phản ứng oxy hóa bề mặt, từ đó nâng cao hiệu quả loại bỏ vật liệu. Đồng thời, axit malic được sử dụng để điều chỉnh pH về mức 4, đảm bảo môi trường phản ứng ổn định. Cuối cùng, dung dịch được tiếp tục khuấy trong 30 phút để duy trì tính đồng nhất trước khi sử dụng trong quá trình đánh bóng MRF.

Một dung dịch thân thiện với môi trường đã được phát triển cho quy trình đánh bóng MRF, bao gồm chất oxy hóa H_2O_2 , nước tinh khiết và dung dịch axit malic. Dung dịch MRF thiết lập chứa các hạt mài SiO_2 và hạt từ tính Fe_3O_4 với nồng độ H_2O_2 tương ứng 2% theo thể tích, duy trì độ pH ở mức 4 thông qua hàm lượng axit malic. Các quy trình đánh bóng theo phương pháp CMP và MRF được mô tả trong Bảng 3.7 nhằm xác định phương pháp đánh bóng hiệu quả nhất cho phôi Ti-6Al-4V. Thời gian đánh bóng được điều chỉnh theo các mức 20, 40, 60,

80, và 100 phút, với khoảng cách đánh bóng là 5 mm cùng tốc độ động cơ nhằm tạo chuyển động khứ hồi cho băng ruy MRF được thiết lập ở mức 25 vòng/phút.

Bảng 3.7 Thành phần hỗn hợp đánh bóng MRF

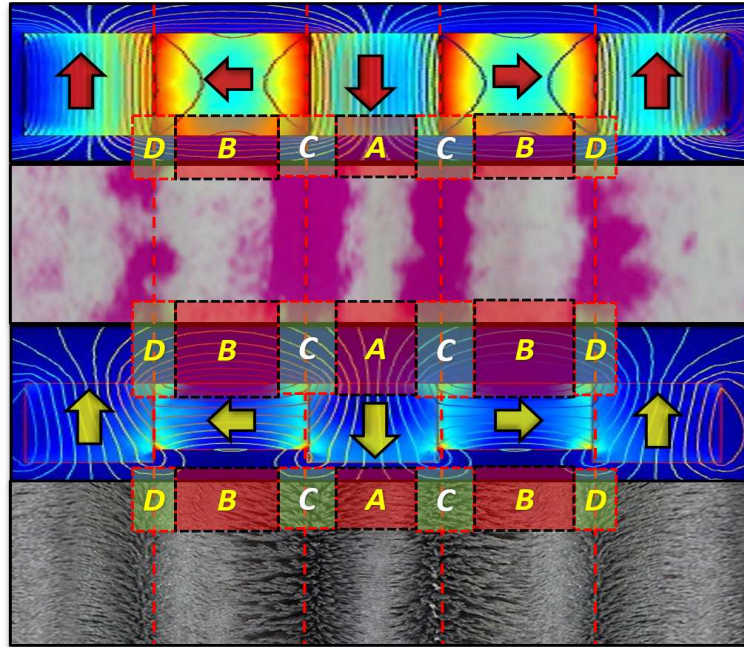
Dung dịch đánh bóng	Loại Axit	Phần trăm chất oxi hóa	Hạt mài	Thể tích dung dịch	Thể tích hạt mài
CMP-1	HOOC-CH ₂ -CH(OH)-COOH	2 %	SiO ₂	200 ml	40 %
CMP-2	H ₃ PO ₄	2 %	SiO ₂	200 ml	40 %
CMP-3	H ₂ SO ₄	2 %	SiO ₂	200 ml	40 %
MRF -1	HOOC-CH ₂ -CH(OH)-COOH	2 %	Fe ₃ O ₄ -SiO ₂	200 ml	40 %
MRF -2	H ₃ PO ₄	2 %	Fe ₃ O ₄ -SiO ₂	200 ml	40 %
MRF -3	H ₂ SO ₄	2 %	Fe ₃ O ₄ -SiO ₂	200 ml	40 %

Nhằm làm rõ tác động của từng thông số riêng lẻ đến hiệu suất và chất lượng bề mặt, các thí nghiệm đơn yếu tố đã được tiến hành cho đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V. Trong các thực nghiệm này, từng thông số công nghệ được thay đổi trong khi các điều kiện thực nghiệm với các thông số công nghệ khác được giữ cố định. Mục tiêu của các thực nghiệm này nhằm tìm ra điều kiện công nghệ tối ưu của dung dịch đánh bóng, đồng thời xác định gian đánh bóng phù hợp nhất cho mô hình đánh bóng MRF đã đề xuất.

3.4. ÁP LỰC TÁC DỤNG LÊN MẶT PHÔI TI-6AL-4V TRONG VÙNG ĐÁNH BÓNG

Áp suất và vết do băng ruy MRF tác dụng lên bề mặt phôi Ti-6Al-4V trong quá trình đánh bóng từ tính với mảng Halbach cải tiến được mô tả trong Hình 3.9. Áp lực của băng ruy MRF tập trung tại vùng ranh giới (C) giữa các nam châm, cho thấy khả năng loại bỏ vật liệu cao tại vùng ranh giới này. Tại vùng ranh giới này do xuất hiện lực từ và độ dốc từ cao, qua đó các hạt từ Fe₃O₄ tập

trung nhiều ở khu vực này. Do đó, băng ruy MRF với áp lực và lực từ cao hình thành và tác động lên các hạt mài SiO_2 , đảm bảo bóc tách vật liệu gia công hiệu quả.



Hình 3.9 Áp lực tác dụng lên băng ruy MRF trong quy trình đánh bóng

Ở vùng (A), các đường sức từ chạy vuông góc với phôi, các chuỗi từ tạo thành gần như song song với bề mặt phôi. Do đó, hiệu quả đánh bóng của các hạt từ và hạt mài không cao bằng vùng (C). Dưới tác dụng của độ dốc trong vùng (B), các hạt từ tạo thành các chuỗi dọc theo đường ngang của lực từ di chuyển về phía vùng ranh giới của nam châm. Tương tự như vùng (A), lực từ trong vùng này bị hạn chế, ngăn chặn sự tập trung với mật độ cao của hạt từ tính qua đó cản trở hiệu suất đánh bóng hiệu quả. Để khắc phục sự khác biệt giữa các vùng, các chuyển động qua lại của cơ cấu tay quay thanh trượt được thiết lập để tạo ra hiệu suất đánh bóng đồng đều và các hạt mài mòn và từ tính liên tục được đưa vào bề mặt gia công trong các quy trình đánh bóng MRF.

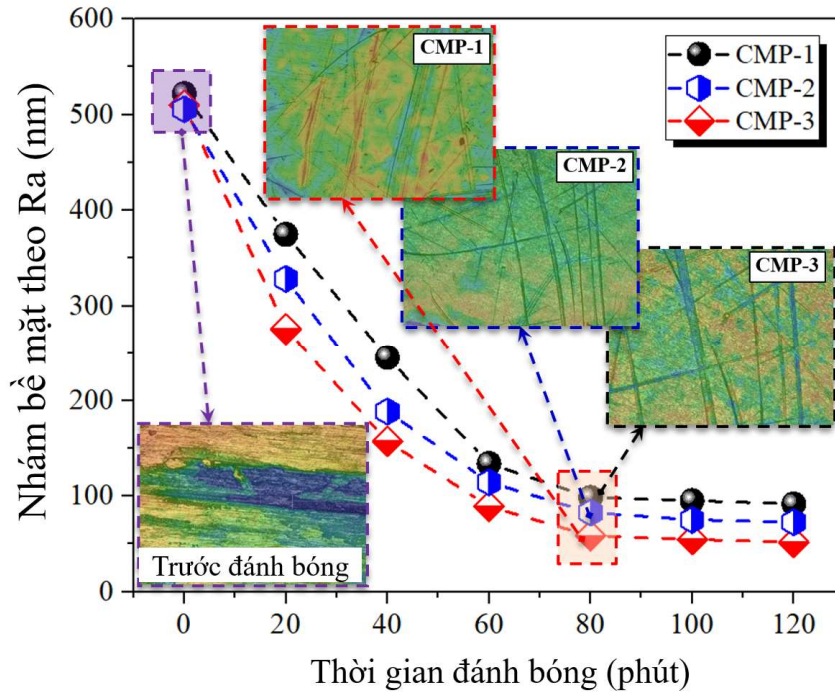
Áp lực đánh bóng được nghiên cứu bằng phim đo áp suất Fujifilm PRESCALE 4LW với phạm vi áp suất đo được là 0.03–0.5 MPa. Áp suất tác dụng lên bề mặt bunn MRF thay đổi theo lực từ tại các vị trí khác nhau. Các mức áp suất được thể hiện bằng bảng màu khác nhau trên bề mặt phim áp suất Fuji. Từ trường và mối tương quan của nó với áp suất từ ruy băng MRF tác động lên phôi đã được nghiên cứu dưới tác động của mảng Halbach cải tiến.

3.5. PHÂN TÍCH VÀ LỰA CHỌN AXIT, HẠT MÀI CHO QUÁ TRÌNH ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH

Để giải quyết thách thức liên quan đến việc sử dụng các dung môi có tính ăn mòn cao như axit nitric (HNO_3), axit hydrofluoric (HF) và axit sulfuric (H_2SO_4) trong dung dịch đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V, một dung dịch đánh bóng thân thiện với môi trường đã được xây dựng. Dung dịch này được phát triển thông qua việc phân tích ảnh hưởng của cả axit mạnh, axit trung bình và axit yếu đến hiệu suất đánh bóng. Các axit đã được thiết lập để tìm ra một loại axit có hiệu suất cao trong các quy trình đánh bóng bao gồm axit photphoric (H_3PO_4), axit sulfuric (H_2SO_4) và axit malic ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$) với độ pH được thiết lập đồng mức 4.

Những kết quả được trình bày trong Hình 3.10 cho thấy ảnh hưởng của các thành phần hóa học khác nhau đến quá trình đánh bóng cơ hóa học (CMP), được mô tả chi tiết trong Bảng 3.7. Có thể thấy rằng khi thời gian đánh bóng tăng lên, độ nhám bề mặt của phôi Ti-6Al-4V giảm nhanh chóng trong giai đoạn đầu và đạt trạng thái ổn định sau 80 phút đánh bóng. Vì vậy, thời gian tối ưu để đạt chất lượng bề mặt mong muốn là 80 phút. Sau khi thực hiện quá trình đánh bóng CMP với các dung dịch và thời gian khác nhau, như minh họa trong Hình 3.10, độ nhám bề mặt được ghi nhận. Cụ thể, sử dụng các dung dịch axit sunfuric

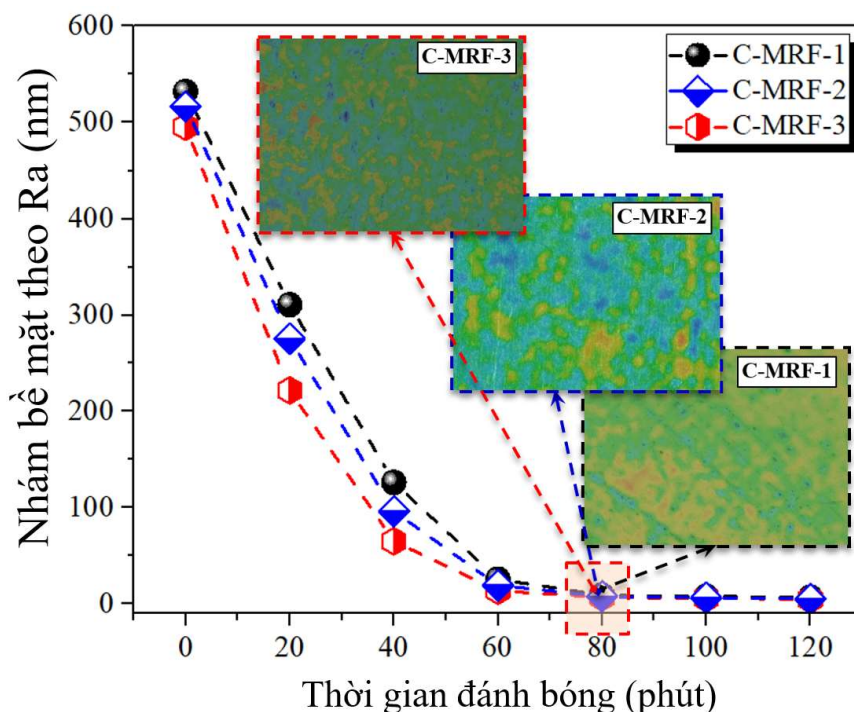
(H_2SO_4), axit photphoric (H_3PO_4), và axit malic ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$), độ nhám bề mặt lần lượt đạt 58 nm, 81 nm, và 93 nm.



Hình 3.10 Độ nhám bề mặt phôi Ti-6Al-4V theo thời gian bởi các quy trình CMP

Biểu diễn trong Hình 3.10 cung cấp thông tin chi tiết về hình thái bề mặt phôi Ti-6Al-4V, cả trước và sau khi đánh bóng, bằng cách sử dụng CMP với các loại axit khác nhau. Điều đáng chú ý là axit malic ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$), có nguồn gốc từ axit trái cây, thể hiện tính axit nhẹ. Khả năng ion hóa một phần ion H^+ trong dung dịch đánh bóng qua đó cho phép hình thành lớp oxit hòa tan trên bề mặt phôi. Axit photphoric (H_3PO_4) và axit sunfuric (H_2SO_4) là những axit trung bình và mạnh có khả năng ion hóa các ion H^+ , có thể phản ứng với lớp oxit trên bề mặt phôi và thành phần hợp kim trên bề mặt phôi Ti-6Al-4V. Kết quả thực nghiệm như mô tả trong Hình 3.10 cho thấy giá trị độ nhám bề mặt phôi Ti-6Al-4V được đánh bóng bằng CMP đề xuất với axit photphoric (H_3PO_4) và axit sunfuric (H_2SO_4) đã cải thiện đáng kể bề mặt. CMP với axit sunfuric (H_2SO_4)

cho độ nhám bề mặt thấp nhất với ít vết xước bề mặt hơn, trong khi giá trị độ nhám bề mặt được đánh bóng bằng axit malic ($C_4H_6O_5$) là cao nhất cùng với hình thái bề mặt có nhiều vết xước hơn.



Hình 3.11 Nhám bề mặt phôi Ti-6Al-4V thu được theo thời gian và dung dịch MRF khác nhau

Phương pháp đánh bóng với dung dịch MRF khác nhau như mô tả trong Bảng 3.7, với thay đổi nhám bề mặt theo thời gian đánh bóng khác nhau như minh họa trong Hình 3.11. Đáng chú ý, tác động của các loại axit khác nhau đến chất lượng bề mặt trong quy trình đánh bóng MRF đề xuất là không đáng kể. Đồng thời, chất lượng bề mặt đã được cải thiện đáng kể so với quy trình đánh bóng CMP như mô tả trên Hình 3.10, với các vết xước nhỏ và độ nhám bề mặt đạt được lần lượt 10 nm, 9 nm và 7 nm khi sử dụng axit malic ($C_4H_6O_5$), axit photphoric (H_3PO_4) và axit sunfuric (H_2SO_4). Kết quả phân tích như mô tả trên Hình 3.10 và 3.11 cho thấy quy trình đánh bóng MRF đã được thiết lập hiệu quả, sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi tạo ra từ trường mạnh. Phương pháp

tiếp cận này tỏ ra vượt trội so với quy trình đánh bóng CMP thông thường trong việc cải thiện khả năng đánh bóng.

Trong quy trình đánh bóng CMP khi sử dụng các axit mạnh và yếu, như axit malic, axit photphoric và axit sunfuric, mang lại kết quả độ nhám bề mặt khác nhau, với axit mạnh hơn giúp đạt được độ nhám thấp hơn. Tuy nhiên, quy trình đánh bóng MRF, kết hợp màng Halbach, tạo ra sự cân bằng lý tưởng giữa yếu tố cơ học và hóa học. Sự cân bằng này không chỉ tăng cường khả năng loại bỏ vật liệu mà còn đảm bảo chất lượng bề mặt cao.

Màng Halbach tinh tiến khứ hồi trong quy trình MRF đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường sự tương tác giữa dải MRF dưới tác động của từ trường và bề mặt phôi Ti-6Al-4V, đồng thời giảm thiểu ảnh hưởng của các phản ứng hóa học lên bề mặt. Tính chất tác động kép này của quy trình MRF không chỉ tận dụng sức mạnh cơ học để loại bỏ lượng dư vật liệu gia công mà còn duy trì và cải thiện chất lượng bề mặt khi kết hợp với quy trình CMP. Sự cân bằng tinh tế giữa các yếu tố cơ học và hóa học này đảm bảo quá trình đánh bóng không chỉ hiệu quả về mặt kỹ thuật mà còn duy trì chất lượng bề mặt vượt trội, bất kể loại axit nào được sử dụng trong điều kiện pH giống nhau. Do đó, dựa trên sự xem xét toàn diện, axit malic ($C_4H_6O_5$) được đề xuất là dung dịch đánh bóng phù hợp và an toàn cho hợp kim Ti-6Al-4V.

3.6. PHÂN TÍCH HIỆU SUẤT ĐÁNH BÓNG HỢP KIM TI-6AL-4V THEO NỒNG ĐỘ pH KHÁC NHAU TRONG DUNG DỊCH MRF

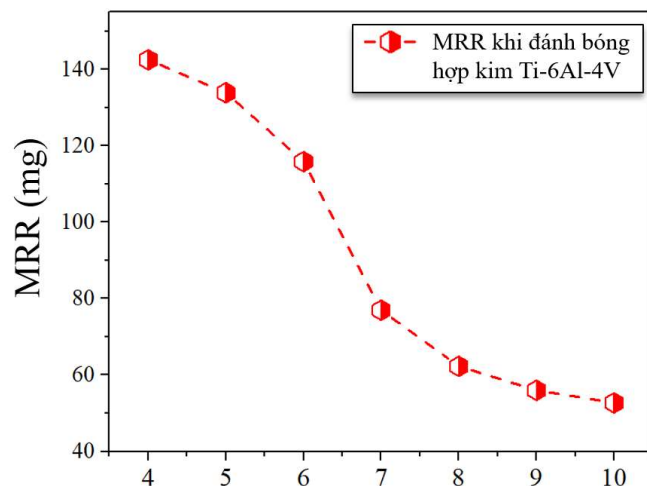
Theo Pourbaix [130] về mối quan hệ giữa dung dịch có nồng độ pH và hợp kim titanium, chất oxy hóa kết hợp với mức pH đóng vai trò quan trọng trong quá trình đánh bóng MRF. Trong quá trình hoàn thiện hợp kim Ti-6Al-4V bằng quy trình MRF, tác động của pH đến hiệu suất đánh bóng đã được nghiên cứu một cách có hệ thống. Dung dịch MRF được cấu tạo từ hạt từ tính Fe_3O_4 và hạt

mài SiO_2 với tỷ lệ 40% về thể tích, nước tinh khiết, và nồng độ pH được thiết lập trong khoảng từ 4 đến 10. Kết quả trình bày trong Hình 3.12a cho thấy khi pH tăng, tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công giảm. Đặc biệt ở mức pH đạt mức 10, khả năng loại bỏ vật liệu là thấp nhất khi đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V bằng MRF. Theo Pourbaix cũng chỉ ra rằng trong điều kiện axit, các sản phẩm phản ứng của hợp kim titanium tồn tại dưới dạng ion, có thể dẫn đến hiện tượng ăn mòn bề mặt phôi hợp kim titanium. Ngược lại, trong môi trường kiềm, titanium và hợp kim của nó trở nên thụ động nhờ sự hình thành các sản phẩm ổn định hơn như TiO_2 và Ti_2O_3 . Hơn nữa, nghiên cứu của Okawa và cộng sự [131] cho thấy quá trình oxy hóa của hợp kim titanium gia tăng ở pH cao. Khi pH tăng, một lớp màng oxit mỏng, bền và thụ động hình thành trên bề mặt hợp kim, ngăn chặn quá trình loại bỏ lượng dư vật liệu gia công.

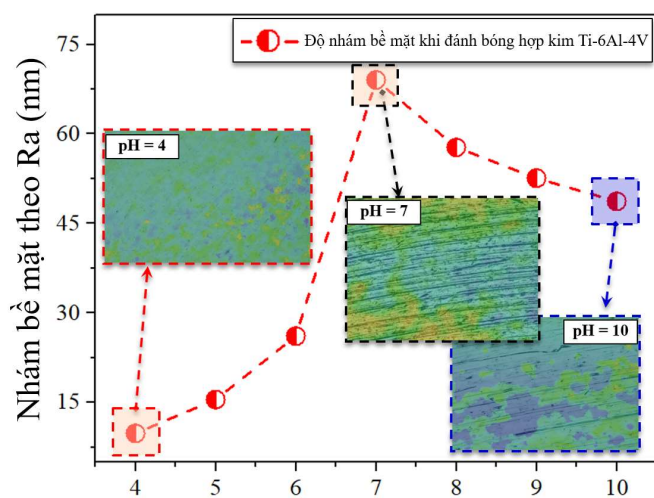
Mô tả trong Hình 3.12b cho thấy chất lượng bề mặt của phôi Ti-6Al-4V có xu hướng giảm khi pH tăng. Qua các kết quả thực nghiệm cho thấy khi pH đạt mức 4, chất lượng bề mặt đạt được là tốt nhất. Tuy nhiên, khi tăng lên mức pH = 7, số lượng vết xước trên bề mặt nhiều hơn đáng kể, dẫn đến chất lượng bề mặt thô hơn thu được. Khi tăng thêm natri hydroxit (NaOH) để đưa pH lên trên 7, có sự cải thiện nhẹ về chất lượng bề mặt, nhưng không đáng kể. Như minh họa trong Hình 3.12b, ở mức pH 10, bề mặt phôi xuất hiện nhiều vết xước cùng độ nhám lớn. Như vậy với quy trình đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V, trong môi trường axit với pH = 4, quy trình MRF đề xuất cho kết quả chất lượng bề mặt tốt nhất và tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công (MRR) cao.

Khi pH tăng đến 10, tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công giảm mạnh, mặc dù chất lượng bề mặt có phần cải thiện nhẹ so với pH 7. Ở mức pH cao, một lớp màng oxit bền hình thành trên bề mặt hợp kim titanium, giúp bảo vệ bề mặt khỏi các tác động tiêu cực trong quá trình đánh bóng, qua đó không có lợi cho quy trình đánh bóng MRF. Tuy nhiên, khi pH giảm xuống dưới 4, môi trường

trở nên có hại, vì vậy các nghiên cứu đều đặt giới hạn pH trong khoảng từ 4 đến 10 để cân bằng giữa hiệu suất đánh bóng và bảo vệ môi trường.



a) MRR theo giá trị pH



b) Độ nhám bề mặt theo giá trị pH

Hình 3.12 Hiệu suất đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V bởi dung dịch MRF theo độ pH khác nhau

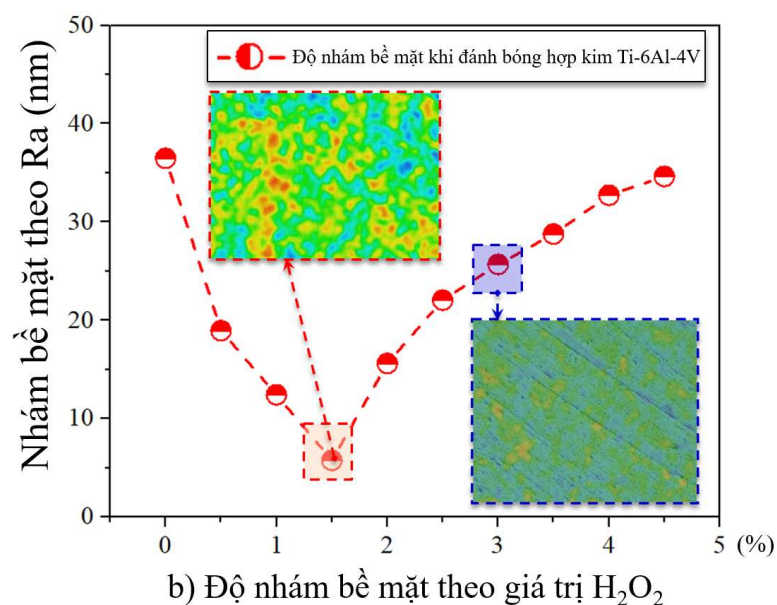
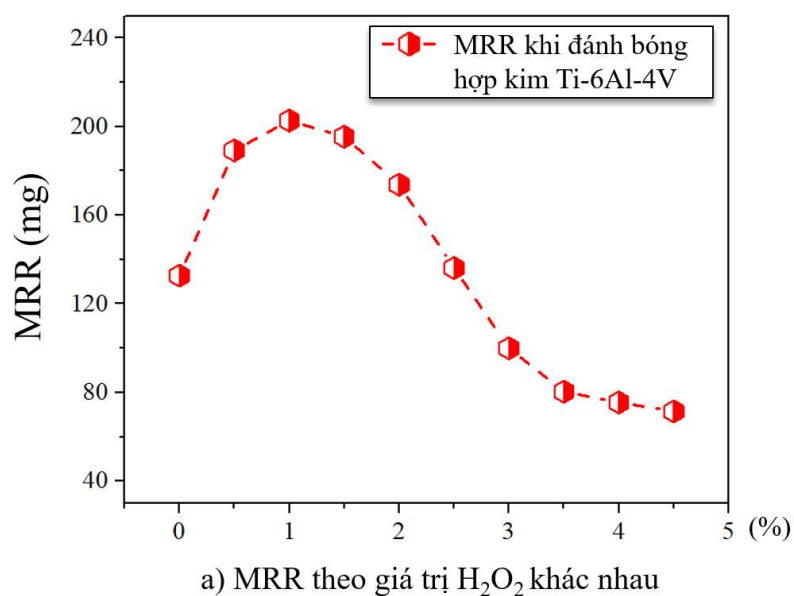
3.7. HIỆU SUẤT ĐÁNH BÓNG MRF HỢP KIM TI-6AL-4V THEO HÀM LƯỢNG CHẤT OXY HÓA H_2O_2

Các cuộc điều tra do Deng và cộng sự [130] thực hiện làm nổi bật sự tương tác giữa chất oxy hóa được sử dụng trong quy trình đánh bóng bề mặt phôi kim

loại. Sự tương tác này dẫn đến sự hình thành các bề mặt xốp hoặc hòa tan, dễ dàng bị loại bỏ bởi các hạt mài mòn. Trong quá trình kiểm tra động lực đánh bóng ảnh hưởng đến hợp kim Ti-6Al-4V do chất oxy hóa H_2O_2 , dung dịch MRF kết hợp 40% theo thể tích hạt mài và hạt từ tính $Fe_3O_4-SiO_2$ đã được tạo thành. Độ pH được duy trì ở mức 4 và các nồng độ khác nhau của chất oxy hóa H_2O_2 đã được đưa vào trong các chuỗi đánh bóng. Hình 3.13a và b minh họa chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu (MRR), cho thấy sự thay đổi trong MRR của hợp kim Ti-6Al-4V và chất lượng bề mặt tương ứng với các nồng độ chất oxy hóa H_2O_2 khác nhau.

Các phát hiện thực nghiệm được mô tả trong Hình 3.13a chỉ ra rằng việc tăng hàm lượng chất oxy hóa H_2O_2 làm tăng hiệu quả loại bỏ lượng dư vật liệu gia công, đạt đến giá trị lớn nhất tương ứng với mức thể tích 1%. Sau thời điểm này, tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công (MRR) trở nên ổn định và sau đó giảm dần khi hàm lượng chất oxy hóa H_2O_2 tiếp tục tăng. Cụ thể, khi không sử dụng H_2O_2 , khả năng loại bỏ vật liệu từ hợp kim Ti-6Al-4V đạt 132.7 mg. Khi thêm 1% H_2O_2 theo thể tích, khả năng loại bỏ vật liệu tăng mạnh, đạt mức cao nhất là 202,5 mg. Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng hàm lượng H_2O_2 lên 4.5%, khả năng loại bỏ vật liệu lại giảm xuống còn 71.3 mg.

Kết quả về nhám bề mặt, được minh họa trong Hình 3.13b, cho thấy mối quan hệ phức tạp giữa nhám bề mặt với nồng độ H_2O_2 . Ban đầu, khi tăng hàm lượng H_2O_2 , chất lượng bề mặt cải thiện đáng kể. Quá trình cải thiện này tiếp tục diễn ra từ từ cho đến khi đạt được nhám bề mặt nhỏ nhất tại nồng độ H_2O_2 tương ứng mức 1.5% theo thể tích, với độ nhám bề mặt đạt được $Ra = 6$ nm cho hợp kim Ti-6Al-4V.



Hình 3.13 Hiệu quả đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V theo nồng độ H_2O_2

Nếu tăng nồng độ H_2O_2 vượt quá 1.5% theo thể có thể quan sát thấy nhám bề mặt tăng lên, biểu hiện bằng sự xuất hiện của các vết xước rõ rệt, như minh họa trong Hình 3.13b khi nồng độ H_2O_2 đạt mức 3% thể tích. Hiện tượng này được cho là do quá trình oxy hóa quá mức, do nồng độ H_2O_2 tăng cao, ảnh hưởng xấu đến chất lượng bề mặt. Nghiên cứu bởi Dai và cộng sự [132] đã chứng minh

sự xuất hiện của lớp màng oxit dày đặc và sự phát triển nhanh chóng của lớp oxy hóa khi nồng độ chất oxy hóa vượt quá ngưỡng. Các mảnh oxit còn sót lại trong môi trường đánh bóng, trên miếng Pad đánh bóng hoặc trong hỗn hợp MRF, có thể gây ra hiện tượng cào xước trên bề mặt phôi. Điều quan trọng là phôi Ti-6Al-4V đạt được chất lượng bề mặt và MRR cao nhất ở nồng độ H_2O_2 1,5% thể tích. Các thông số tối ưu để đạt được chất lượng bề mặt phôi Ti-6Al-4V cao nhất khi sử dụng đánh bóng bởi dung dịch MRF đề xuất và được tóm tắt trong Bảng 3.8.

Bảng 3.8 Dung dịch MRF tối ưu trong đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V

Loại MRF	Loại Axit	Chất oxy hóa	Hạt mài	pH
MRF -1	HOOC-CH ₂ -CH(OH)-COOH	1.5 %	Fe ₃ O ₄ -SiO ₂	4

Assis và cộng sự [133] đã nghiên cứu quy trình đánh bóng điện hóa kéo dài trong 90 phút, trong khi phương pháp đánh bóng sử dụng mô hình MRF đề xuất chỉ cần 80 phút. Các nghiên cứu trước đây thường yêu cầu sử dụng etanol để làm sạch bề mặt sau khi đánh bóng [123]. Tuy nhiên, với mô hình MRF đề xuất dành cho vật liệu Ti-6Al-4V, không cần đến bước làm sạch này. Dung dịch MRF thân thiện với môi trường bao gồm hạt từ tính và hạt mài Fe₃O₄-SiO₂, axit malic, nước tinh khiết và chất oxy hóa H₂O₂. Đặc biệt, axit malic, một thành phần tự nhiên có trong trái cây và được sử dụng phổ biến trong y tế và thực phẩm, được chọn làm thành phần chính thiết lập pH mức 4 trong hỗn hợp đánh bóng. Chất oxy hóa H₂O₂, thường dùng trong y tế để khử trùng, sẽ phân hủy thành nước và oxy theo thời gian khi tiếp xúc với không khí. Thành phần hạt mài chính SiO₂, có nguồn gốc từ thạch anh tự nhiên, hình thành trong lớp vỏ trái đất, kết hợp với các hạt từ tính Fe₃O₄ chiết xuất từ quặng sắt, tạo ra hỗn hợp đánh bóng thân thiện với môi trường. Tất cả các thành phần trong dung dịch MRF đều tự nhiên và an toàn cho môi trường. Khi tiếp xúc dung dịch MRF, ngón tay chỉ tạm thời có màu

vàng và sẽ trở lại bình thường sau khi rửa bằng nước tinh khiết. Độ pH và hàm lượng chất oxy hóa trong quy trình MRF có thể được điều chỉnh linh hoạt, cho phép tối ưu hóa quy trình đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V bằng màng Halbach tinh tiến khử hồi.

Các phân tích trên đây cho thấy rằng hiệu suất đánh bóng hợp kim Ti với dung dịch MRF chịu ảnh hưởng lớn bởi sự hình thành lớp màng oxit trên bề mặt, đồng thời được điều chỉnh bởi nồng độ H_2O_2 và pH. Dựa trên các nghiên cứu hiện có và kết quả thực nghiệm đã trình bày, cơ chế đánh bóng của hợp kim Ti-6Al-4V trong dung dịch MRF chủ yếu liên quan đến sự thay đổi của hàm lượng chất oxy hóa H_2O_2 và giá trị pH. Trong quá trình đánh bóng bằng MRF, các lớp oxit khác nhau như TiO_2 , Ti_2O_3 , TiO và TiO_2-H_2O hình thành trên bề mặt hợp kim đóng vai trò quan trọng trong các quy trình đánh bóng. Trong đó theo các nghiên cứu [134, 135] các lớp oxit ngoài cùng chủ yếu bao gồm TiO_2 và TiO_2-H_2O .

Khi thực hiện quá trình đánh bóng với pH thiết lập ở mức 4 và không có H_2O_2 , khả năng hình thành lớp oxit bị hạn chế. Nghiên cứu bởi Wang và cộng sự [134] chỉ ra rằng trong các quá trình đánh bóng động, thời gian tiếp xúc giữa hợp kim titanium và dung dịch đánh bóng chỉ từ 1-10 ms, và thời gian tương tác thực tế của hạt mài với hợp kim titanium trong mỗi lần va chạm là dưới 10 μs . Với khoảng thời gian ngắn như vậy, các phản ứng trên lớp bề mặt chưa kịp hình thành lớp màng oxit, dẫn đến sự tương tác không hiệu quả của hạt mài mòn và làm giảm tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công (MRR). Hơn nữa, lớp oxit được hình thành trong điều kiện này thường mỏng và xốp, làm giảm chất lượng bề mặt.

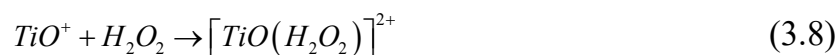
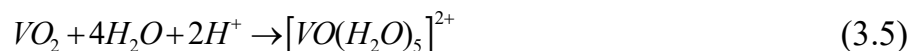
Khi bổ sung H_2O_2 vào dung dịch, màng oxit sẽ nhanh chóng hình thành trên bề mặt hợp kim Ti, giúp hạt mài hoạt động hiệu quả hơn, qua đó tăng khả năng

loại bỏ vật liệu và cải thiện chất lượng bề mặt. Tuy nhiên, khi nồng độ H_2O_2 tăng lên 3.5% theo thể tích, tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công lại giảm, điều này có thể do sự phát triển quá nhanh của màng oxit trên bề mặt, làm hạt mài khó xuyên qua màng oxit để loại bỏ lượng dư vật liệu gia công. Ngoài ra, một lượng nhỏ oxit có thể tích tụ trong bùn MRF và trên tấm đánh bóng, khiến chất lượng bề mặt giảm khi nồng độ H_2O_2 vượt quá 1.5% theo thể tích.

Khi áp dụng quy trình đánh bóng MRF đề xuất, các lớp oxit TiO_2 , VO_2 và Al_2O_3 lần lượt được hình thành trên bề mặt phôi Ti-6Al-4V, tương ứng với các nguyên tố Ti, V và Al [130]. Hỗn hợp MRF thân thiện với môi trường tạo ra các phản ứng hóa học như sau:



Các phản ứng hóa học liên quan đến quá trình ăn mòn do H_2O_2 và axit malic (MH_2) [136] tác động lên bề mặt phôi Ti-6Al-4V được giải thích thông qua các phương trình phản ứng sau:



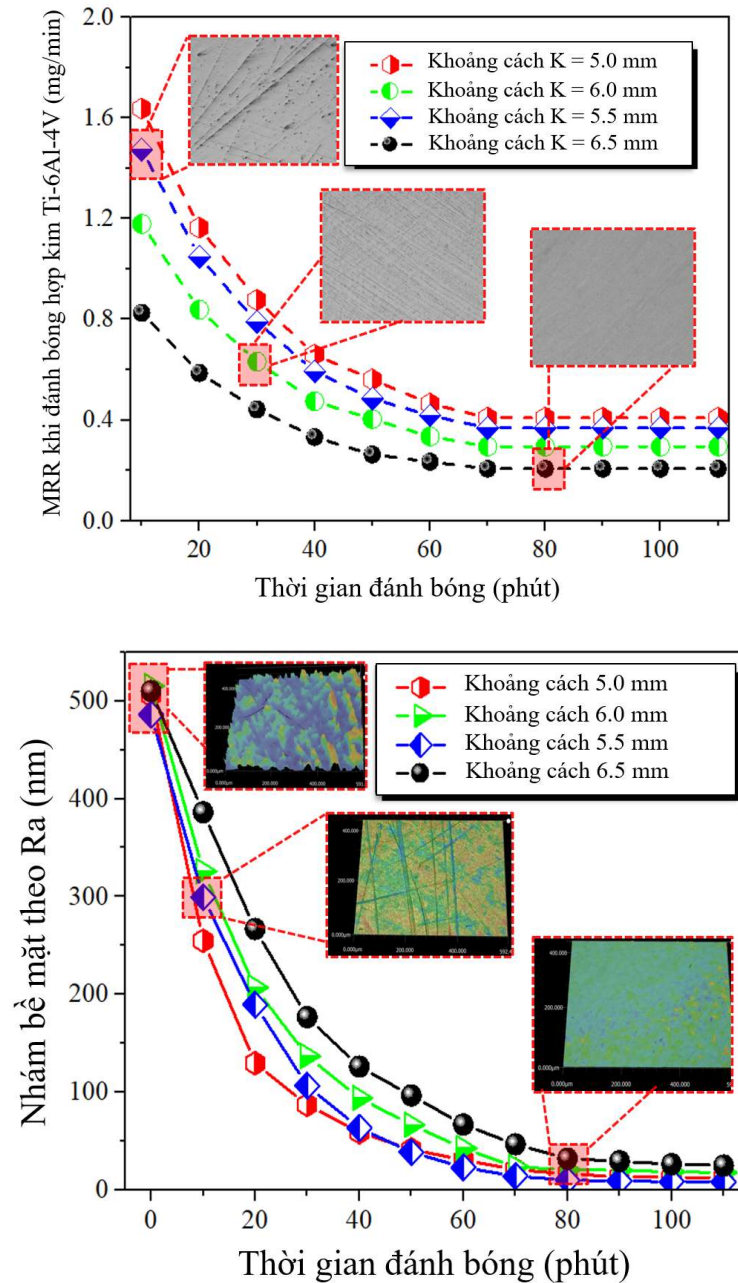
3.8. KHẢ NĂNG ĐÁNH BÓNG MRF VỚI MẢNG HALBACH CẢI TIẾN

Khả năng đánh bóng MRF được đánh giá dựa trên chất lượng bề mặt và tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công theo thời gian đánh bóng như mô tả trên Hình 3.14. Bề mặt phôi Ti-6Al-4V ban đầu có độ nhám khoảng 500 nm do quá trình mài. Các gợn sóng lớn và sâu, gây ra bởi quá trình mài, sẽ nhanh chóng được loại bỏ trong 10 phút đầu của quá trình đánh bóng MRF. Khi thời gian đánh bóng tiếp tục tăng, bề mặt trở nên mịn hơn, khiến tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công (MRR) giảm dần. Điều này là do diện tích tiếp xúc giữa phôi và hạt mài tăng lên, dẫn đến hiệu quả loại bỏ lượng dư vật liệu gia công giảm. Trong các thí nghiệm, phôi Ti-6Al-4V được đánh bóng với khoảng cách đánh bóng 5 mm (tương ứng với khoảng cách đánh bóng 1 mm), cho kết quả loại bỏ lượng dư vật liệu gia công là 1.62 mg/phút. Khi khoảng cách mài tăng lên 6.5 mm (tương ứng với khoảng cách đánh bóng 2.5 mm), tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công giảm xuống còn 0.81 mg/phút. Điều này cho thấy rằng hiệu suất đánh bóng khi sử dụng khoảng cách đánh bóng 1 mm cao gấp đôi.

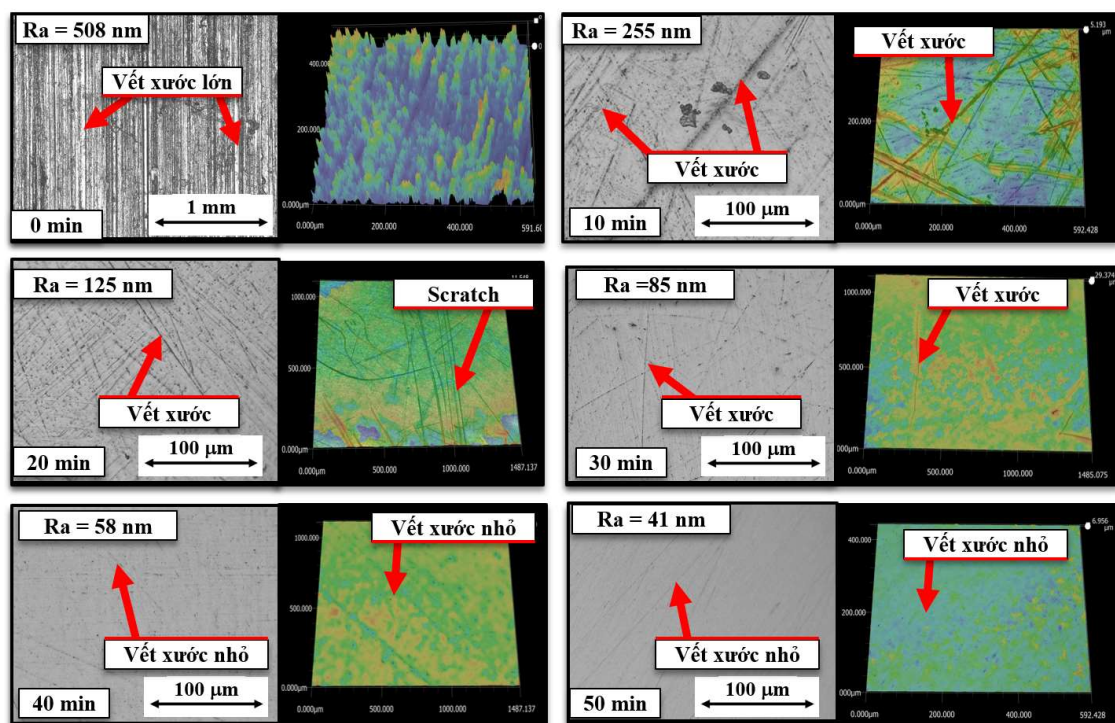
Sau 30 phút đánh bóng, chất lượng bề mặt cải thiện rõ rệt so với các nghiên cứu trước đây của nghiên cứu sinh về quy trình đánh bóng sử dụng hạt mài mòn Al_2O_3 cùng bột sắt cacbonyl trong dung dịch dầu thân thiện với môi trường [130]. Trong 40 phút đầu tiên, khả năng loại bỏ vật liệu cao, nhưng khi thời gian đánh bóng vượt qua 70 phút, hiệu suất loại bỏ giảm dần.

Độ nhám bề mặt giảm nhanh trong vòng 40 phút đầu và dần tới trạng thái bão hòa khi thời gian đánh bóng đạt 80 phút. Do đó, trong các tiến trình thí nghiệm đánh bóng MRF tiếp theo sẽ được thiết lập với thời gian 80 phút. Bên cạnh đó bề mặt phôi Ti-6Al-4V sau khi đánh bóng đạt chất lượng vượt trội so với các nghiên cứu trước đó [130]. Sự cải tiến mảng Halbach, cùng với đó dung dịch MRF thân thiện sử dụng hạt mài SiO_2 , hạt từ tính Fe_3O_4 , kết hợp với chất

oxy hóa H_2O_2 và axit malic, đã nâng cao đáng kể hiệu quả của quá trình đánh bóng MRF.



Hình 3.14 Khả năng bóc tách vật liệu và chất lượng bề mặt của phôi Ti-6Al-4V trong các khoảng thời gian đánh bóng khác nhau



Hình 3.15 Hình thái bề mặt của phôi Ti-6Al-4V theo thời gian đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi

Những thay đổi về hình thái bề mặt phôi Ti-6Al-4V theo thời gian được thể hiện trong Hình 3.15. Các vết lõm sâu và lỗi dập bề mặt do quá trình mài ban đầu để lại dần dần bị loại bỏ, thay vào đó là bề mặt có độ nhám được cải thiện rõ rệt. Bề mặt ban đầu có độ nhám khoảng 500 nm và được đánh bóng ở khoảng cách đánh bóng 5 mm. Thời gian đánh bóng cần thiết để đạt được độ nhám bề mặt lần lượt là 255, 125, 85, 58 và 41 nm tương ứng với 10, 20, 30, 40 và 50 phút. Sau 80 phút đánh bóng, bề mặt xuất hiện các vết xước và rất nhỏ, khó quan sát được cùng với bề mặt dạng gương với độ nhám Ra đạt 7 nm. Qua đó cho thấy với mô hình đánh bóng MRF với mảng Halbach cải tiến hiệu quả đánh bóng cao, cùng nhám bề mặt đạt được cấp độ nanomet.

3.9. KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Nội dung chương 3 trình bày các tiến trình thực nghiệm đơn yếu tố nhằm khảo sát quy trình đánh bóng MRF thân thiện môi trường cho hợp kim Ti-6Al-4V.

Dung dịch đánh bóng từ tính trên nền hạt mài $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$, axit malic và chất oxy hóa H_2O_2 được sử dụng trong các quy trình thực nghiệm. Ảnh hưởng của độ pH và nồng độ H_2O_2 đến hiệu suất đánh bóng đã được khảo sát chi tiết. Kết quả cho thấy việc bổ sung 1% H_2O_2 theo thể tích giúp khả năng loại bỏ vật liệu tăng mạnh, đạt giá trị cực đại 202,5 mg, chứng minh vai trò xúc tiến của H_2O_2 trong cơ chế đánh bóng. Đặc biệt, tại nồng độ H_2O_2 1,5% trong môi trường dung dịch có pH = 4, quá trình đánh bóng không chỉ đạt hiệu suất loại bỏ vật liệu cao mà còn đem lại chất lượng bề mặt được cải thiện rõ rệt.

Sau 80 phút đánh bóng, bề mặt xuất hiện các vết xước và rỗ rất nhỏ cùng với bề mặt dạng gương với độ nhám Ra đạt 7 nm. Qua đó cho thấy với mô hình đánh bóng MRF với mảng Halbach cải tiến hiệu quả đánh bóng cao, cùng nhám bề mặt đạt được cấp độ nanomet.

CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

4.1. THIẾT LẬP THỬ NGHIỆM KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH LỰC CẮT

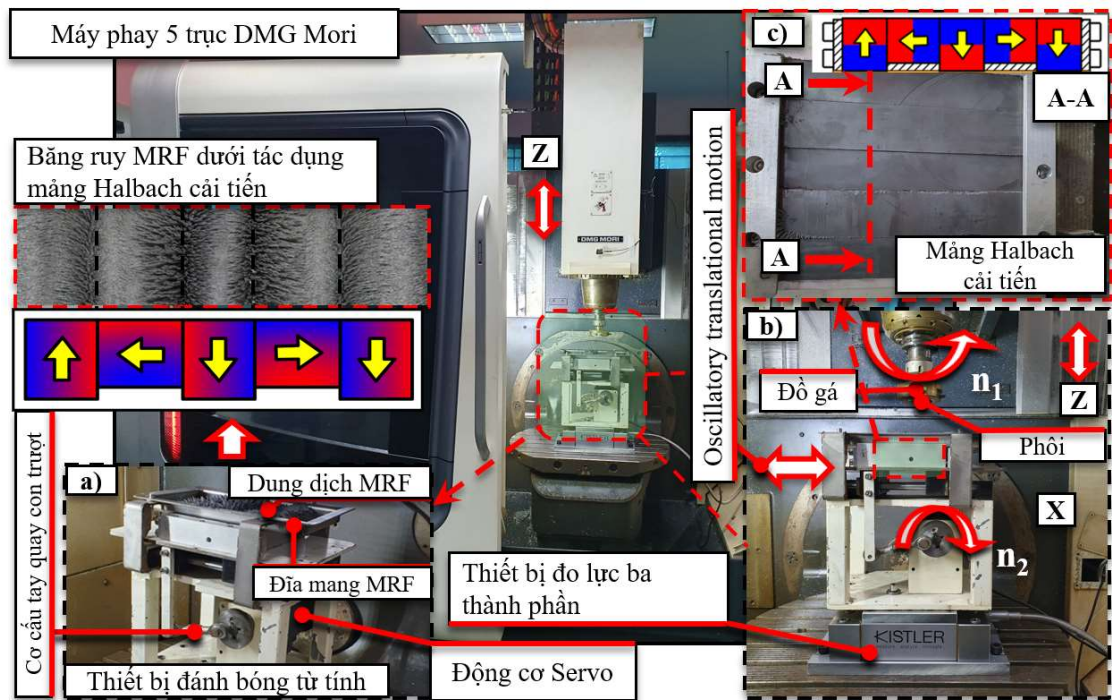
Hình 4.1 mô tả thấy thiết lập thử nghiệm đánh bóng MRF sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi được điều khiển bởi cơ cấu tay quay thanh trượt. Các thí nghiệm đánh bóng với độ nhám ban đầu khoảng 500 nm với kích thước phôi hợp kim Ti-6Al-4V 32×32×15 mm. Trong các thí nghiệm này, thể tích MRF được đặt mức 400 ml, bao gồm các hạt từ tính Fe_3O_4 (kích thước 1 μm , 36% theo thể tích), các hạt mài SiO_2 (kích thước 300 nm, 8% theo thể tích) và 2% H_2O_2 theo thể tích với axit malic được điều chỉnh đến độ pH là 4. Các tín hiệu lực được đo bằng cảm biến lực Kisler 9139AA có độ phân giải 0,01 N, được lắp bên dưới thiết bị đánh bóng MRF. Các thành phần lực cắt F_T và F_N , được ghi lại theo thời gian thực với độ chính xác 0.01 N. Khả năng loại bỏ vật liệu được đo bằng cân có độ chính xác cao với độ chính xác 0.01 mg, được xác định theo công thức sau:

$$MRR = \frac{\Delta M \times e^6}{A \rho T} \quad (4.1)$$

Với mật độ ρ của hợp kim Ti-6Al-4V, khối lượng của phôi Ti-6Al-4V trước và sau khi đánh bóng lần lượt là M_1 và M_2 . Khối lượng phôi thay đổi trước và sau khi đánh bóng là ΔM , được tính là $\Delta M = M_1 - M_2$. Thời gian đánh bóng là T và diện tích bề mặt của phôi khi đánh bóng là A .

Thiết lập thử nghiệm được thiết kế để xác định các tham số ε và θ theo các thông số kỹ thuật được nêu trong phương trình (2.27). Dựa trên dữ liệu thử nghiệm được trình bày trong Bảng 4.1, các giá trị của ε và θ được xác định lần lượt là 0.2508 và 0.5128. Các thí nghiệm được tiến hành trong các điều kiện khác nhau để xác minh độ tin cậy của các mô hình F_T và F_N được đề xuất bao gồm: thể tích MRF, khoảng cách làm việc (K) và tốc độ quay của phôi. Nhiều thông

số công nghệ khác nhau đã được lựa chọn và các mức tương ứng của chúng được trình bày trong Bảng 4.2.



Hình 4.1 Thiết bị đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi

Hình 4.2 cho thấy các giá trị đo được của F_T và F_N trong quá trình đánh bóng vật liệu Ti-6Al-4V bằng các hạt từ tính và hạt mài mòn Fe_3O_4 và SiO_2 . Trong các quá trình đánh bóng sử dụng mảng Halbach được dẫn động bởi cơ cấu tay quay thanh trượt, có thể thấy cả lực pháp tuyến F_T và lực tiếp tuyến F_N đều tăng khi số lần di chuyển kép tăng từ 15 đến 25. Lực pháp tuyến F_N là kết quả của áp suất hạt từ trực tiếp tác dụng lên bề mặt phôi, trong khi lực tiếp tuyến F_T chủ yếu phát sinh từ chuyển động trượt của các hạt trên bề mặt. Việc tăng số lần di chuyển kép làm tăng lực tương tác giữa băng MRF và bề mặt gia công, do đó làm tăng lực tiếp tuyến F_T . Cơ cấu tay quay thanh trượt tạo ra chuyển động tịnh tiến khứ hồi cho mảng Halbach, từ đó khuếch đại tần số và cường độ tương tác giữa các hạt từ tính, hạt mài và bề mặt gia công.

Bảng 4.1 Các thông số thực nghiệm xác định hệ số ε và θ

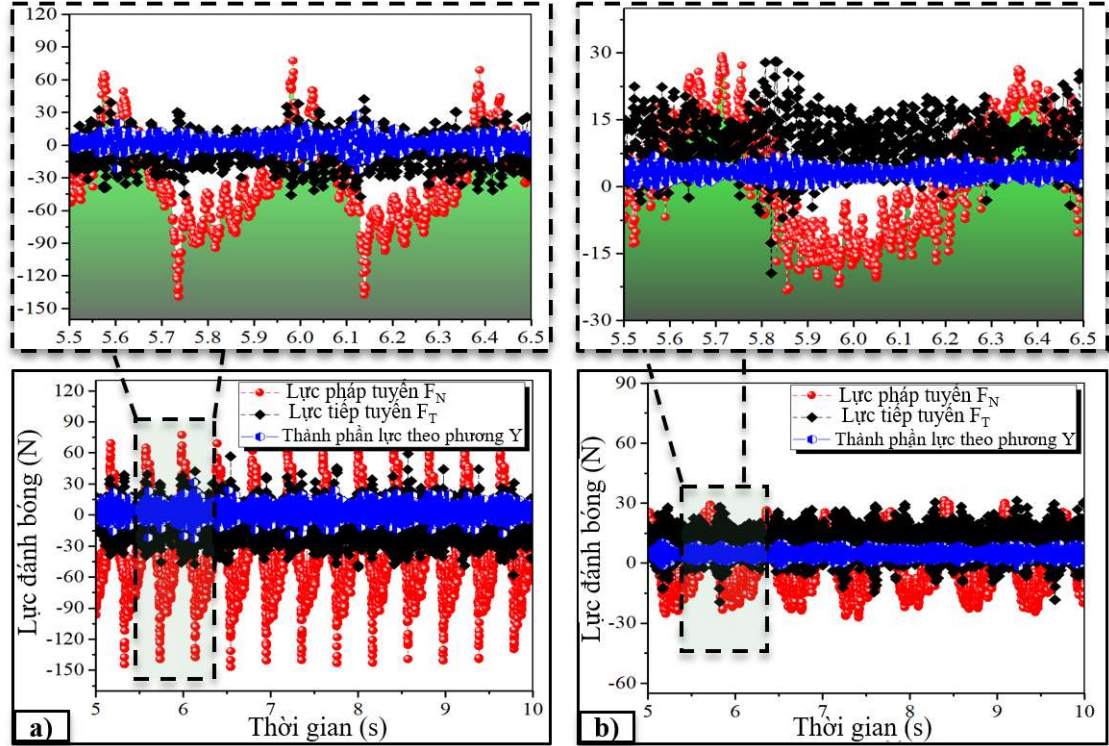
Số TT	Thông số công nghệ			20 hành trình kép của mảng Halbach			30 hành trình kép của mảng Halbach		
	Thể tích MRF (ml)	Tốc độ phôi (vòng/phút)	Khoảng cách làm việc K (mm)	F_T (N)	F_N (N)	MRR (mg/h)	F_T (N)	F_N (N)	MRR (mg/h)
1	250	200	1	27.8	16.4	85.4	34.2	20.4	100.6
2	450	200	1	38.2	23.2	114.2	48.1	28.3	139.5
3	600	200	1	45.9	28.0	136.3	57.1	35.0	165.7
4	450	400	1.4	32.9	25.7	108.5	40.7	31.7	132.2
5	450	400	1.8	28.5	17.9	90.8	35.8	22.5	117.6
6	450	400	2.2	22.9	15.8	79.4	28.1	19.7	93.5
7	450	250	1.4	26.2	16.9	84.2	33.6	20.8	105.1
8	450	450	1.4	29.1	18.0	94.3	35.2	21.9	114.3
9	450	650	1.4	31.4	19.5	105.3	39.4	25.1	129.5

Bảng 4.2 Kiểm chứng thực nghiệm các mô hình lực đánh bóng F_T và F_N

Thông số công nghệ	Thứ tự thí nghiệm					
	1	2	3	4	5	6
Thể tích MRF (ml)	200	225	250	275	300	325
Tốc độ phôi (vòng/phút)	200	300	400	500	600	700
Khoảng cách làm việc K (mm)	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2

Khi số hành trình kép tăng lên, chuyển động này liên tục nén các hạt từ tính lên bề mặt phôi Ti-6Al-4V, dẫn đến sự gia tăng tương ứng của lực pháp tuyến F_N với mỗi chuyển động của mảng Halbach. Ngoài ra, lực theo hướng Y

rất nhỏ so với F_N và không thay đổi nhiều trong suốt quá trình đánh bóng, qua đó cho phép bỏ qua ảnh hưởng của nó trong các quy trình khảo sát.

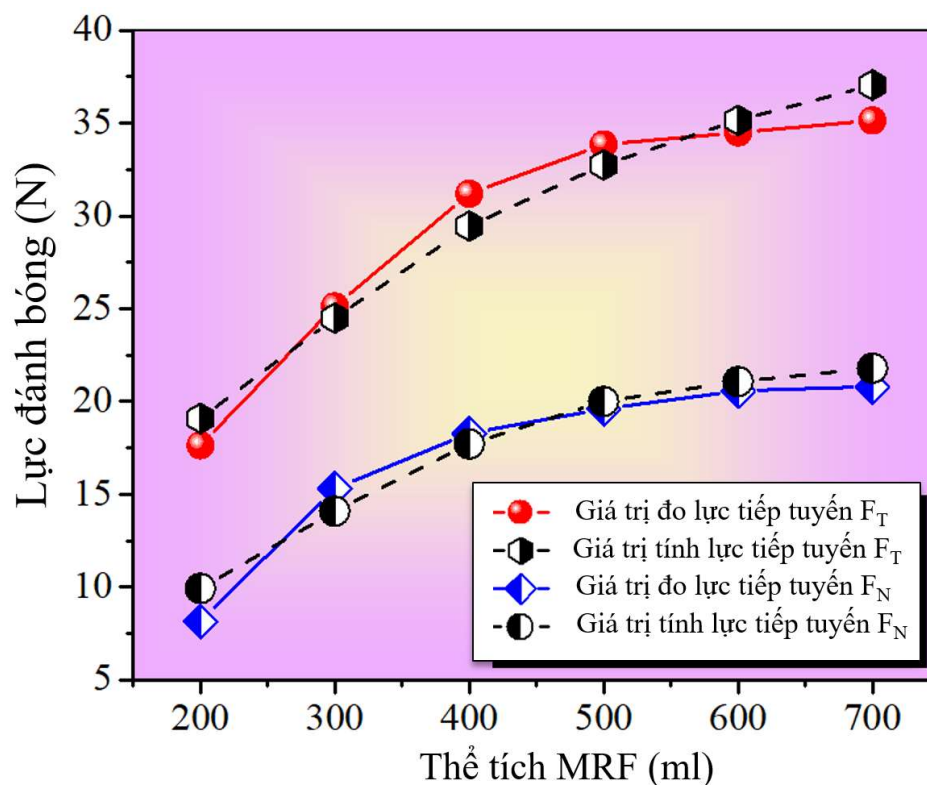


Hình 4.2 Thành phần lực F_T và F_N thay đổi theo hành trình kép của mảng Halbach: (a) 25 hành trình kép mỗi phút, (b) 15 hành trình kép mỗi phút

4.2. LỰC TIẾP TUYẾN VÀ PHÁP TUYẾN TRONG QUY TRÌNH ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH SỬ DỤNG MẢNG HALBACH TÍNH TIẾN KHÚC HỒI

Hình 4.3 minh họa tác động của thể tích dung dịch MRF lên các thành phần lực F_T và F_N trong quá trình đánh bóng sử dụng mảng Halbach chuyển động qua lại. Kết quả cho thấy rằng việc tăng thể tích MRF, tương ứng với hàm lượng hạt từ cao hơn, dẫn đến tăng cả F_T và F_N . Khi thể tích MRF tăng, nhiều chuỗi hạt từ hơn tham gia vào quá trình đánh bóng, tạo ra các dải MRF dày đặc với độ

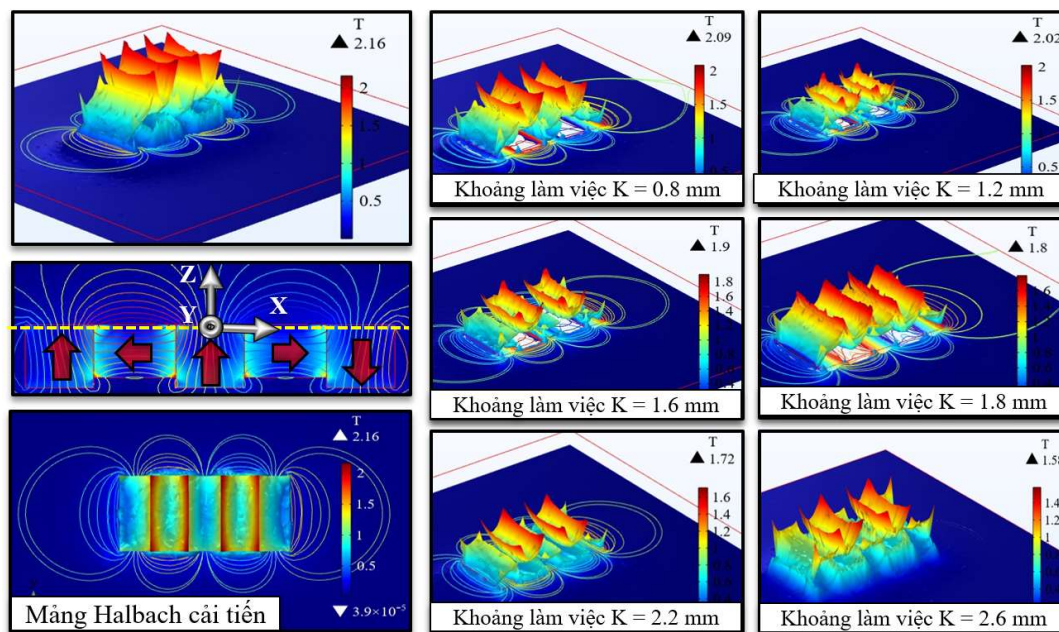
cứng cao hơn. Độ cứng cứng bằng ruy MRF cùng hiệu quả cắt tăng lên tạo ra lực đánh bóng cao hơn khi có chuyển động tương đối với phôi Ti-6Al-4V.



Hình 4.3 Kết quả xác định lực đánh bóng F_T và F_N theo lý thuyết và thực nghiệm khi thay đổi thể tích dung dịch MRF

Mảng Halbach cải tiến được áp dụng cho quá trình đánh bóng MRF với giai đoạn đầu được thiết lập khi tăng thể tích MRF cho thấy gia tăng nhanh chóng cả hai thành phần lực pháp tuyến và tiếp tuyến. Sự gia tăng này đặc biệt rõ rệt khi đạt đến thể tích 500 ml. Ngoài điểm này, việc tăng thêm thể tích MRF sẽ dẫn đến lực cắt tăng nhỏ, qua đó cho thấy thể tích dung dịch MRF đạt mức 500 ml sẽ tiến tới trạng thái bão hòa. Hành vi này có thể là do thực tế với các thể tích lớn hơn 500 ml, mật độ và độ cứng của dải MRF đạt đến mức mà thể tích MRF bổ sung có đóng góp tối thiểu vào lực tương tác. Kết quả thử nghiệm phù hợp chặt chẽ với các dự đoán lý thuyết, chứng minh tính khả thi của mô hình lực

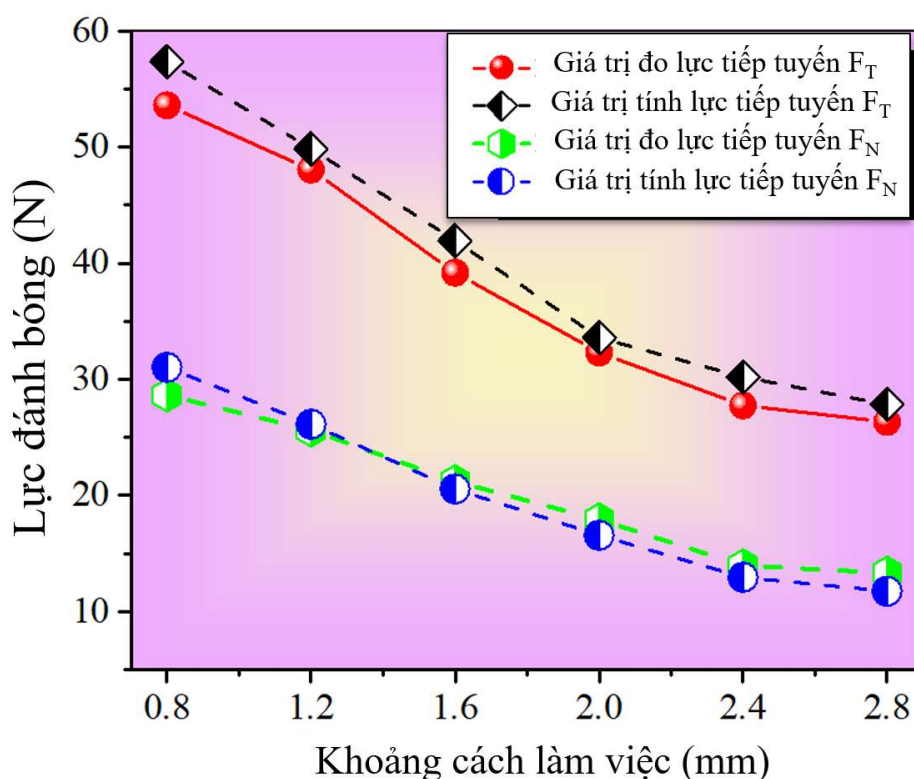
đánh bóng được đề xuất. Sự phù hợp này cho thấy tiềm năng cũng như độ tin cậy nhằm áp dụng tối ưu hóa khả năng loại bỏ vật liệu và chất lượng bề mặt trong các quy trình đánh bóng MRF.



Hình 4.4 Cường độ từ trường thay đổi theo khoảng cách làm việc K

Tác động của khoảng cách làm việc đến lực đánh bóng F_T và F_N bị ảnh hưởng bởi độ cứng của ruy băng MRF trong quá trình đánh bóng. Độ cứng của ruy băng MRF ảnh hưởng trực tiếp đến bề mặt phôi Ti-6Al-4V và tác động trực tiếp đến thành phần lực F_T và F_N trong quá trình đánh bóng. Độ cứng của ruy băng MRF phụ thuộc vào cường độ từ trường ở vùng đánh bóng. Như minh họa trong Hình 4.4, việc thay đổi khoảng cách làm việc sẽ dẫn đến các cường độ từ trường khác nhau tác động lên băng ruy MRF. Khi tăng khoảng cách làm việc sẽ dẫn đến giảm lực từ, do đó làm giảm lực tác dụng lên phôi do độ cứng của ruy băng MRF giảm như minh họa trong Hình 4.5. Hình 4.6 mô tả tác động của việc thay đổi tốc độ phôi lên các thành phần lực đánh bóng F_T và F_N . Dữ liệu chỉ ra rằng việc tăng tốc độ phôi sẽ tăng cường chuyển động tương đối giữa phôi và băng ruy MRF đánh bóng, do đó làm tăng lực đánh bóng.

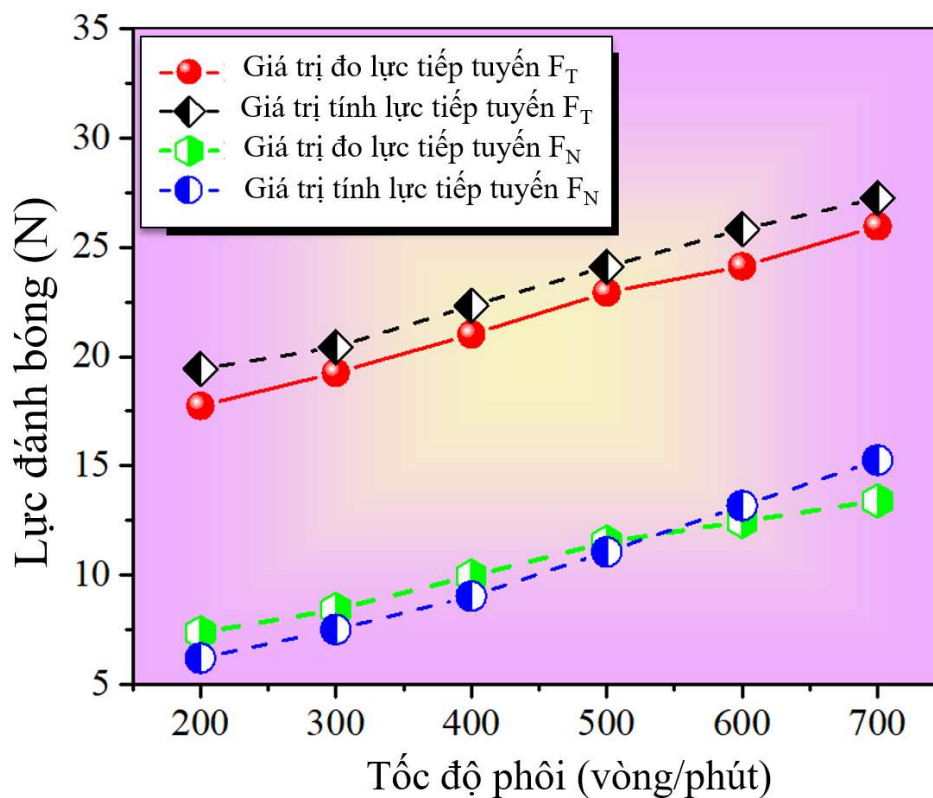
Trong quy trình đánh bóng được phát triển với mảng Halbach chuyển động tịnh tiến khứ hồi, cả hai thành phần lực cắt F_T và F_N , đều cho thấy sự gia tăng khi thể tích dung dịch MRF, số hành trình kép của mảng Halbach và tốc độ phôi tăng, cũng như giảm khoảng cách làm việc.



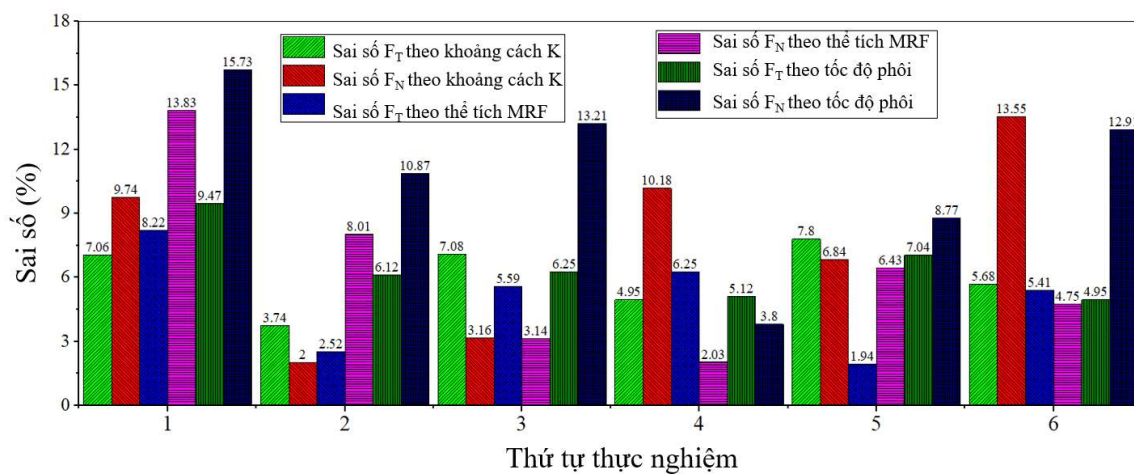
Hình 4.5 Lực đánh bóng F_T và F_N thay đổi theo khoảng cách làm việc K

Kết quả thực nghiệm cho thấy các thành phần lực F_T và F_N từ mô hình lý thuyết phù hợp chặt chẽ với dữ liệu thực nghiệm khi các thông số công nghệ trong mảng Halbach tịnh tiến thay đổi trong quá trình đánh bóng MRF. Hình 4.7 cho thấy sự khác biệt nhỏ hơn 16% giữa mô hình lực đề xuất và kết quả thực nghiệm để xác định F_T và F_N , chứng minh tính khả thi của mô hình đề xuất. Sự thống nhất chặt chẽ này trong quá trình đánh bóng với mảng Halbach tịnh tiến cho thấy các thành phần lực thu được là đáng tin cậy, đảm bảo tính nhất quán giữa các dự đoán lý thuyết và phát hiện thực nghiệm. Các giá trị lực pháp tuyến,

cũng như các lực tiếp tuyến từ kết quả lý thuyết và thực nghiệm, được xác định bằng cách xác định sai số giữa lý thuyết và thực nghiệm.



Hình 4.6 Lực đánh bóng F_T và F_N thay đổi theo tốc độ phôi



Hình 4.7 Sai số lực F_T và F_N giữa kết quả đánh bóng thực nghiệm và lý thuyết

4.3. MÔ HÌNH LOẠI BỎ VẬT LIỆU TRONG ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH SỬ DỤNG MẢNG HALBACH TỊNH TIẾN KHỨ HỒI

Quá trình đánh bóng MRF đề xuất sử dụng mảng Halbach tịnh tiến liên quan đến việc sử dụng các hạt từ tính Fe_3O_4 , các hạt mài SiO_2 , axit malic và chất oxy hóa H_2O_2 . Quá trình này kết hợp các hiệu ứng từ tính và phản ứng hóa học để tạo điều kiện loại bỏ lớp bề mặt phôi Ti-6Al-4V thông qua tác động chuyển động qua lại của dải băng ruy MRF. Cơ chế chính trong quá trình đánh bóng từ tính này là tạo ra một từ trường mạnh ở vùng đánh bóng. Cơ cấu tay quay thanh trượt được thiết lập để tạo ra chuyển động qua lại. Từ trường tác dụng lực cơ học lên các hạt từ tính, sau đó hạt từ tính giữ các hạt mài, tạo ra lực đánh bóng loại bỏ các lớp mỏng của vật liệu gia công khi có chuyển động tương đối với phôi. Dưới ảnh hưởng của mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi, các dải MRF liên tục được làm mới nhằm tạo ra chuyển động tuần hoàn, đưa các hạt từ tính và mài mới tiếp xúc với bề mặt phôi Ti-6Al-4V trong các quy trình đánh bóng, do đó loại bỏ hiệu quả các lớp vật liệu rất mỏng trên bề mặt phôi. Ngoài ra, chuyển động qua lại của băng ruy MRF làm tăng đáng kể các phản ứng hóa học trên bề mặt phôi, kết hợp với tốc độ tương đối giữa phôi và băng MRF, qua đó hiệu quả loại bỏ lượng dư vật liệu gia công được cải thiện. Các kết quả, như thể hiện trong Bảng 4.2, chỉ ra rằng tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công tăng lên khi tốc độ của mảng Halbach tịnh tiến tăng, được thiết lập bởi hành trình kép của cơ cấu tay quay thanh trượt tăng lên. Khả năng loại bỏ vật liệu tỷ lệ thuận với các thành phần lực pháp tuyến (F_N), như được mô tả bởi phương trình Preston như mô tả sau:

$$MRR_N = \frac{\Delta M \times e^6}{A \rho T} = k_{PN} \times F_N \times V \quad (4.2)$$

Hệ số k_{PN} , chịu ảnh hưởng của các yếu tố như kích thước hạt, tính chất từ, đặc điểm phôi, nhiệt độ và các biến số khác được gọi là hệ số đánh bóng Preston. V biểu thị tốc độ giữa băng MRF và phôi.

Các nghiên cứu của Li và cộng sự [137] cho thấy lực tiếp tuyến có tác động lớn hơn đến khả năng loại bỏ vật liệu so với thành phần lực pháp tuyến. Tại thời điểm này, mô hình cho khả năng loại bỏ vật liệu (MRR) được mô tả bằng phương trình:

$$MRR_T = k_{PT} \times F_T \times V \quad (4.3)$$

Như đã chứng minh trước đây, khả năng loại bỏ vật liệu chịu ảnh hưởng của cả F_T và F_N . Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu có xu hướng bỏ qua các tác động kết hợp của các thành phần này. Một cuộc kiểm tra toàn diện về quy trình đánh bóng cho phôi Ti-6Al-4V sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi và mô hình loại bỏ lượng dư vật liệu gia công có tính đến cả các thành phần lực tiếp tuyến và lực pháp tuyến vẫn còn thiếu trong các nghiên cứu trước đây. Để giải quyết khoảng trống này, một mô hình được đề xuất dựa trên cả hai thành phần lực F_T và F_N được thiết lập nhằm xác định khả năng loại bỏ vật liệu. Mô hình này tính đến ảnh hưởng của cả hai thành phần lực đối với tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công (MRR), như được đề xuất trong mô hình đánh bóng với mảng Halbach đề xuất cho hợp kim Ti-6Al-4V và được xác định theo công thức sau:

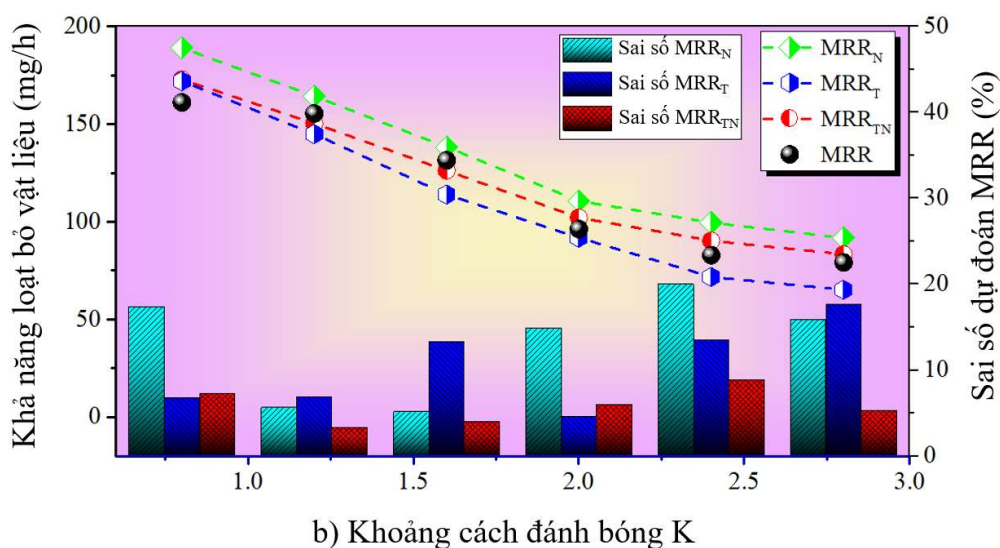
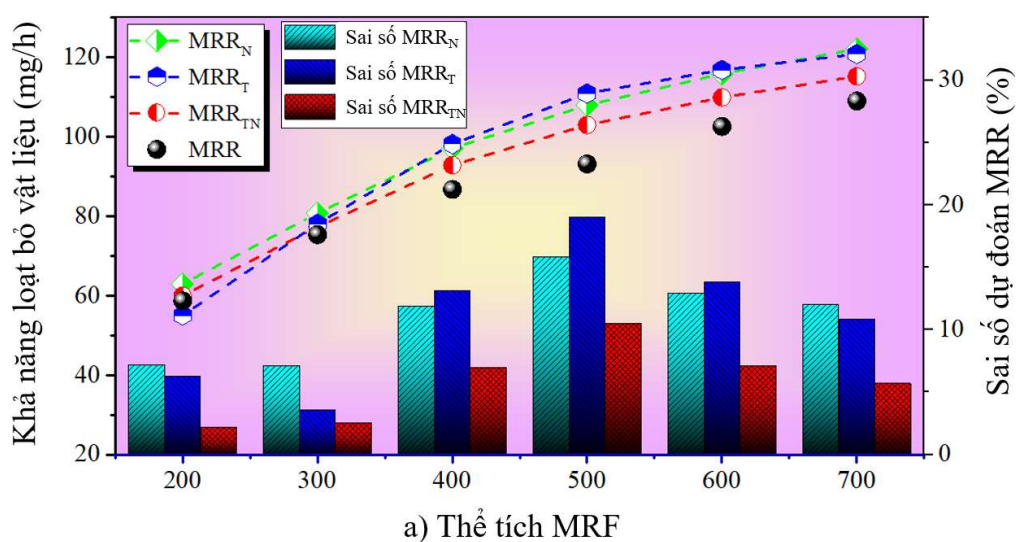
$$MRR_{TN} = k_{PTN} \times F_T^\delta \times F_N^\lambda \times V^\gamma \quad (4.4)$$

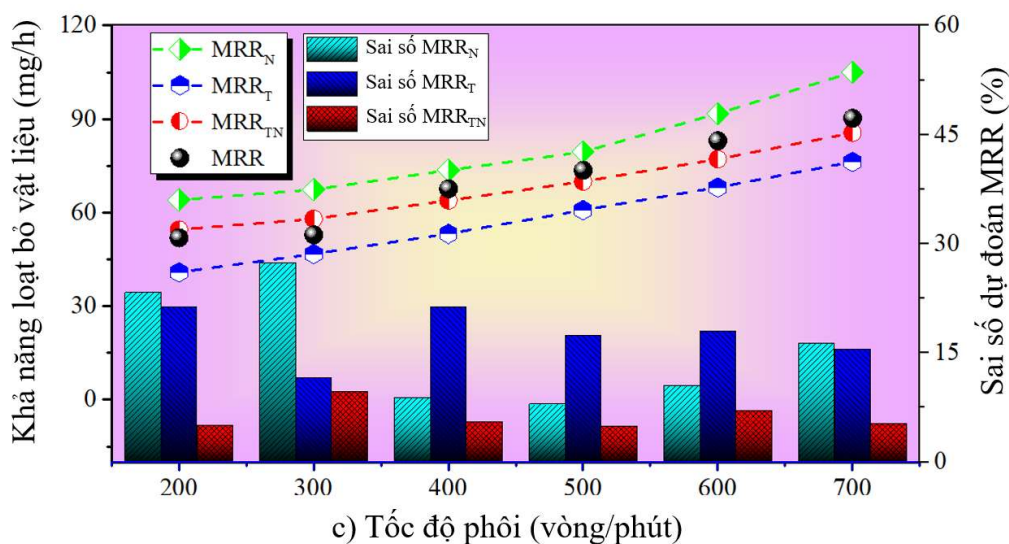
Trong đó λ , δ và γ là các hệ số mũ biểu thị ảnh hưởng của F_N , F_T và V đến khả năng loại bỏ vật liệu.

Kết quả thử nghiệm trình bày trong Bảng 4.1 chỉ ra rằng các tham số λ , δ và γ lần lượt là 0.8047, 0.1518 và 0.0918. Kết quả cho thấy rằng trong quá trình loại bỏ lượng dư vật liệu gia công, được hỗ trợ bởi chuyển động qua lại của mảng Halbach, lực tiếp tuyến F_T đóng vai trò quan trọng hơn nhiều so với lực pháp tuyến. Mặc dù F_N chỉ đóng góp nhỏ vào hiệu quả loại bỏ lượng dư vật liệu gia công, nhưng vai trò của nó trong việc tăng độ sâu thâm nhập của hạt mài vào bề mặt phôi Ti-6Al-4V trong quá trình đánh bóng từ tính (MRF) là rất quan trọng

và không thể bỏ qua. Ngoài ra, các giá trị trung bình cho k_{PNT} , k_{PT} và k_{PN} lần lượt được tìm thấy là 21.7441, 17.6595 và 10.4987.

Hình 4.8 minh họa mô hình dự đoán khả năng loại bỏ vật liệu (MRR) và sai số giữa giá trị MRR lý thuyết và dữ liệu thực nghiệm. Mô hình dự đoán này, được xác định thông qua các phương trình (4.2), (4.3) và (4.4), sử dụng các thành phần lực cắt từ mô hình lý thuyết trong phương trình (2.36) và (2.37). Kết quả cho thấy tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công tăng khi nồng độ MRF và tốc độ phun đánh bóng cao hơn, nhưng giảm khi khoảng cách làm việc tăng.





Hình 4.8 Giá trị sai số MRR_{NT} , MRR_T và MRR_N so với thực nghiệm (MRR)

Mô hình dự đoán MRR cho phôi Ti-6Al-4V trong quá trình đánh bóng MRF sử dụng mảng Halbach tịnh tiến cho thấy lực tiếp tuyến ảnh hưởng nhiều hơn lực pháp tuyến. Kết quả dự đoán và sai số cho thấy mô hình MRR_{TN} cải tiến, kết hợp cả F_T và F_N , mang lại độ chính xác cao hơn so với các mô hình trước đây chỉ xem xét một trong hai thành phần lực này. Độ chính xác cải thiện của mô hình dự đoán MRR rất quan trọng trong việc phát triển hệ thống đánh bóng sử dụng mảng Halbach tịnh tiến, khi tính đến quỹ đạo chuyển động tương đối giữa băng ruy MRF và phôi. Nghiên cứu này sẽ góp phần quan trọng trong việc dự đoán chính xác chất lượng bề mặt của phôi Ti-6Al-4V cho các nghiên cứu tương lai.

4.4. THIẾT LẬP THỰC NGHIỆM TRỰC GIAO

Ngoài việc nghiên cứu từng yếu tố riêng lẻ, các thí nghiệm trực giao đã được áp dụng cho quá trình đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V nhằm tìm ra các thông số công nghệ tối ưu và tạo nền tảng cho việc phân tích kết quả một cách khoa học như được mô tả trên Bảng 4.3 và 4.4. Các thử nghiệm này được tổ chức có hệ thống theo bảng trực giao L16.

Bảng 4.3 Các yếu tố và mức trong quy trình đánh bóng MRF đề xuất

Mức	Hành trình kép của mảng Halbach	Khoảng cách làm việc (mm)	Tốc độ抛 (vòng/phút)	Thể tích MRF (ml)
1	15 Hành trình kép	1	200	200
2	20 Hành trình kép	1.5	300	300
3	25 Hành trình kép	2	400	400
4	30 Hành trình kép	2.5	500	500

Bảng 4.4 Các thí nghiệm trực giao đánh bóng MRF cho hợp kim Ti-6Al-4V

Thứ tự thí nghiệm	Hành trình kép mảng Halbach	Khoảng cách làm việc K	Tốc độ 抛	Thể tích MRF	Ra (nm)	MRR (mg)
1	1	1	1	1	19	177.7
2	1	2	2	2	14	152.6
3	1	3	3	3	23	131.5
4	1	4	4	4	36	103.1
5	2	1	2	3	11	205.7
6	2	2	1	4	8	182.2
7	2	3	4	1	29	98.2
8	2	4	3	2	35	92.3
9	3	1	3	4	7	225.7
10	3	2	4	3	5	203.3
11	3	3	1	2	24	141.5
12	3	4	2	1	43	86.6
13	4	1	4	2	9	229.1
14	4	2	3	1	10	167.8
15	4	3	2	4	21	163.8
16	4	4	1	3	41	103.1

Sau khi hoàn thành, kết quả được phân tích bằng phương pháp phạm vi để xác định thứ tự ảnh hưởng của các yếu tố chính và phụ đến chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu cùng với đó đưa ra bộ thông số công nghệ tối ưu. Các

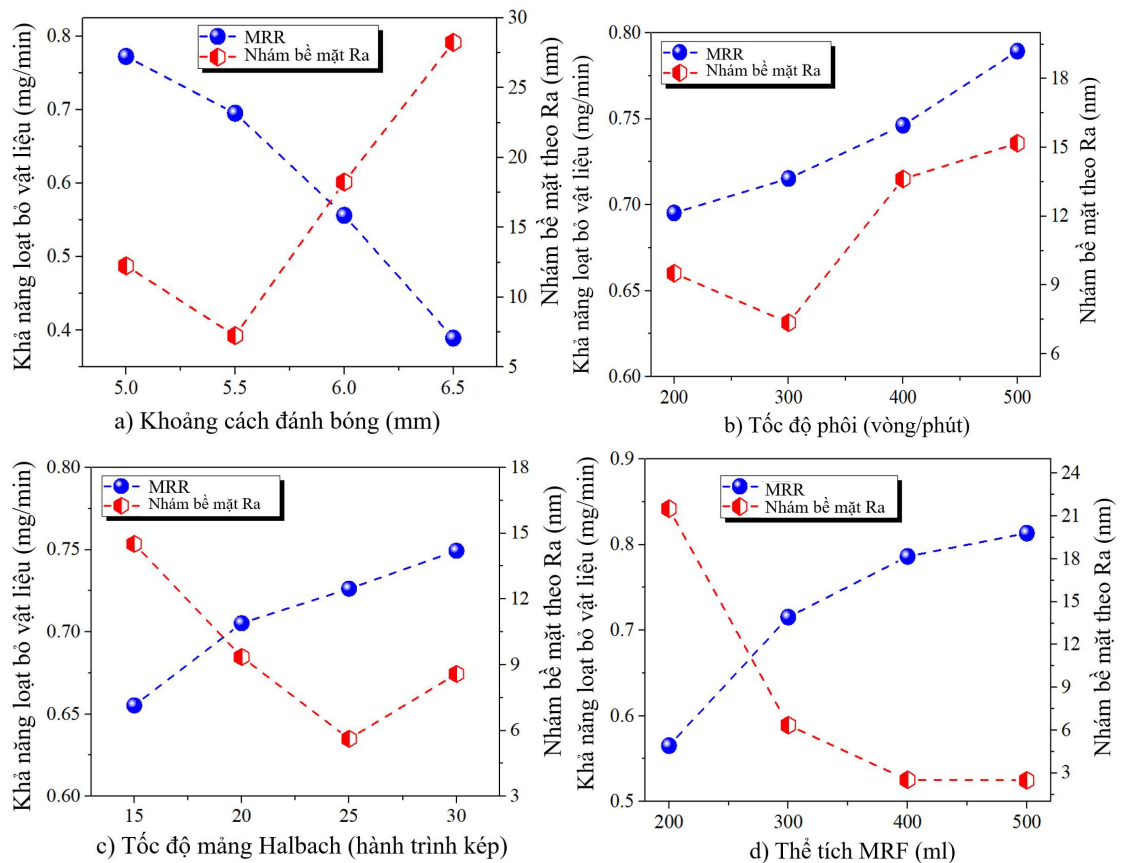
thí nghiệm đánh bóng MRF được thực hiện với các yếu tố ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu, bao gồm hành trình kép của mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi (C1), khoảng cách làm việc (C2), tốc độ phôi (C3), và thể tích bùn MRF (C4). Theo các thông số công nghệ đánh bóng MRF được liệt kê trong Bảng 3.9, các nghiên cứu thực nghiệm cho phôi Ti-6Al-4V được thiết lập với bốn mức khác nhau cho mỗi yếu tố.

Các yếu tố thực nghiệm được sắp xếp theo bốn mức khác nhau và quy trình thử nghiệm được thiết lập theo bảng trực giao L16, bao gồm 16 thí nghiệm. Bảng trực giao này được lựa chọn để phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ MRF đến chất lượng bề mặt của phôi Ti-6Al-4V. Các thông số cụ thể được sử dụng trong thí nghiệm đã được xác định và trình bày chi tiết trong Bảng 4.4.

4.5. CHẤT LƯỢNG BỀ MẶT KHI ĐÁNH BÓNG MRF VỚI MẢNG HALBACH TỊNH TIẾN KHỨ HỒI THEO CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ KHÁC NHAU

Các thông số công nghệ được trình bày trong Bảng 4.4 xác định khả năng loại bỏ vật liệu và độ nhám bề mặt sau 80 phút đánh bóng, như minh họa trên Hình 4.9. Tác động của khoảng cách đánh bóng đến Ra và MRR (Hình 4.9a) cho thấy khả năng loại bỏ vật liệu giảm từ 0.77 (mg/phút) xuống còn 0.39 (mg/phút) khi tăng khoảng cách đánh bóng tăng từ 5 mm lên 6.5 mm (tương ứng với khoảng cách làm việc 1 lên 1.5 mm). Khi khoảng cách đánh bóng nhỏ, băng ruy MRF trở nên cứng hơn nhờ cường độ từ trường trên bề mặt phôi tăng, từ đó lực và áp suất tác động lên bề mặt phôi Ti-6Al-4V lớn hơn, dẫn đến hiệu quả loại bỏ lượng dư vật liệu gia công cao hơn. Ngược lại, khi khoảng cách đánh bóng tăng dần tới cường độ từ trường giảm, khả năng loại bỏ vật liệu cũng giảm cùng nhám bề mặt lớn hơn. Tại khoảng cách đánh bóng 5.5 mm, chất lượng bề mặt đạt được là 7 nm. Tác động của tốc độ quay trục chính đến khả năng loại bỏ vật liệu và chất

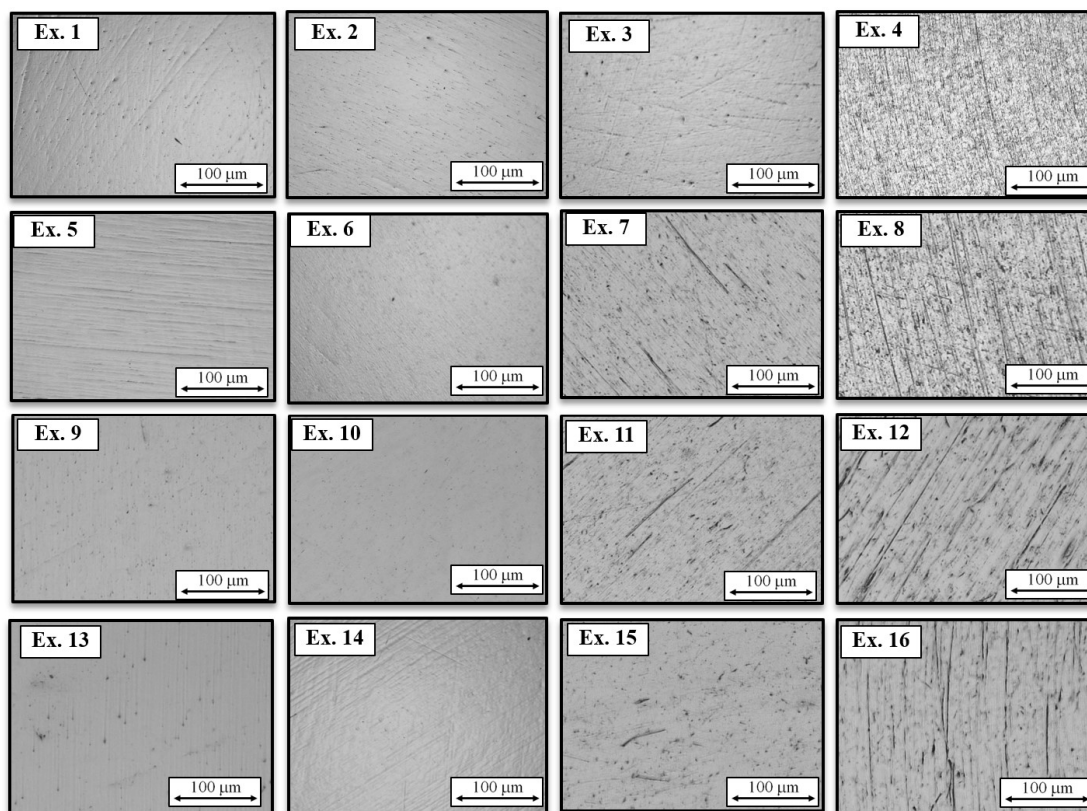
lượng bề mặt như được mô tả trong Hình 4.9b. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng khi tốc độ quay của phôi tăng từ 200 (vòng/phút) lên 500 (vòng/phút), khả năng loại bỏ vật liệu cũng tăng từ 0.65 (mg/phút) lên 0.76 (mg/phút). Tốc độ phôi tăng giúp tăng số lần tiếp xúc giữa phôi và băng ruy MRF, cho phép các hạt mài SiO_2 tiếp xúc với bề mặt phôi trong một đơn vị thời gian lớn hơn, qua đó nâng cao khả năng loại bỏ vật liệu.



Hình 4.9 Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu

Hình 4.9c minh họa hiệu ứng của mảng Halbach khi chuyển động qua lại bằng cách quay động cơ của thiết bị đánh bóng MRF. Tương tự như sự gia tăng tốc độ quay của phôi, khi số hành trình kép của mảng Halbach tăng, quá trình gia tăng chuyển động giữa phôi và băng ruy MRF làm tăng số lượng hạt mài

SiO_2 tiếp xúc với bề mặt gia công trong một đơn vị thời gian, giúp tăng cường khả năng loại bỏ vật liệu. Kết quả cho thấy MRR tăng từ 0.66 (mg/phút) lên 0.73 (mg/phút) khi số hành trình kép của mảng Halbach tăng lên.



Hình 4.10 Hình thái bề mặt抛 Ti-6Al-4V theo các điều kiện đánh bóng khác nhau

Hình 4.9d mô tả mối quan hệ giữa thể tích dung dịch MRF với độ nhám bề mặt (R_a) và tốc độ loại bỏ vật liệu (MRR). Khi thể tích dung dịch MRF tăng từ 200 mL lên 500 mL, tốc độ loại bỏ vật liệu tăng đáng kể từ 0.56 mg/phút lên 0.86 mg/phút. Việc gia tăng thể tích dung dịch dẫn đến mật độ hạt từ tính và hạt mài trong vùng tiếp xúc với bề mặt抛 tăng lên, đồng thời làm mở rộng chiều rộng và nâng cao độ cứng của dải MRF. Sự gia tăng mật độ các hạt từ tính và hạt mài trong vùng đánh bóng đồng nghĩa với số lượng hạt mài tham gia vào quá trình tương tác cơ học trên bề mặt vật liệu Ti-6Al-4V trong cùng một đơn vị thời

gian tăng lên. Điều này góp phần nâng cao hiệu quả loại bỏ vật liệu cùng chất lượng bề mặt cải thiện đáng kể, cho thấy khả năng đánh bóng được cải thiện rõ rệt. Tuy nhiên, khi thể tích MRF vượt quá 400 mL, áp lực lên bề mặt phôi đạt mức bão hòa, khiến MRR không tăng đáng kể và chất lượng bề mặt không còn cải thiện nhiều. Do đó, thể tích MRF khoảng 400 mL được coi là tối ưu, đáp ứng hiệu quả đánh bóng mà không gây lãng phí vật liệu.

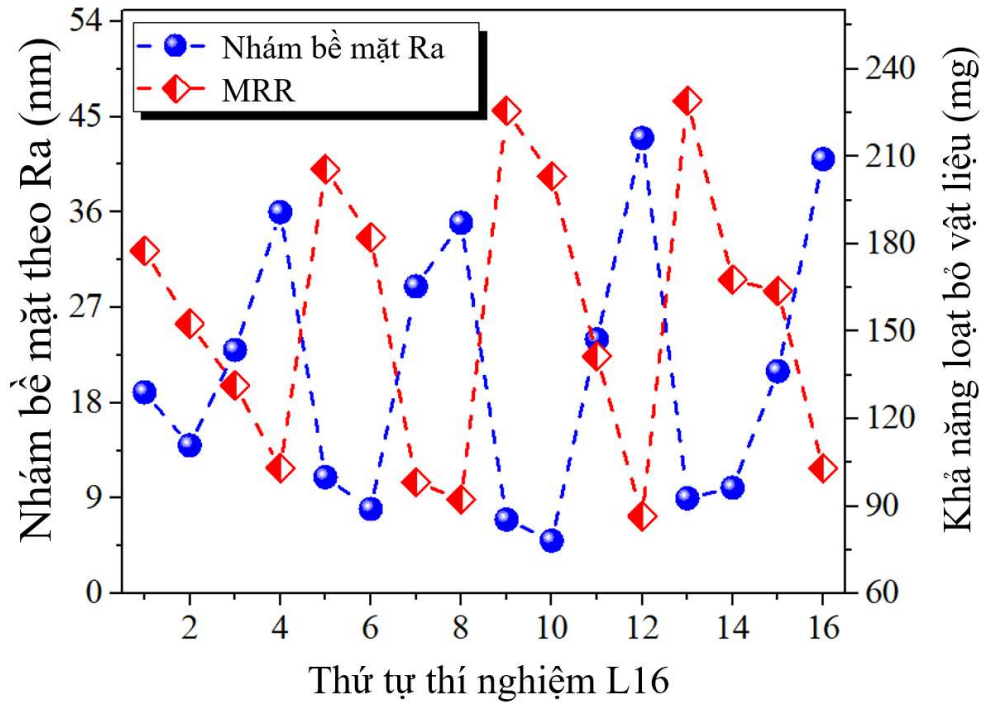
Dưới tác động của quá trình đánh bóng từ tính được đề xuất, các hình thái bề mặt hợp kim Ti-6Al-4V đạt được theo các điều kiện thực nghiệm khác nhau đều cho chất lượng tốt hơn bề mặt ban đầu khi lớp phản ứng tạo ra bởi dung dịch MRF dễ dàng bị hạt mài loại bỏ. Các thí nghiệm trực giao trong các điều kiện đánh bóng khác nhau với hình thái bề mặt và MRR của phôi Ti-6Al-4V như được mô tả trong Hình 4.10 và 4.11, cho thấy sự thay đổi đáng kể giữa các điều kiện đánh bóng khác nhau. Các phát hiện thực nghiệm làm nổi bật sự khác biệt rõ rệt về nhám bề mặt, với các trường hợp đáng chú ý về vết xước và rỗ được quan sát thấy trong các thí nghiệm 4, 7, 8, 11, 12 và 16. Ngược lại, các thí nghiệm 6, 9 và 10 cho thấy bề mặt với ít vết xước hơn.

Phương pháp phạm vi được áp dụng một cách có hệ thống nhằm khám phá sâu hơn về sự tương tác giữa các thông số công nghệ tới chất lượng bề mặt sau đánh bóng và khả năng loại bỏ vật liệu. Phương pháp này vừa giúp xác định các yếu tố tác động lớn nhất và nhỏ nhất đến quá trình đánh bóng, cùng với đó hỗ trợ tối ưu hóa các thông số công nghệ. Mục tiêu của phân tích toàn diện này nhằm làm sáng tỏ mối quan hệ phức tạp giữa các biến số gia công và các đặc điểm bề mặt cùng khả năng loại bỏ vật liệu cần đạt được. Các tác động của các yếu tố công nghệ khác nhau đối với chất lượng bề mặt và tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công được thể hiện thông qua giá trị trung bình (M_{ij}). Các thông số công nghệ tối ưu có thể được xác định bằng cách kết hợp các giá trị (M_{ij}) từ các thông số thực nghiệm. Phạm vi kích thước (S_j) được sử dụng để xác định yếu tố nào có

ảnh hưởng lớn nhất hoặc nhỏ nhất đến kết quả thực nghiệm, trong đó giá trị S_j càng lớn thì ảnh hưởng càng mạnh. Hình 4.12 trình bày các kết quả với giá trị tương ứng của S_j và M_{ij} , được xác định bởi phương trình:

$$S_j = M_{ij\max} - M_{ij\min} \quad (4.5)$$

trong đó M_{ij} biểu thị giá trị trung bình của dữ liệu tương ứng với mức i cho các đối tượng thứ j , trong khi S_j biểu thị phạm vi của các hệ số trong đối tượng j , được xác định bởi sự khác biệt giữa giá trị trung bình lớn nhất ($M_{ij\max}$) và giá trị trung bình nhỏ nhất ($M_{ij\min}$) của các hệ số trong đối tượng thứ j .

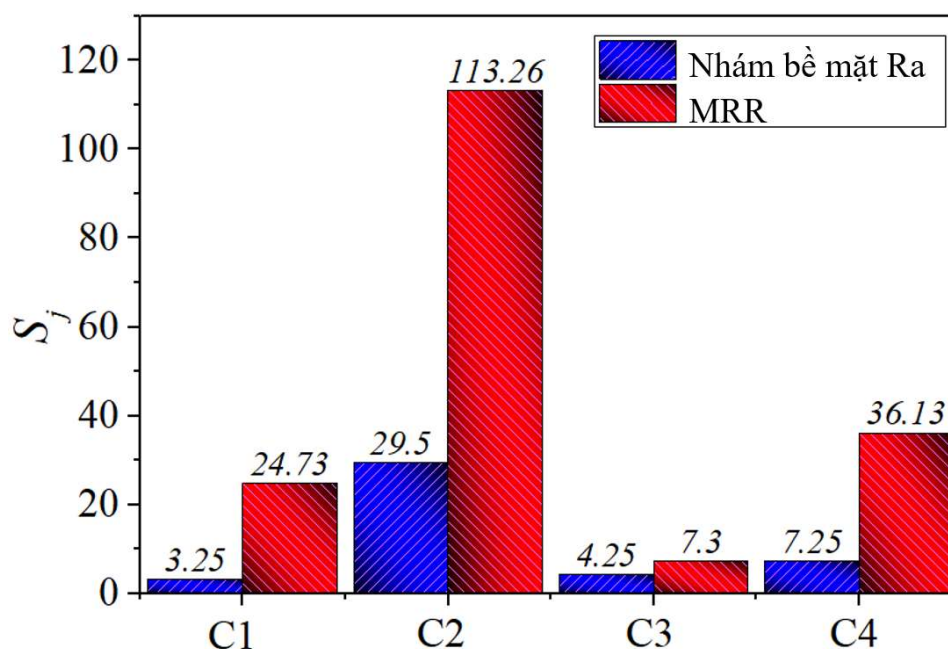


Hình 4.11 Nhám bề mặt và MRR trong các quy trình đánh bóng MRF sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi

Dựa trên phân tích nhám bề mặt, như mô tả trong Hình 4.12, giá trị S_j lớn nhất cho hệ số C2 được quan sát thấy ở các thông số 29.5, tiếp theo là hệ số C4 ở mức 7.25, hệ số C3 ở mức 4.25 và ảnh hưởng nhỏ nhất từ hệ số C1 ở mức 3.25. Do đó, khi áp dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi áp dụng cho quy trình đánh

bóng hợp kim Ti-6Al-4V bằng dung dịch MRF đề xuất tác động lên nhám bề mặt theo thứ tự giảm dần như mô tả sau: C2 (khoảng cách làm việc) > C4 (thể tích dung dịch MRF) > C3 (tốc độ phôi) > C1 (mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi).

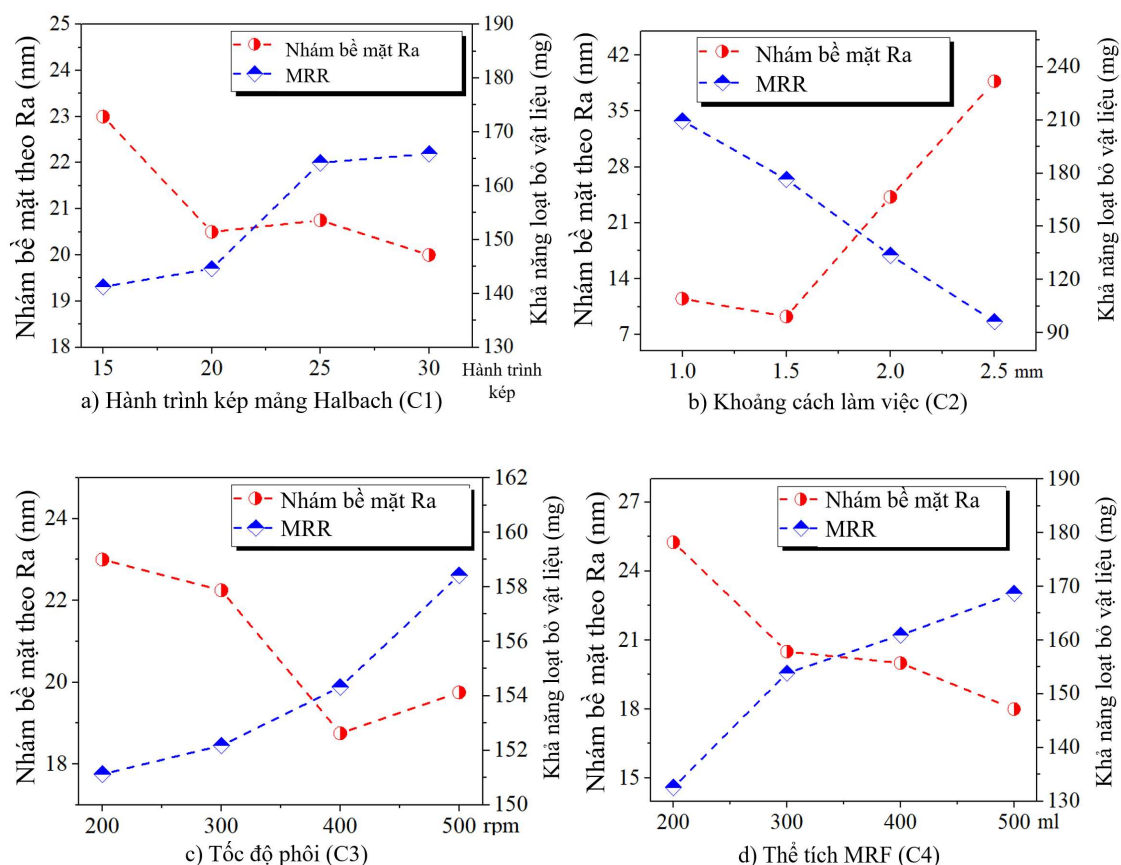
Tương tự, khi khảo sát về MRR, giá trị S_j cao nhất đối với hệ số C2 tương ứng với các tham số 113.26, tiếp theo là hệ số C4 ở mức 36.13, sau đó là hệ số C1 ở mức 24.73 và hệ số có ảnh hưởng ít nhất là C3 ở mức 7.3. Do đó, thứ tự ảnh hưởng lớn hơn đến MRR trong đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V tương ứng C2 (khoảng cách làm việc) > C4 (thể tích dung dịch MRF) > C1 (hành trình kép mảng Halbach) > C3 (tốc độ phôi).



Hình 4.12 Các giá trị S_j tương ứng của từng yếu tố

Các kết quả được mô tả trong Hình 4.13, làm sáng tỏ các chỉ số ảnh hưởng (M_{ij}) liên quan đến nhám bề mặt và MRR sau khi đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V được thực hiện theo các thông số công nghệ khác nhau, mỗi thông số được đặc trưng bởi các mức cụ thể. Khi phân tích nhám bề mặt, có thể thấy rõ từ Hình 4.12 đối với yếu tố C1, giá trị trung bình M_{ij} thấp nhất được quan sát ở mức 4 và

các yếu tố C2, C3 và C4 lần lượt thể hiện mức 2, 3 và 4. Do đó, tổ hợp tham số tối ưu để đạt được giá trị độ nhám bề mặt thấp nhất được thiết lập là C1, C2, C3 và C4 ở mức 4, 2, 3 và 4. Ngược lại, trong bối cảnh MRR, giá trị M_{ij} cao hơn cho thấy hiệu quả đánh bóng được cải thiện. Do đó, các tham số liên quan đến việc loại bỏ lượng dư vật liệu gia công cao nhất tương ứng với C1, C2, C3 và C4 ở mức 4, 1, 2 và 4 như mô tả trong Hình 4.13.



Hình 4.13 M_{ij} với Ra và MRR khi đánh bóng phun Ti-6Al-4V bằng dung dịch MRF theo các thí nghiệm trực giao

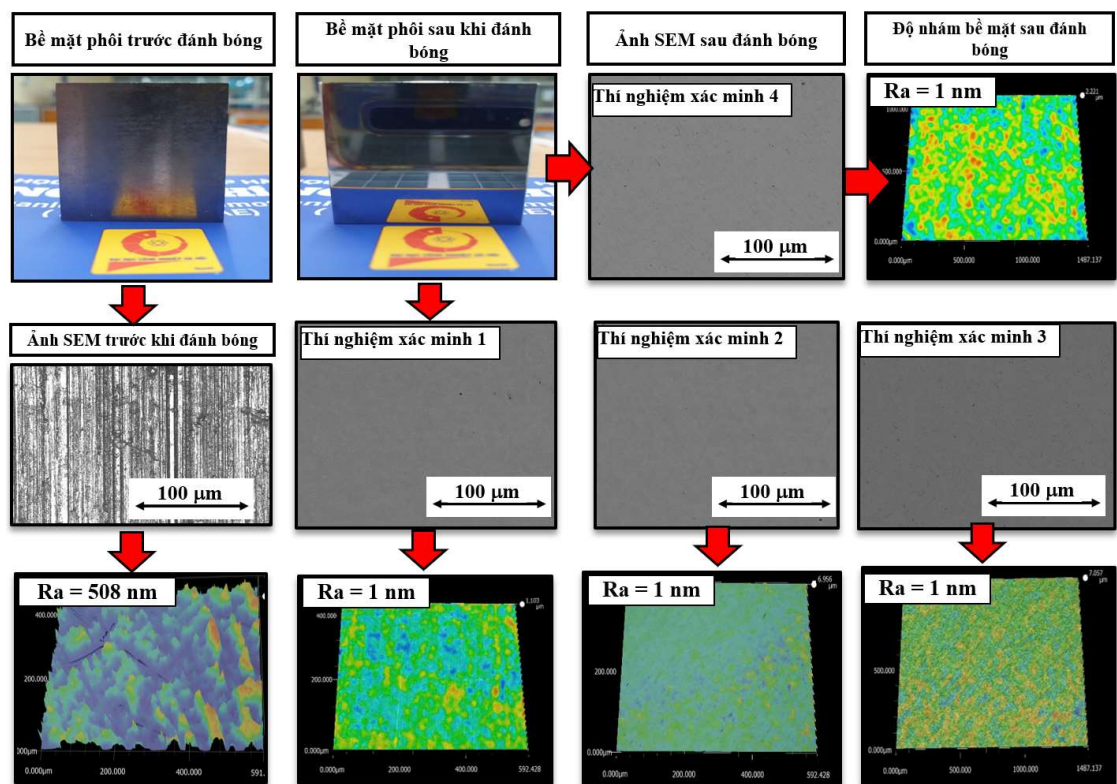
Tác động của mảng Halbach chuyển động tịnh tiến khứ hồi đến độ nhám bề mặt và tốc độ loại bỏ vật liệu (MRR) của mẫu được thể hiện trong Hình 4.13a. Kết quả cho thấy, trong quy trình đánh bóng MRF được đề xuất, khi số hành trình kép của mảng Halbach tăng, tốc độ loại bỏ vật liệu tăng lên; tuy nhiên, độ

nhám bề mặt có xu hướng tăng nhẹ, phản ánh sự đánh đổi giữa năng suất và chất lượng bề mặt. Cụ thể, khi số hành trình kép là 15, vận tốc chuyển động tương đối giữa dải băng từ MRF hình thành bởi mảng Halbach và bề mặt phôi còn thấp, dẫn đến hiệu quả đánh bóng chưa tối ưu. Khi số hành trình kép tăng lên 30, vận tốc chuyển động tăng giúp tần suất va chạm của các hạt mài trong dải MRF lên bề mặt phôi lớn hơn, thúc đẩy quá trình bóc tách vật liệu và cải thiện đáng kể chất lượng bề mặt. Tuy nhiên, khi số hành trình kép tăng từ 25 lên 30, sự cải thiện về MRR và độ nhám bề mặt không còn đáng kể. Nguyên nhân được xác định là do vận tốc di chuyển của mảng Halbach tăng cao, làm tăng lực ly tâm tác động lên dung dịch và các hạt mài, khiến một phần dung dịch MRF bị văng khỏi vùng đánh bóng. Hệ quả là mức độ tương tác giữa bề mặt phôi và dung dịch MRF giảm, dẫn đến hiệu suất đánh bóng tổng thể suy giảm.

Từ các kết quả phân tích, hành trình tịnh tiến khứ hồi tối ưu của mảng Halbach trong quá trình đánh bóng có thể được xác định tương ứng mức 30 hành trình kép.

Xu hướng thay đổi với khả năng loại bỏ vật liệu (MRR) và nhám bề mặt trong quá trình đánh bóng MRF theo khoảng cách đánh bóng khác nhau được minh họa trong Hình 4.13b. Kết quả cho thấy MRR giảm khi khoảng cách đánh bóng tăng. Với khoảng cách đánh bóng ban đầu, khi khoảng cách tăng lên 1.5 mm, chất lượng bề mặt có sự cải thiện nhẹ. Tuy nhiên, khi khoảng cách vượt quá 1.5 mm, độ nhám bề mặt tăng nhanh chóng. Khi khoảng cách đánh bóng giảm, từ trường mạnh hơn và áp lực của dải băng ruy bán rắn MRF lên bề mặt phôi tăng, giúp tăng khả năng loại bỏ vật liệu. Tuy nhiên, nếu khoảng cách quá nhỏ, lực đánh bóng tăng cường và khoảng cách giữa dải MRF và phôi giảm, dẫn đến phân bố không đều các hạt từ tính và hạt mài trên bề mặt phôi. Điều này khiến chất lượng bề mặt sau gia công không đồng đều, mặc dù kết quả MRR cao. Kết quả thí nghiệm cho thấy khoảng cách 1 mm mang lại MRR cao nhưng chất lượng

bề mặt giảm nhẹ so với khoảng cách 1.5 mm. Nếu khoảng cách tiếp tục giảm quá nhiều, áp lực cao từ dải MRF lên phôi sẽ tăng. Áp lực này, cùng với các yếu tố liên quan như hóa chất và hạt mài trong quy trình MRF, làm cho quá trình cơ hóa học chiếm ưu thế hơn so với MRF, dẫn đến hiệu suất đánh bóng giảm. Đồng thời, lực đánh bóng lớn không chỉ làm giảm chất lượng bề mặt mà còn giảm tuổi thọ của miếng đánh bóng. Từ phân tích toàn diện, khoảng cách làm việc với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi tối ưu nên là 1.5 mm, đảm bảo chất lượng bề mặt được nâng cao và duy trì khả năng loại bỏ vật liệu cao.



Hình 4.14 Bề mặt phôi Ti-6Al-4V sau khi đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi theo các điều kiện công nghệ tối ưu

Tác động của tốc độ phôi đến sự thay đổi nhám bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu (MRR) sau quá trình đánh bóng được thể hiện trong Hình 4.13c. Nhìn chung, khi tốc độ phôi tăng MRR tăng. Đối với nhám bề mặt, ban đầu khi tốc độ

phôi tăng nhám bề mặt giảm. Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng tốc độ phôi nhám bề mặt lại có xu hướng tăng lên. Tăng tốc độ phôi làm tăng tần suất tiếp xúc giữa phôi và các hạt mài, dẫn đến ma sát lớn hơn qua đó gia tăng khả năng loại bỏ vật liệu. Khi tốc độ phôi vượt quá 400 (vòng/phút), thời gian tiếp xúc giữa các hạt mài trong dung dịch MRF với bề mặt phôi giảm, làm giảm hiệu quả đánh bóng, đồng thời gia tốc góc và lực ma sát giữa phôi và dung dịch MRF cũng tăng, làm tăng lực cắt và khả năng loại bỏ vật liệu gia công, bên cạnh đó hiện tượng này cũng có thể gây ra trầy xước và mài mòn trên bề mặt phôi.

Vì vậy, để đảm bảo chất lượng bề mặt tốt nhất, cần duy trì thời gian tiếp xúc đủ lâu giữa phôi và dung dịch MRF để quá trình đánh bóng diễn ra đều đặn. Dựa trên mô hình đánh bóng MRF được đề xuất, tốc độ phôi tối ưu là 400 (vòng/phút) nhằm đạt được chất lượng bề mặt tốt nhất.

Sự thay đổi thể tích MRF ảnh hưởng khác nhau đến chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu (MRR), như được minh họa trong Hình 4.13d. Khi thể tích MRF tăng, MRR có xu hướng tăng và độ nhám bề mặt giảm. Ban đầu, khi tăng thể tích MRF, chất lượng bề mặt được cải thiện nhanh chóng, nhưng sau đó quá trình cải thiện chậm lại. Khi thể tích MRF nhỏ, mật độ hạt mài trong vùng đánh bóng thấp và lực từ yếu, dẫn đến khả năng loại bỏ vật liệu kém. Tuy nhiên, khi thể tích MRF tăng lên, số lượng hạt mài trong vùng đánh bóng cũng tăng, cùng với đó là áp lực cơ học lên bề mặt phôi Ti-6Al-4V tăng.

Dựa trên phân tích trên, các thông số đánh bóng ảnh hưởng khác nhau đến khả năng loại bỏ vật liệu (MRR) và độ nhám bề mặt. Kết quả cho thấy chỉ số M_{ij} có thể được sử dụng để kết hợp các thông số công nghệ nhằm tối ưu hóa chất lượng bề mặt ở các cấp độ khác nhau, cụ thể là C1 ở mức 4, C2 ở mức 2, C3 ở mức 3, và C4 ở mức 4. Để kiểm chứng các kết quả tối ưu này, các thí nghiệm trong điều kiện đánh bóng MRF theo các điều kiện tối ưu đã được tiến hành, với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi được áp dụng với hành trình kép của mảng

Halbach được thiết lập mức 30 trình kép, khoảng cách làm việc $K = 1.5 \text{ mm}$, tốc độ phơi 400 (vòng/phút), và thể tích dung dịch MRF thiết lập mức 500 ml. Kết quả hình thái bề mặt được thể hiện trong Hình 4.14, với bốn thí nghiệm xác minh cho thấy nhám bề mặt thu được với $Ra = 1 \text{ nm}$. So với kết quả từ 16 nhóm thí nghiệm theo phương pháp trực giao, các thí nghiệm xác minh cho chất lượng bề mặt cải thiện hơn đáng kể.

Các thí nghiệm đánh bóng bằng MRF được thực hiện bởi Parameswari et al. [81] được áp dụng cho quá trình đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V từ bề mặt mài có độ nhám trung bình Ra là $0,415 \text{ }\mu\text{m}$. Sau khi đánh bóng theo phương pháp của Parameswari et al. [81], mẫu gia công đạt được chất lượng bề mặt tốt nhất với độ nhám Ra là 94 nm ($0,094 \text{ }\mu\text{m}$). Như được mô tả trong Hình 9 và 10, kết quả thí nghiệm của chúng tôi cho thấy chất lượng bề mặt từ phương pháp đề xuất được cải thiện rõ rệt so với trước khi đánh bóng. Quá trình thí nghiệm ứng với các chế độ công nghệ đánh bóng khác nhau sẽ cho các giá trị MRR và chất lượng bề mặt khác nhau. Tuy nhiên, có thể thấy rằng chất lượng bề mặt thu được từ thí nghiệm của chúng tôi được cải thiện đáng kể so với phương pháp được đề xuất bởi Parameswari et al. [81]. Nghiên cứu của chúng tôi đạt được chất lượng bề mặt tốt nhất với độ nhám Ra là 40 nm , và chất lượng bề mặt đã được cải thiện $57,44\%$ so với phương pháp của Parameswari et al. [81].

Quan sát hình thái bề mặt trong quá trình thí nghiệm xác minh cho thấy chỉ xuất hiện các vết xước rất nhỏ và bề mặt đạt được độ bóng cao. Việc ứng dụng quy trình đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi cho hợp kim Ti-6Al-4V, trên cơ sở các thí nghiệm theo phương pháp trực giao, đã cho phép xác định được các thông số tối ưu. Kết quả của quá trình xác minh này cho thấy bề mặt hợp kim Ti-6Al-4V đạt được độ bóng cao và vượt trội so với thực nghiệm trực giao, chứng tỏ tính hiệu quả của quy trình đánh bóng trong việc cải thiện chất lượng bề mặt và kiểm soát vết xước ở mức tối thiểu.

4.6. KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

Chương 4 đã trình bày các tiến trình thực nghiệm trực giao đánh bóng từ tính MRF thân thiện với môi trường sử dụng mảng Halbach cải tiến tịnh tiến khứ hồi trên nền hạt mài SiO_2 , hạt từ tính Fe_3O_4 , chất oxy hóa H_2O_2 và axit malic trong gia công hợp kim Ti-6Al-4V, đồng thời kiểm chứng mô hình toán học lực tiếp tuyến (F_T) và lực pháp tuyến (F_N).

Kết quả phân tích thực nghiệm cho thấy mô hình toán xác định lực cắt cho sai số dưới 16% so với kết quả thực nghiệm. Thí nghiệm trực giao và phương pháp phạm vi xác định được các thông số tối ưu: mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi tác động lên phôi qua 30 hành trình kép, với khoảng cách đánh bóng 1.5 mm, tốc độ quay của phôi 400 (vòng/phút), và thể tích dung dịch MRF 500 ml cho bề mặt sau đánh bóng đạt độ nhám bề mặt ở dạng nano mét với $R_a = 1$ nm cùng trình tự ảnh hưởng của các yếu tố như sau: khoảng cách làm việc > thể tích dung dịch > tốc độ quay phôi > hành trình mảng Halbach. Các kết quả thu được góp phần làm rõ cơ chế và đưa ra được bộ thông số công nghệ phù hợp cho quy trình đánh bóng MRF, làm nền tảng cho ứng dụng trong gia công chính xác vật liệu khó gia công.

Các kết quả nghiên cứu này tạo nền tảng quan trọng cho việc tối ưu hóa quy trình đánh bóng từ tính, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho những ứng dụng gia công chính xác trong tương lai.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

KẾT LUẬN

Luận án đã tổng hợp những tiến bộ đáng kể trong công nghệ MRF trong hai thập kỷ qua. Nội dung được chia thành nhiều phần chính, bao gồm nghiên cứu tình hình trong và ngoài nước, phát triển cơ chế đánh bóng từ tính và ứng dụng công nghệ MRF trong đánh bóng hợp kim titanium. Các nghiên cứu đã đánh giá quá trình đánh bóng MRF liên quan đến hàm ảnh hưởng và lực đánh bóng, nêu bật những thách thức hiện tại và đề xuất hướng phát triển cho công nghệ này áp dụng cho hoàn thiện bề mặt hợp kim titanium. Trong nghiên cứu này công nghệ đánh bóng từ tính (MRF) sử dụng mảng Halbach cải tiến đã được nghiên cứu và phát triển để khắc phục những hạn chế của các mô hình MRF truyền thống, đặc biệt là khi gia công các bề mặt có kích thước lớn và khó gia công như hợp kim Ti-6Al-4V. Trong luận án này, mảng Halbach cải tiến được đề xuất với khả năng tạo ra từ trường mạnh và vùng từ trường mở rộng, giúp cải thiện hiệu suất đánh bóng và khả năng loại bỏ vật liệu (MRR) một cách hiệu quả. Các kết luận chính của luận án được rút ra như sau:

Giới thiệu tổng quan về công nghệ MRF, vốn thu hút sự quan tâm toàn cầu nhờ khả năng kiểm soát quá trình đánh bóng trên bề mặt yêu cầu độ chính xác cao. Mặc dù nghiên cứu tại Việt Nam còn hạn chế, nhưng đây là cơ hội để phát triển công nghệ này trong nước. Các cơ chế hoạt động và sự phát triển của MRF, với những ứng dụng nổi bật trong các ngành công nghiệp yêu cầu độ chính xác bề mặt cao được phân tích.

Công nghệ đánh bóng từ tính (MRF) sử dụng mảng Halbach cải tiến đã được nghiên cứu và phát triển để khắc phục những hạn chế của các mô hình MRF truyền thống, đặc biệt là khi gia công các bề mặt có kích thước lớn và khó gia công như hợp kim Ti-6Al-4V. Mảng Halbach cải tiến được đề xuất với khả

năng tạo ra từ trường mạnh và vùng từ trường mở rộng, giúp cải thiện hiệu suất đánh bóng và khả năng loại bỏ vật liệu (MRR) một cách hiệu quả.

Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng mô hình MRF với mảng Halbach cải tiến đã tạo ra một vùng từ trường hiệu quả với mật độ từ thông đạt mức 2.05 T, cùng với dải băng ruy MRF được hình thành tại các điểm tiếp xúc giữa các nam châm. Điều này đã giúp tăng cường lực từ tác động lên các hạt từ tính Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2 trong dung dịch MRF, qua đó cải thiện đáng kể khả năng loại bỏ vật liệu và chất lượng bề mặt sau gia công.

Thông qua các thí nghiệm thực hiện với nhiều thông số khác nhau, bao gồm khoảng cách đánh bóng, thể tích dung dịch MRF và tốc độ phôi, mối tương quan giữa lực tiếp tuyến (F_T) và lực pháp tuyến (F_N) đã được kiểm chứng, với sai số giữa kết quả thực nghiệm và mô hình lý thuyết luôn dưới 16%. Đồng thời, một mô hình dự đoán MRR dựa trên phương trình Preston cũng đã được phát triển và cho thấy độ chính xác cao hơn khi kết hợp cả hai thành phần lực F_T và F_N .

Ngoài ra, việc sử dụng dung dịch MRF thân thiện với môi trường, bao gồm hạt mài SiO_2 , hạt từ tính Fe_3O_4 , chất oxy hóa H_2O_2 và axit malic, đã chứng minh hiệu quả cao trong quá trình đánh bóng bề mặt hợp kim Ti-6Al-4V. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc điều chỉnh nồng độ H_2O_2 và độ pH có ảnh hưởng lớn đến hiệu suất đánh bóng. Đặc biệt, khi nồng độ H_2O_2 đạt mức 1% và pH duy trì ở mức 4, quá trình đánh bóng đạt hiệu suất tối ưu với MRR cao và bề mặt đạt độ nhám $R_a = 1 \text{ nm}$.

Thứ tự tác động của các yếu tố đến nhám bề mặt hợp kim Ti-6Al-4V trong quá trình đánh bóng MRF, sắp xếp theo yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất đến nhỏ nhất như mô tả sau: C2 (khoảng cách làm việc) > C4 (thể tích dung dịch MRF) > C3 (tốc độ quay của phôi) > C1 (mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi). Tương tự, đối với MRR, thứ tự ảnh hưởng được xác định như sau: C2 (khoảng cách làm việc) > C4 (thể tích dung dịch MRF) > C1 (mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi) >

C3 (tốc độ quay của phôi). Quy trình MRF tối ưu được đề xuất đã cho thấy khả năng đạt được chất lượng bề mặt vượt trội cho hợp kim Ti-6Al-4V. Cụ thể, mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi tác động lên phôi qua 30 hành trình kép, với khoảng cách làm việc 1.5 mm, tốc độ quay của phôi 400 (vòng/phút), và thể tích dung dịch MRF 500 ml. Với quy trình đánh bóng MRF thân thiện với môi trường đề xuất, bề mặt phôi ban đầu vốn có nhiều vết xước từ quá trình mài để lại đã được làm mịn đi đáng kể, với bề mặt sau đánh bóng đạt độ nhám bề mặt ở dạng nano mét. Nghiên cứu này cung cấp nền tảng cho việc tối ưu hóa và ứng dụng công nghệ MRF vào sản xuất các bề mặt siêu mịn cho hợp kim Ti-6Al-4V và các vật liệu khó gia công khác.

HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

1. Sử dụng các kỹ thuật tiên tiến như SEM, TEM, XRD để phân tích chi tiết sự thay đổi bề mặt trong quá trình đánh bóng MRF. Nghiên cứu này sẽ giúp làm rõ các cơ chế phản ứng hóa học và cơ học xảy ra trong quá trình đánh bóng, từ đó tối ưu hóa vật liệu và dung dịch đánh bóng phù hợp hơn.
2. Ứng dụng các mảng Halbach hiệu suất cao trong đánh bóng các bề mặt có biên dạng phức tạp như hình cầu, hình nón hay các cấu trúc vi mô. Hướng nghiên cứu này sẽ mở rộng phạm vi ứng dụng của công nghệ MRF vào các ngành công nghiệp yêu cầu độ chính xác cao như hàng không, y tế và sản xuất linh kiện điện tử.
3. Áp dụng các thuật toán tối ưu hóa hiện đại áp dụng vào tối ưu hóa và dự đoán chất lượng bề mặt sau quá trình đánh bóng MRF. Nghiên cứu này sẽ giúp cải thiện hiệu suất đánh bóng và tiết kiệm tài nguyên, đồng thời dự đoán chính xác hơn kết quả đánh bóng trong các điều kiện khác nhau.
4. Tiếp tục nghiên cứu và phát triển các loại dung dịch MRF mới với thành phần thân thiện môi trường, đồng thời đảm bảo hiệu suất đánh bóng cao. Điều này

sẽ giúp mở rộng ứng dụng công nghệ MRF trong các ngành công nghiệp đòi hỏi tiêu chuẩn môi trường nghiêm ngặt.

5. Mở rộng nghiên cứu ứng dụng công nghệ MRF vào các loại vật liệu tiên tiến và khó gia công như gốm sứ, hợp kim siêu bền, hoặc vật liệu composite. Điều này sẽ nâng cao tiềm năng của MRF trong các ngành công nghệ cao và các lĩnh vực sản xuất đòi hỏi độ chính xác và độ bóng bề mặt tối ưu.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN

- [1] D. H. Tien and **T. N. Duy***, "Novel magnetic field array optimization method for the chemical magnetorheological finishing of Ti-6Al-4V alloy with SiO₂ abrasive and Fe₃O₄ magnetic particles," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (**SCIE Q1, IF 2.9**), vol. 134, no. 3, pp. 1395-1417, 2024/08/03 2024.
- [2] D. H. Tien and **N. D. Trinh***, "Novel hybrid chemical magnetorheological fluid for polishing Ti-6Al-4V alloy," *Materials and Manufacturing Processes* (**SCIE Q1, IF 4.1**), vol. 39, no. 12, pp. 1798-1815, 2024/03/07 2024.
- [3] D. H. Tien, P. T. T. Thoa, N. Van Que, and **T. N. Duy***, "Developing material removal rate from polishing force modeling via magnetorheological finishing using an improved Halbach array with a slider crank mechanism for Ti-6Al-4V alloy," *Materials Today Communications* (**SCIE Q1, IF 3.7**), vol. 45, p. 112360, 2025/04/01/ 2025.
- [4] **N. D. Trinh**, D. H. Tien, P. T. T. Thoa, N. Van Que, K. V. Quang, and N. T. Mai, "Circular Halbach array integrated using an abrasive circulating system during the ultra-precision machining of polymethyl methacrylate optical material," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* (**SCOPUS Q1**), vol. 7, no. 6, pp. 793-808, 2024/11/01/ 2024.
- [5] **N. Duy Trinh et al.**, "A Novel Circulating Abrasive Flow Strategy Using Circular Halbach Array for Magneto-Rheological Finishing of Ti-6Al-4V," *Journal of Machine Engineering* (**SCOPUS Q2**), vol. 24, 03/13 2024.
- [6] D. H. Tien, **T. N. Duy**, and P. T. T. Thoa, "Applying GPR-FGRA hybrid algorithm for prediction and optimization of eco-friendly magnetorheological finishing Ti-6Al-4V alloy," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* (**ISI Q2**), vol. 17, no. 2, pp. 729-745, 2023/04/01 2023.
- [7] **Trinh, N.D.**, N.M. Quang, L.T.P. Thanh, N.T. Tung, D.N. Hoanh, and N.N. Quan, *An advanced magnetic abrasive finishing with regenerative*

abrasive particles for polymethyl methacrylate material using a Halbach array. Sāadhanā (SCIE Q2), 2025. 50(2): p. 74.

- [8] **Duy, T.N.,** N.M. Quang, and N. Van Que, *Surface quality and material removal via viscosity-controlled Magnetorheological finishing Ti-6Al-4V using Fe_3O_4 - SiO_2 abrasives and Halbach array.* Results in Engineering (ISI Q1), 2025. **26:** p. 105089.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Liu, D. Zhang, and C. Yao, "A modified constitutive model coupled with microstructure evolution incremental model for machining of titanium alloy Ti-6Al-4V," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 297, p. 117262, 2021/11/01/ 2021.
- [2] Y. Liu, D. Geng, Z. Shao, Z. Zhou, X. Jiang, and D. Zhang, "A study on strengthening and machining integrated ultrasonic peening drilling of Ti-6Al-4V," *Materials & Design*, vol. 212, p. 110238, 2021/12/15/ 2021.
- [3] N. Khanna, P. Shah, L. N. L. de Lacalle, A. Rodríguez, and O. Pereira, "In pursuit of sustainable cutting fluid strategy for machining Ti-6Al-4V using life cycle analysis," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 29, p. e00301, 2021/09/01/ 2021.
- [4] A. S. Kumar, B. G. Priyadarshini, B. Jahaziel, and V. Krishnaraj, "On the formation of Ti₂AlN MAX phase coatings and improvement in tool life by superimposing on tungsten carbide cutting tool for machining Ti-6Al-4V alloys," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 107, pp. 210-225, 2023/12/01/ 2023.
- [5] R. Bammidi, D. Sreeramulu, H. Madivada, P. K. Rejeti, and M. Venkatesh, "Towards an understanding of Ti-6Al-4V machining and machinability," *Materials Today: Proceedings*, 2023/09/15/ 2023.
- [6] V. Zega *et al.*, "A 3D Printed Ti6Al4V Alloy Uniaxial Capacitive Accelerometer," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 18, pp. 19640-19646, 2021.
- [7] T. N. Pornsin-sirirak, Y. C. Tai, H. Nassef, and C. M. Ho, "Titanium-alloy MEMS wing technology for a micro aerial vehicle application," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 89, no. 1, pp. 95-103, 2001/03/20/ 2001.
- [8] J. Gou *et al.*, "Effect of cold metal transfer mode on the microstructure and machinability of Ti-6Al-4V alloy fabricated by wire and arc additive manufacturing in ultra-precision machining," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 21, pp. 1581-1594, 2022/11/01/ 2022.
- [9] Y. Wang *et al.*, "Experiment and numerical study of chip formation mechanism during cryogenic machining of Ti-6Al-4V alloy," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 84, pp. 1246-1257, 2022/12/01/ 2022.
- [10] S. Liu *et al.*, "Morphology characterization of polishing spot and process parameters optimization in magnetorheological finishing," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 80, pp. 259-272, 2022/08/01/ 2022.

- [11] Y. Choopani, M. R. Razfar, M. Khajehzadeh, and M. Khosrojerdi, "Design and development of ultrasonic assisted-rotational magnetorheological abrasive flow finishing (UA-RMRAFF) process," *Applied Acoustics*, vol. 197, p. 108950, 2022/08/01/ 2022.
- [12] M. Amir *et al.*, "Development of magnetic nanoparticle based nanoabrasives for magnetorheological finishing process and all their variants," *Ceramics International*, vol. 49, no. 4, pp. 6254-6261, 2023/02/15/ 2023.
- [13] F. Zhao *et al.*, "Advanced nonlinear rheology magnetorheological finishing: A review," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 37, no. 4, pp. 54-92, 2024/04/01/ 2024.
- [14] N. Dixit, V. Sharma, and P. Kumar, "Research trends in abrasive flow machining: A systematic review," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 64, pp. 1434-1461, 2021/04/01/ 2021.
- [15] K. Saraswathamma, "Magnetorheological Finishing: A Review," *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 2, pp. 168-173, 01/01 2013.
- [16] D. Qin *et al.*, "Sulfuric acid modified magnetorheological finishing of polycrystalline magnesium aluminate spinel," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 152, p. 107098, 2022/12/01/ 2022.
- [17] A. S. Rajput, A. Singh, S. Kapil, and M. Das, "Investigations on the trochoidal toolpath for processing the biomaterial through magnetorheological fluid assisted finishing process," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 76, pp. 812-827, 2022/04/01/ 2022.
- [18] N. A. Mutalib, I. Ismail, S. M. Soffie, and S. N. Aqida, "Magnetorheological finishing on metal surface: A review," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 469, no. 1, p. 012092, 2019/01/01 2019.
- [19] W. Wang, S. Ji, and J. Zhao, "Review of magnetorheological finishing on components with complex surfaces," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 131, no. 5, pp. 3165-3191, 2024/03/01 2024.
- [20] A. S. Rajput, M. Das, and S. Kapil, "A comprehensive review of magnetorheological fluid assisted finishing processes," *Machining Science and Technology*, vol. 26, no. 3, pp. 339-376, 2022/05/04 2022.

- [21] J. Xu, J. Li, M. Nie, and Y. Liu, "Material removal mechanism in magnetorheological foam plane finishing," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 87, pp. 168-182, 2023/02/03/ 2023.
- [22] A. S. Rajput, M. Das, and S. Kapil, "Investigations on a hybrid chemo-magnetorheological finishing process for freeform surface quality enhancement," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 81, pp. 522-536, 2022/09/01/ 2022.
- [23] Y. Wang, S. Yin, and H. Huang, "Polishing characteristics and mechanism in magnetorheological planarization using a permanent magnetic yoke with translational movement," *Precision Engineering*, vol. 43, pp. 93-104, 2016/01/01/ 2016.
- [24] H. Luo *et al.*, "An atomic-scale and high efficiency finishing method of zirconia ceramics by using magnetorheological finishing," *Applied Surface Science*, vol. 444, pp. 569-577, 2018/06/30/ 2018.
- [25] M. Xie, Z. An, and J. Zhuang, "Design and experimental research of dynamic magnetic field device based on Halbach array in magnetorheological polishing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, 06/01 2022.
- [26] J. Qin, M. Feng, and Q. Cao, "Processing Optimization for Halbach Array Magnetic Field-Assisted Magnetic Abrasive Particles Polishing of Titanium Alloy," *Materials*, vol. 17, no. 13. doi: 10.3390/ma17133213
- [27] K. Nishimura, "The strongest array beyond Halbach array," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 580, p. 170933, 2023/08/15/ 2023.
- [28] J. Ye *et al.*, "Concise magnetic force model for Halbach-type magnet arrays and its application in permanent magnetic guideway optimization," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 587, p. 171301, 2023/12/01/ 2023.
- [29] Z. Xu, B. Xi, G. Yi, and C. K. Ahn, "High-precision control scheme for hemispherical resonator gyroscopes with application to aerospace navigation systems," *Aerospace Science and Technology*, vol. 119, p. 107168, 2021/12/01/ 2021.
- [30] L. R. Graves, G. A. Smith, D. Apai, and D. W. Kim, "Precision Optics Manufacturing and Control for Next-Generation Large Telescopes," *Nanomanufacturing and Metrology*, vol. 2, no. 2, pp. 65-90, 2019/06/01 2019.

- [31] W. Qi, X. Pei, and H. Zhao, "A semiconductor wafer manufacturing system scheduling start-up and decision mechanism considering bottleneck drift characteristics," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 193, p. 110303, 2024/07/01/ 2024.
- [32] Y. He, W. Tang, P. Gao, M. Tang, L. Fan, and Y. Wang, "Nano-polishing characteristics in vibration-assisted CMP of single-crystal silicon carbide via molecular dynamics simulations," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 164, p. 107637, 2023/09/01/ 2023.
- [33] N. Suzuki, R. Yamaguchi, Y. Hashimoto, H. Yasuda, S. Yamaki, and Y. Mochizuki, "Process state estimation in chemical mechanical polishing (CMP) by inverse analysis of in-process data," *CIRP Annals*, vol. 71, no. 1, pp. 273-276, 2022/01/01/ 2022.
- [34] M. Zhou, Y. Cheng, M. Zhong, and W. Xu, "Macro and micro-nano machining mechanism for ultrasonic vibration assisted chemical mechanical polishing of sapphire," *Applied Surface Science*, vol. 640, p. 158343, 2023/12/15/ 2023.
- [35] H. Li, B. Zhang, Y. Li, P. Wu, Y. Wang, and M. Xie, "Effect of novel green inhibitor on corrosion and chemical mechanical polishing properties of cobalt in alkaline slurry," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 146, p. 106691, 2022/08/01/ 2022.
- [36] X. Han *et al.*, "Research progress on the application of ceria nanoparticles as abrasives in dielectric layer CMP and post cleaning: Structure, morphology, doping, and mechanism," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 679, p. 132551, 2023/12/20/ 2023.
- [37] D. Datta, H. Rai, S. Singh, M. Srivastava, R. K. Sharma, and N. N. Gosvami, "Nanoscale tribological aspects of chemical mechanical polishing: A review," *Applied Surface Science Advances*, vol. 11, p. 100286, 2022/10/01/ 2022.
- [38] Y. Chen, A. Wei, X. Ma, W. Tianyu, and A. Chen, "Copper-incorporated dendritic mesoporous silica nanospheres and enhanced chemical mechanical polishing (CMP) performance via $\text{Cu}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ heterogeneous Fenton-like system," *Applied Surface Science*, vol. 601, p. 154262, 2022/11/01/ 2022.
- [39] X. Ke *et al.*, "Review on robot-assisted polishing: Status and future trends," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 80, p. 102482, 2023/04/01/ 2023.

- [40] Z. Xia, F. Fang, E. Ahearne, and M. Tao, "Advances in polishing of optical freeform surfaces: A review," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 286, p. 116828, 2020/12/01/ 2020.
- [41] C. Guo, D. Zhang, X. Li, J. Liu, and F. Li, "A permanent magnet tool in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing for 30CrMnSi grooves part," *Precision Engineering*, vol. 75, pp. 180-192, 2022/05/01/ 2022.
- [42] H. Kansal, A. K. Singh, and V. Grover, "Magnetorheological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool," *Precision Engineering*, vol. 51, pp. 30-39, 2018/01/01/ 2018.
- [43] K. Hutt, J. Rietberg, P. Gradl, and H. Yamaguchi, "Characterization of oscillatory magnetic field-assisted finishing of directed energy deposition NASA HR-1 integral channels," *Manufacturing Letters*, vol. 41, pp. 670-678, 2024/10/01/ 2024.
- [44] P. Chen, Y. Gao, G. Zhao, Y. Zhao, G. Zhang, and Y. yang, "Modeling of material removal mechanism on free-form surface in magnetic abrasive finishing process," *Precision Engineering*, 2024/10/18/ 2024.
- [45] A. Sidpara and V. K. Jain, "Nano-level finishing of single crystal silicon blank using magnetorheological finishing process," *Tribology International*, vol. 47, pp. 159-166, 2012/03/01/ 2012.
- [46] V. K. Jain, "ABRASIVE-BASED NANO-FINISHING TECHNIQUES: AN OVERVIEW," *Machining Science and Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 257-294, 2008/09/11 2008.
- [47] F. Zhao *et al.*, "Advanced nonlinear rheology magnetorheological finishing: A review," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 37, 06/01 2023.
- [48] F. Zhao *et al.*, "Advanced nonlinear rheology magnetorheological finishing: A review," *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023/06/14/ 2023.
- [49] G. Ghosh, A. Sidpara, and P. P. Bandyopadhyay, "Magnetorheological finishing of WC-Co coating using iron-B₄C-CNT composite abrasives," *Tribology International*, vol. 155, p. 106807, 2021/03/01/ 2021.
- [50] Y. Wang, Y. Zhang, and Z. Feng, "Analyzing and improving surface texture by dual-rotation magnetorheological finishing," *Applied Surface Science*, vol. 360, pp. 224-233, 2016/01/01/ 2016.
- [51] S. Kumar, R. Sehgal, M. F. Wani, and M. D. Sharma, "Stabilization and tribological properties of magnetorheological (MR) fluids: A review," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 538, p. 168295, 2021/11/15/ 2021.

- [52] Z. Sun *et al.*, "Experimental investigations on enhanced alternating-magnetic field-assisted finishing of stereolithographic 3D printing zirconia ceramics," *Ceramics International*, vol. 48, no. 24, pp. 36609-36619, 2022/12/15/ 2022.
- [53] F. Zhao, L. Zhou, Z. Fan, and Z. Dai, "Research on Surface Processing of Quartz Wafer Based on Magnetorheological Finishing and Ion Beam Figuring," *Procedia CIRP*, vol. 71, pp. 496-499, 2018/01/01/ 2018.
- [54] A. Barman and M. Das, "Nano-finishing of bio-titanium alloy to generate different surface morphologies by changing magnetorheological polishing fluid compositions," *Precision Engineering*, vol. 51, pp. 145-152, 2018/01/01/ 2018.
- [55] D. H. Tien, T. N. Duy, and P. T. T. Thoa, "Applying GPR-FGRA hybrid algorithm for prediction and optimization of eco-friendly magnetorheological finishing Ti-6Al-4V alloy," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 17, no. 2, pp. 729-745, 2023/04/01 2023.
- [56] W. I. Kordonski *et al.*, "Vertical Wheel Magnetorheological Finishing Machine for Flats, Convex, and Concave Surfaces," in *Optical Fabrication and Testing*, Boston, Massachusetts, 1996, p. OFC.1: Optica Publishing Group.
- [57] S. D. Jacobs *et al.*, "Magnetorheological Fluid Composition and Enhanced Material Removal Rates with Nanodiamonds," in *Optical Fabrication and Testing*, Boston, Massachusetts, 1996, p. OWF.3: Optica Publishing Group.
- [58] J. Wu, B. Afzal, Z. Huang, M. Yang, and S. Sun, "Study on new magnetorheological chemical polishing process for GaN crystals: polishing solution composition, process parameters, and roughness prediction model," *Smart Materials and Structures*, vol. 32, 02/02 2023.
- [59] H. U. H. P. X. L. I. X. L. I. N. Z. Xu Chao, "Optimization of magnetorheological finishing process for aluminum mirror with complex surface," *ACTA AERONAUTICAET ASTRONAUTICA SINICA*, vol. 42, no. 10, pp. 524914-524914.
- [60] M. Singh and A. K. Singh, "Magnetorheological finishing of grooved drum surface and its performance analysis in winding process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 7, pp. 2921-2937, 2020/02/01 2020.

- [61] J. Hou, X. Chen, J. Li, Z. Bo, and W. Deng, "Processing technology of magnetorheological finishing for large-aperture optical components," in *Optical Design and Fabrication 2019 (Freeform, OFT)*, Washington, DC, 2019, p. JT5A.22: Optica Publishing Group.
- [62] L. Zhang, Y. Huang, G. Chen, M. Xu, W. Xia, and Y. Fu, "Experimental study of coverage constraint abrasive flow machining of titanium alloy artificial joint surface," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 233, no. 13, pp. 2399-2409, 2019/11/01 2019.
- [63] Z. Fan, Y. Tian, Z. Liu, C. Shi, and Y. Zhao, "Investigation of a novel finishing tool in magnetic field assisted finishing for titanium alloy Ti-6Al-4V," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 43, pp. 74-82, 2019/07/01/ 2019.
- [64] A. Barman and M. Das, "Magnetic field assisted finishing process for super-finished Ti alloy implant and its 3D surface characterization," *Journal of Micromanufacturing*, vol. 1, no. 2, pp. 154-169, 2018/11/01 2018.
- [65] A. Barman and M. Das, "Toolpath generation and finishing of bio-titanium alloy using novel polishing tool in MFAF process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 100, no. 5, pp. 1123-1135, 2019/02/01 2019.
- [66] Z. Fan, Y. Tian, Q. Zhou, and C. Shi, "Enhanced magnetic abrasive finishing of Ti-6Al-4V using shear thickening fluids additives," *Precision Engineering*, vol. 64, pp. 300-306, 2020/07/01/ 2020.
- [67] Y. Tian, C. Shi, Z. Fan, and Q. Zhou, "Experimental investigations on magnetic abrasive finishing of Ti-6Al-4V using a multiple pole-tip finishing tool," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 7, pp. 3071-3080, 2020/02/01 2020.
- [68] Z. Peng, W.-L. Song, C.-L. Ye, P. Shi, and S.-B. Choi, "Model establishment of surface roughness and experimental investigation on magnetorheological finishing for polishing the internal surface of titanium alloy tubes," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 32, no. 12, pp. 1278-1289, 2021/07/01 2020.
- [69] S. Kumar, V. K. Jain, and A. Sidpara, "Nanofinishing of freeform surfaces (knee joint implant) by rotational-magnetorheological abrasive flow finishing (R-MRAFF) process," *Precision Engineering*, vol. 42, pp. 165-178, 2015/10/01/ 2015.

- [70] C. Prakash *et al.*, "Experimental investigation into nano-finishing of β -TNTZ alloy using magnetorheological fluid magnetic abrasive finishing process for orthopedic applications," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 11, pp. 600-617, 2021/03/01/ 2021.
- [71] S. Singh *et al.*, "Magneto-Rheological Fluid Assisted Abrasive Nanofinishing of β -Phase Ti-Nb-Ta-Zr Alloy: Parametric Appraisal and Corrosion Analysis," *Materials*, vol. 13, no. 22. doi: 10.3390/ma13225156
- [72] L. Nagdeve, V. K. Jain, and J. Ramkumar, "Differential finishing of freeform surfaces (knee joint) using R-MRAFF process and negative replica of workpiece as a fixture," *Machining Science and Technology*, vol. 22, no. 4, pp. 671-695, 2018/07/04 2018.
- [73] P. Bhavsar and D. Unune, *Magnetorheological Polishing Tool for Nano-Finishing of Biomaterials*. 2017.
- [74] B. Matthias *et al.*, "Fabrication of high precision metallic freeform mirrors with magnetorheological finishing (MRF)," in *Proc.SPIE*, 2013, vol. 8884, p. 88840S.
- [75] Z. Alam and S. Jha, "Modeling of surface roughness in ball end magnetorheological finishing (BEMRF) process," *Wear*, vol. 374-375, pp. 54-62, 2017/03/15/ 2017.
- [76] A. Sidpara, M. Das, and V. Jain, "Rheological Characterization of Magnetorheological Finishing Fluid," *Materials and Manufacturing Processes - MATER MANUF PROCESS*, vol. 24, pp. 1467-1478, 12/21 2009.
- [77] G. Revankar, R. Shetty, S. Rao, and V. Gaitonde, "Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy," *Measurement*, vol. 58, 12/01 2014.
- [78] Y. Tian, C. Shi, Z. Fan, and Q. Zhou, "Experimental investigations on magnetic abrasive finishing of Ti-6Al-4V using a multiple pole-tip finishing tool," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, 02/01 2020.
- [79] K. Kishore, M. K. Sinha, and S. R. Chauhan, "A comprehensive investigation of surface morphology during grinding of Inconel 625 using conventional grinding wheels," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 97, pp. 87-99, 2023/07/07/ 2023.
- [80] N. Hou, M. Wang, B. Wang, Y. Zheng, S. Zhou, and C. Song, "Fundamental functions of physical and chemical principles in the

- polishing of titanium alloys: mechanisms and problems," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 118, no. 7, pp. 2079-2097, 2022/02/01 2022.
- [81] G. Parameswari, V. K. Jain, J. Ramkumar, and L. Nagdeve, "Experimental investigations into nanofinishing of Ti6Al4V flat disc using magnetorheological finishing process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 100, no. 5, pp. 1055-1065, 2019/02/01 2019.
 - [82] A. Barman, M. Das, and V. K. Pathak, "Optimization of magnetic field assisted finishing process during nanofinishing of titanium alloy (grade-5) implant using soft computing approaches," *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 42, no. 6, pp. 920-935, 2022/11/02 2022.
 - [83] Q. Wang *et al.*, "Multi-Scale Surface Treatments of Titanium Implants for Rapid Osseointegration: A Review," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 6. doi: 10.3390/nano10061244
 - [84] S. Singh and C. Prakash, "Effect of cryogenic treatment on the microstructure, mechanical properties and finishability of β -TNTZ alloy for orthopedic applications," *Materials Letters*, vol. 278, p. 128461, 2020/11/01/ 2020.
 - [85] J. Liu, Z. Wang, and Z. Xu, "Electrochemical Polishing of Ti6Al4V Alloy Assisted by High-Speed Flow of Micro-Abrasive Particles in NaNO₃ Electrolyte," *Materials*, vol. 15, no. 22. doi: 10.3390/ma15228148
 - [86] X. Han *et al.*, "Surface modification techniques of titanium and titanium alloys for biomedical orthopaedics applications: A review," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 227, p. 113339, 2023/07/01/ 2023.
 - [87] D. Wu, S. Liu, and H. Wang, "High surface integrity machining of typical aviation difficult-to-machine material blade," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 129, no. 7, pp. 2861-2873, 2023/12/01 2023.
 - [88] M. Hourmand, A. Sarhan, M. Sayuti, and M. Hamdi, "A Comprehensive Review on Machining of Titanium Alloys," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 46, pp. 1-37, 03/01 2021.
 - [89] J. Dominguez-Caballero, S. Ayvar-Soberanis, J. Kim, A. Roy, L. Li, and D. Curtis, "Hybrid simultaneous laser- and ultrasonic-assisted machining of Ti-6Al-4V alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 125, no. 3, pp. 1903-1916, 2023/03/01 2023.

- [90] H. A. Soliman and M. Elbestawi, "Titanium aluminides processing by additive manufacturing – a review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, no. 9, pp. 5583-5614, 2022/04/01 2022.
- [91] H. Lu *et al.*, "The Roles of Magnetorheological Fluid in Modern Precision Machining Field: A Review," *Frontiers in Materials*, vol. 8, 2021.
- [92] W. Wang, S. Ji, and J. Zhao, "Review of magnetorheological finishing on components with complex surfaces," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023/06/11 2023.
- [93] D. Nguyen, J. Wu, N. M. Quang, L. A. Duc, and P. X. Son, "Applying fuzzy grey relationship analysis and Taguchi method in polishing surfaces of magnetic materials by using magnetorheological fluid," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, no. 5, pp. 1675-1689, 2021/01/01 2021.
- [94] Q. Zhai, W. Zhai, B. Gao, Y. Shi, and X. Cheng, "Synthesis and characterization of nanocomposite Fe₃O₄/SiO₂ core-shell abrasives for high-efficiency ultrasound-assisted magneto-rheological polishing of sapphire," *Ceramics International*, vol. 47, no. 22, pp. 31681-31690, 2021/11/15/ 2021.
- [95] J. Murata, Y. Ueno, K. Yodogawa, and T. Sugiura, "Polymer/CeO₂-Fe₃O₄ multicomponent core-shell particles for high-efficiency magnetic-field-assisted polishing processes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 101, 11/01 2015.
- [96] S. Shafrir *et al.*, "Zirconia Coated Carbonyl Iron Particle-Based Magnetorheological Fluid for Polishing Optical Glasses and Ceramics," *Applied optics*, vol. 48, pp. 6797-810, 12/01 2009.
- [97] F. Fang, "Polymeric nanobead coated carbonyl iron particles and their magnetic property," *physica status solidi (a)*, vol. 204, pp. 4190-4193, 12/01 2007.
- [98] P. Małecki, K. Kolman, J. Pięłowski, J. Kaleta, and J. Krzak, "Sol-gel method as a way of carbonyl iron powder surface modification for interaction improvement," *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 226, pp. 224-230, 2015/03/01/ 2015.
- [99] A. Bombard, M. Knobel, and M. Alcantara, "Phosphate coating on the surface of carbonyl iron powder and its effect in magnetorheological suspensions," *INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS B*, vol. 21, pp. 4858-4867, 11/10 2007.

- [100] J. Pan, Z. Chen, and Q. Yan, "Study on the rheological properties and polishing properties of SiO₂@CI composite particle for sapphire wafer," *Smart Materials and Structures*, vol. 29, no. 11, p. 114003, 2020/09/30 2020.
- [101] Q. Zhai, W. Zhai, and T. Deng, "Removal mechanism of the chemical products layer on single-crystal sapphire surface in magneto-rheological polishing with Fe₃O₄/SiO₂ core-shell abrasives," *Applied Surface Science*, vol. 619, p. 156778, 2023/05/15/ 2023.
- [102] Q. Zhai, W. Zhai, and T. Deng, "Study on process optimization of ultrasound assisted magneto-rheological polishing of sapphire hemisphere surface based on Fe₃O₄/SiO₂ core-shell abrasives," *Tribology International*, vol. 181, p. 108318, 2023/03/01/ 2023.
- [103] L. Zhang, W. Li, M. Lu, J. Lin, Y. Liu, and C. Liu, "Material removal mechanism of fused silica glass in magnetorheological finishing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 128, no. 3, pp. 1271-1289, 2023/09/01 2023.
- [104] J. Tian, H. Liu, J. Cheng, M. Chen, and B. Qin, "Improving the small ball-end magnetorheological polishing efficiency of fused silica workpiece by the promoting effect of water-bath heating and sodium hydroxide addition on polishing velocity and chemical reaction," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 123, no. 1, pp. 645-656, 2022/11/01 2022.
- [105] N. Minh Quang *et al.*, "A New Environmentally Friendly Chemical Mechanical Polishing Method Applied for Surface Finishing Ti-6Al-4V Alloy," *Journal of Machine Engineering*, 07/22 2023.
- [106] P. Yu *et al.*, "Theoretical foundation for designing multilayer Halbach array magnets for benchtop NMR and MRI," *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 344, p. 107322, 2022/11/01/ 2022.
- [107] A. Telfah, A. Bahti, K. Kaufmann, E. Ebel, R. Hergenröder, and D. Suter, "Low-field NMR with multilayer Halbach magnet and NMR selective excitation," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 21092, 2023/11/30 2023.
- [108] F. Ju *et al.*, "A Flexible Surgical Robot with Hemispherical Magnet Array Steering and Embedded Piezoelectric Beacon for Ultrasonic Position Sensing," *Advanced Intelligent Systems*, 2024.
- [109] C. Deng, L. Jiang, and L. Qian, "High-Efficiency Chemical Mechanical Polishing of Ti-6Al-4V Alloy via the Synergistic Action of H₂O₂ and K+

Under Alkaline Conditions," *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 11, 02/16 2022.

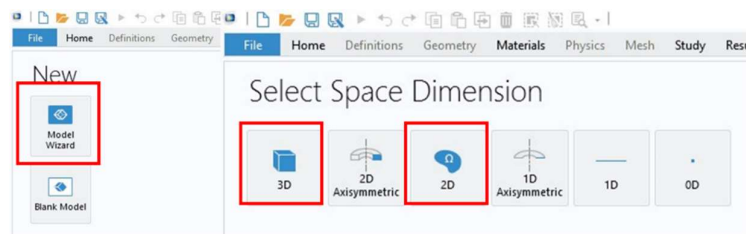
- [110] Z. Zhang, Z. Shi, Y. Du, Z. Yu, L. Guo, and D. Guo, "A novel approach of chemical mechanical polishing for a titanium alloy using an environment-friendly slurry," *Applied Surface Science*, vol. 427, pp. 409-415, 2018/01/01/ 2018.
- [111] C. Liang, W. Liu, S. Li, H. Kong, Z. Zhang, and Z. Song, "A nano-scale mirror-like surface of Ti-6Al-4V attained by chemical mechanical polishing*," *Chinese Physics B*, vol. 25, no. 5, p. 058301, 2016/04/05 2016.
- [112] Z. Bai, Q. Yan, J. Lu, and X. Xu, "Parametric investigation into accommodate-sinking effect of cluster magnetorheological effect pad," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 75, no. 9, pp. 1447-1456, 2014/12/01 2014.
- [113] Y. Q. Wang, S. H. Yin, H. Huang, F. J. Chen, and G. J. Deng, "Magnetorheological polishing using a permanent magnetic yoke with straight air gap for ultra-smooth surface planarization," *Precision Engineering*, vol. 40, pp. 309-317, 2015/04/01/ 2015.
- [114] W. Kordonski and S. Gorodkin, "Material removal in magnetorheological finishing of optics," *Applied Optics*, vol. 50, no. 14, pp. 1984-1994, 2011/05/10 2011.
- [115] W. Zhang, X. Gong, S. Xuan, and Y. Xu, "High-Performance Hybrid Magnetorheological Materials: Preparation and Mechanical Properties," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, 11/09 2010.
- [116] Y. Wang, Y. Wu, and M. Nomura, "Fundamental investigation on nano-precision surface finishing of electroless Ni-P-plated STAVAX steel using magnetic compound fluid slurry," *Precision Engineering*, vol. 48, 11/01 2016.
- [117] J. Pan, Q. Yan, X. Xu, H. Tong, J. Zhu, and Z. Bai, "Cluster magnetorheological effect plane polishing on SiC single crystal slice," *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering*, vol. 24, pp. 2495-2499, 01/01 2013.
- [118] J. Cao, Z. Ma, and M. Nie, "Investigation into Rheological Properties of Magnetorheological Polishing Slurry Using α -Cellulose as an Additive Agent and Its Polishing Performance," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 21, no. 11, pp. 2041-2050, 2020/11/01 2020.

- [119] Y. Q. Wang, S. H. Yin, H. Huang, F. Chen, and G. J. Deng, "Magnetorheological polishing using a permanent magnetic yoke with straight air gap for ultra-smooth surface planarization," *Precision Engineering*, vol. 40, 11/11 2014.
- [120] W. Fengchao, Y. Kaining, X. Nanzhe, L. Liucan, and G. Chuwen, "Quantitative analysis on the surface topography of Ti-6Al-4V machined by abrasive suspension jet," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, no. 1, pp. 323-332, 2021/01/01 2021.
- [121] X. Liang, Z. Liu, and B. Wang, "State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A review," *Measurement*, vol. 132, pp. 150-181, 2019/01/01/ 2019.
- [122] C. Wang *et al.*, "Magnetic field-assisted batch superfinishing on thin-walled components," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 223, p. 107279, 2022/06/01/ 2022.
- [123] Y. Guo, S. Yin, H. Ohmori, M. Li, F. Chen, and S. Huang, "A novel high efficiency magnetorheological polishing process excited by Halbach array magnetic field," *Precision Engineering*, vol. 74, pp. 175-185, 2022/03/01/ 2022.
- [124] M.-M. Lu, Y.-K. Yang, J.-Q. Lin, Y.-S. Du, and X.-Q. Zhou, "Research progress of magnetorheological polishing technology: a review," *Advances in Manufacturing*, vol. 12, no. 4, pp. 642-678, 2024/12/01 2024.
- [125] A. Gemeay, B. E. Keshta, R. El-Sharkawy, and A. Zaki, "Chemical insight into the adsorption of reactive wool dyes onto amine-functionalized magnetite/silica core-shell from industrial wastewaters," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, 09/01 2020.
- [126] M. Nie, J. Cao, J. Li, and M. Fu, "Magnet arrangements in a magnetic field generator for magnetorheological finishing," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 161-162, p. 105018, 2019/10/01/ 2019.
- [127] Z. Huang, Q. Yan, J. Pan, Z. Chen, and J. Lu, "Dynamic magnetic field magnetorheological finishing with constant load and variable gap," *Precision Engineering*, vol. 86, pp. 388-399, 2024/03/01/ 2024.
- [128] Y. Fang and J. Wu, "Influence of Excitation Parameters on Finishing Characteristics in Magnetorheological Finishing for 6063 Aluminum Alloy," *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 11, Jun 1 2024.

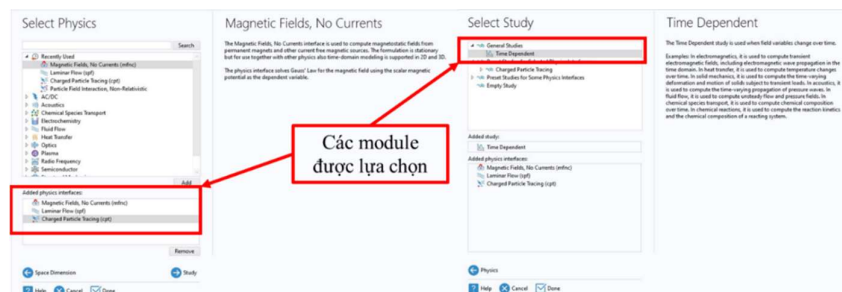
- [129] L. A. Duc, V. M. Yen, and N. D. Trinh, "Environmentally friendly chemical–magnetorheological finishing method for Ti–6Al–4V biological material based on $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$, oxaloacetate acid and H_2O_2 ," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 8, no. 2, pp. 228-240, 2025/03/01/ 2025.
- [130] C. Deng, L. Jiang, N. Qin, and L. Qian, "Effects of pH and H_2O_2 on the chemical mechanical polishing of titanium alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 295, p. 117204, 2021/09/01/ 2021.
- [131] S. Okawa and K. Watanabe, "Chemical mechanical polishing of titanium with colloidal silica containing hydrogen peroxide — mirror polishing and surface properties," *Dental Materials Journal*, vol. 28, no. 1, pp. 68-74, 2009.
- [132] Y.-j. Dai, H.-f. Pei, G.-s. Pan, and Y. Liu, "Nanoscale Planarization Mechanism of Titanium Chemical Mechanical Polishing," *TRIBOLOGY*, vol. 31, no. 2, pp. 131-136, 2011.
- [133] S. L. d. Assis, S. Wolyneć, and I. Costa, "Corrosion characterization of titanium alloys by electrochemical techniques," *Electrochimica Acta*, vol. 51, no. 8, pp. 1815-1819, 2006/01/20/ 2006.
- [134] J. Wang *et al.*, "Chemistry enhanced shear thickening polishing of Ti–6Al–4V," *Precision Engineering*, vol. 72, pp. 59-68, 2021/11/01/ 2021.
- [135] C. Deng, L. Jiang, and L. Qian, "High-Efficiency Chemical Mechanical Polishing of Ti-6Al-4V Alloy via the Synergistic Action of H_2O_2 and K^+ Under Alkaline Conditions," *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 11, no. 2, p. 024005, 2022/02/16 2022.
- [136] Z. Zhang, L. Liao, X. Wang, W. Xie, and D. Guo, "Development of a novel chemical mechanical polishing slurry and its polishing mechanisms on a nickel alloy," *Applied Surface Science*, vol. 506, p. 144670, 2020/03/15/ 2020.
- [137] J. Li, Z. Fan, Z. Yang, Y. Tian, and J. Gao, "Simulation and modeling of magnetorheological shear thickening polishing processes for slender tube," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 25, pp. 480-496, 2023/07/01/ 2023.

PHỤ LỤC 1

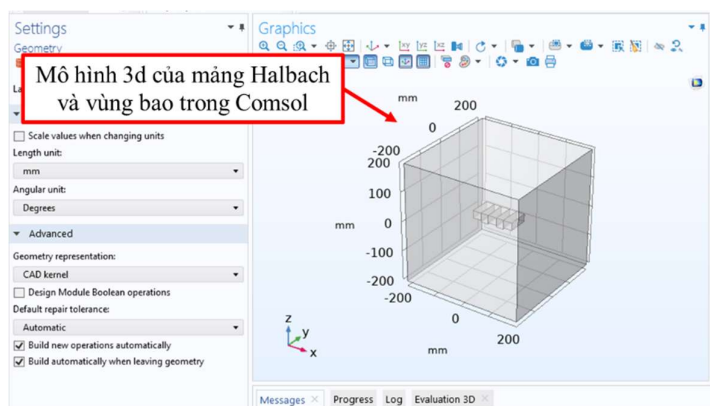
Trong phân tích từ trường cùng hàm recovery được thiết lập dựa trên mô-đun AC/DC trên phần mềm COMSOL Multiphysics. Các giao diện Magnetic Fields, No Currents được sử dụng trong xác định cường độ từ trường phân bố tại vùng làm việc. Đối với phân tích cường độ từ trường, cấu hình mảng Halbach với các kích thước nam châm khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng của gradient từ lên hiệu suất thu hồi hạt. Hướng nam châm trong mảng Halbach được thiết lập nhằm tối ưu hóa gradient từ tại vùng làm việc, cùng từ trường mạnh nhằm tác động lên hạt từ tính. Tuy nhiên, do gradient lớn là kết quả của sự suy giảm nhanh chóng của từ thông, nên từ thông và gradient từ của các nam châm đã được tính toán bằng COMSOL Multiphysics. Các thiết lập và đặc điểm mô phỏng trong COMSOL như được mô tả trong các hình sau:



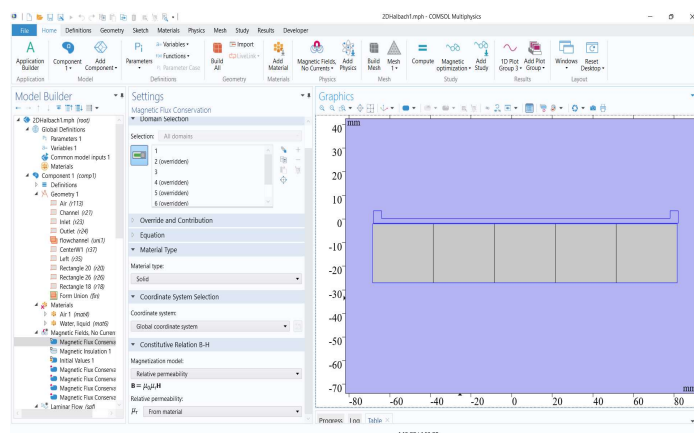
Hình P1.1 Giao diện mô phỏng với mô hình 3D, 2D và 1D trong phần mềm COMSOL Multiphysics



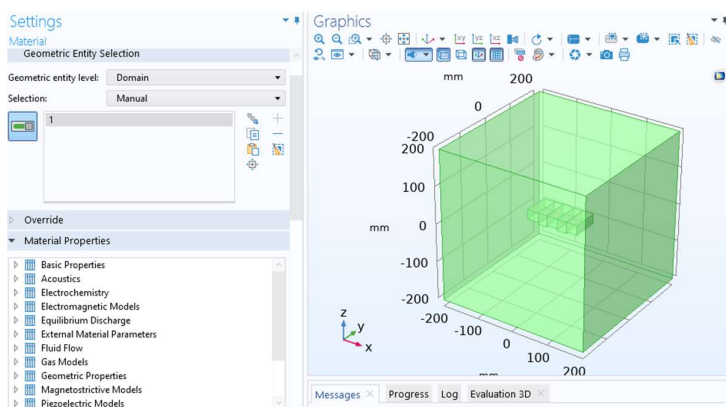
Hình P1.2 Lựa chọn đặc tính vật lý và tính chất hình học



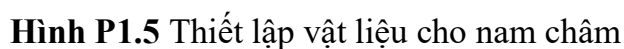
Hình P1.3 Thiết lập môi trường mô hình mô phỏng



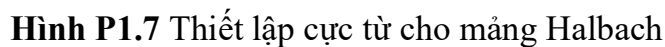
Hình P1.4 Thiết lập mô hình phân tích hàm hồi phục

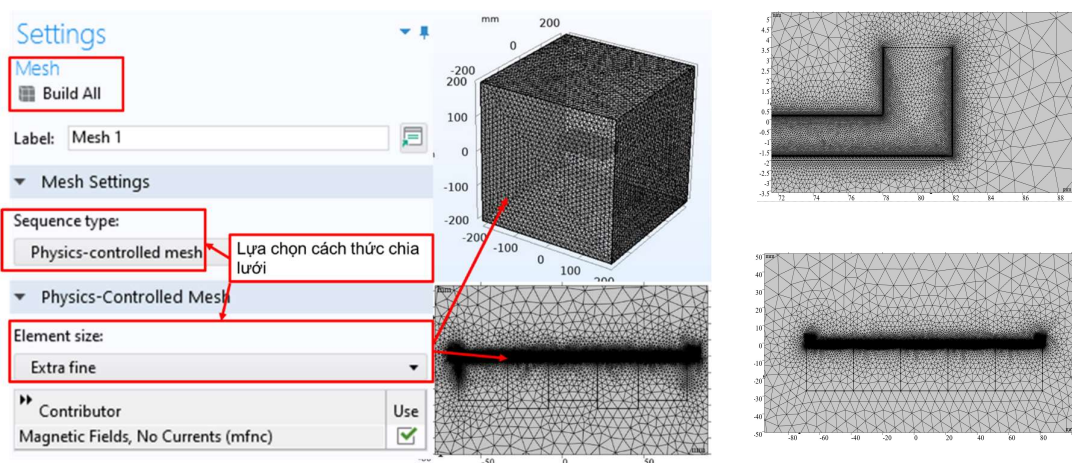


Hình P1.4 Lựa chọn đối tượng và gán vật liệu

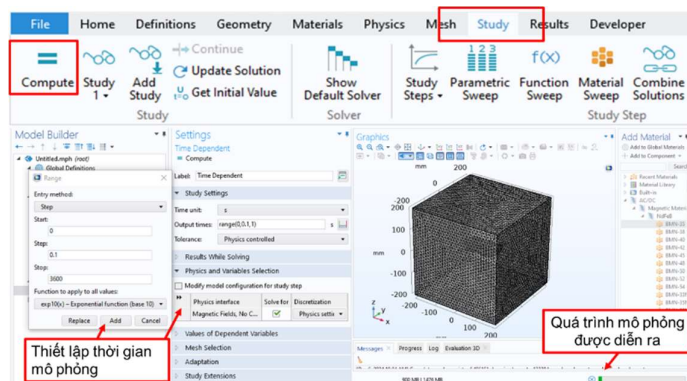


Hình P1.6 Các thiết lập gán vật liệu và các đặc tính của vật liệu

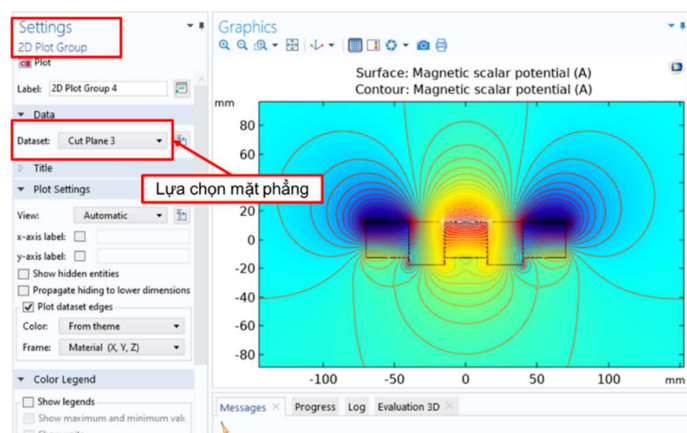




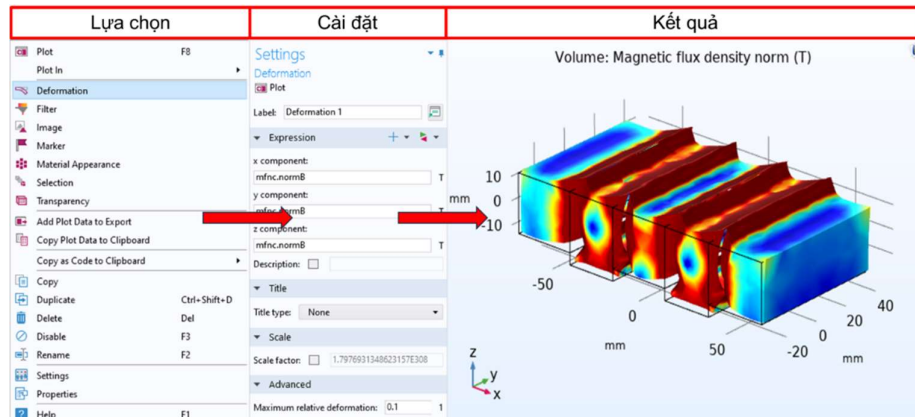
Hình P1.8 Chia lưới phần tử trong mô phỏng với COMSOL Multiphysics



Hình P1.9 Thiết lập thời gian và quá trình mô phỏng



Hình P1.10 Thiết lập và trích xuất kết quả



Hình P1.11 Phân tích sự thay đổi từ trường qua biểu đồ 3D để đánh giá độ hồi phục

Bảng P1.1 Thông số thiết lập của vật liệu nam châm

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Lực kháng từ (B_r)	12.6	kGs (kilo Gauss)
Lực cường chế (H_{cb})	≥ 11.4	kOe (kilo Oersted)
Lực cường chế nội tại (H_{cj})	≥ 20.0	kOe
Sản phẩm năng lượng tối đa (BH_{max})	35 - 37	MGOe
Mật độ (Density)	7.5	g/cm^3
Nhiệt độ làm việc tối đa (T_{max})	80	$^{\circ}C$
Hệ số nhiệt độ của B_r	-0.12	$\%/^{\circ}C$
Hệ số nhiệt độ của H_{cj}	-0.65	$\%/^{\circ}C$

Trong quá trình phân tích hàm hồi phục của mảng Halbach. Nam châm được mô hình hóa dưới dạng nam châm vĩnh cửu với chiều cao 30 mm. Lực từ di chuyển (magnetophoretic force) được tính toán dựa trên giả định rằng mỗi tế bào có tổng mômen từ là 10 fAm^2 . Từ trường được phân bố tại đầu vào cách thức đã được mô phỏng trước đó. Tỷ lệ hồi phục được xác định dựa thông số từ trường tại khu vực hoàn thiện nơi bố trí mảng Halbach. Để đánh giá sự tỷ lệ hồi phục

đã được tính toán như một hàm theo chiều rộng hoặc chiều cao của nam châm. Kết quả được phân tích với các bước tăng 0.05 mm trong phạm vi từ 20 mm đến 35 mm. Khi mô phỏng một mô hình có hiệu suất hồi phục tối đa nhỏ hơn 100%. Do đó, kích thước tối ưu của nam châm cũng sẽ phụ thuộc vào chiều cao của vị trí xét đến.

Bảng P1.2 Thiết lập đặc tính vật lý hạt từ tính Fe_3O_4 trong mô phỏng COMSOL Multiphysics

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Độ bão hòa từ (Saturation Magnetization)	2	T (Tesla)
Lực cưỡng chế (Coercivity)	1.6	kA/m
Độ từ dư (Remanence)	1.2	T (Tesla)
Hệ số từ nhiệt (Magnetization Temperature Coefficient)	-0.4	%/°C

PHỤ LỤC 2





