BỘ CÔNG THƯƠNG BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
VIỆN NGHIÊN CỨU CƠ KHÍ

NARIME

HOÀNG ANH TOÀN

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN NĂNG SUẤT VÀ CHẤT LƯỢNG KHI PHAY CỨNG BỀ MẶT TRỤ NGOÀI SỬ DỤNG BÔI TRƠN TỐI THIỂU VỚI HẠT NANO CuO

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ

HÀ NỘI - 2026

BỘ CÔNG THƯƠNG BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN NGHIÊN CỨU CƠ KHÍ

NARIME

HOÀNG ANH TOÀN

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN NĂNG SUẤT VÀ CHẤT LƯỢNG KHI PHAY CỨNG BỀ MẶT TRỤ NGOÀI SỬ DỤNG BÔI TRƠN TỐI THIỂU VỚI HẠT NANO CuO

LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH KỸ THUẬT CƠ KHÍ

Mã số: 9520103

Xác nhận	Người hướng dẫn 1	Người hướng dẫn 2
của Viện Nghiên cứu Cơ khí Giám đốc Trung tâm Đào tạo		
PGS.TS. Lê Thu Quý	GS.TS. Vũ Ngọc Pi	PGS.TS. Hoàng Văn Gợt

HÀ NỘI - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án**:" Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến năng suất và chất lượng khi phay cứng bề mặt trụ ngoài sử dụng bôi trơn tối thiểu với hạt nano CuO**. **"** là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của tập thể hướng dẫn khoa học là **GS.TS. Vũ Ngọc Pi** và **PGS.TS. Hoàng Văn Gợt**. Luận án sử dụng thông tin trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau và các thông tin trích dẫn được ghi rõ nguồn gốc. Các kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa vào luận án. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tác giả. Luận án được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Viện Nghiên cứu Cơ khí.

Hà Nội, ngày tháng năm 2026.

Tác giả luận án

Hoàng Anh Toàn

LỜI CẢM ƠN

Để hoàn thành Luận án Tiến sĩ này, ngoài sự cố gắng nỗ lực của bản thân, tôi đã nhận được sự động viên và giúp đỡ rất lớn của nhiều thầy giáo, cô giáo và tập thể nghiên cứu khoa học.

Trước tiên, tôi xin được bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới tập thể người hướng dẫn khoa học **GS.TS. Vũ Ngọc Pi** và **PGS.TS. Hoàng Văn Gợt**, những người thầy đã tận tình hướng dẫn, định hướng nghiên cứu, đào tạo và chỉ bảo tôi trong suốt quá trình nghiên cứu.

Tôi xin trân trọng cảm ơn lãnh đạo Viện Nghiên cứu Cơ khí và Trung tâm Đào tạo thuộc Viện Nghiên cứu Cơ khí cũng như Ban giám hiệu, Ban chủ nhiệm khoa Cơ khí của Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên đã tạo mọi điều kiện thuận lợi cho tôi trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu để hoàn thành luận án.

Để có được những kết quả như ngày hôm nay, tôi xin trân trọng cảm ơn sự giúp đỡ nhiệt tình của cán bộ, công nhân của Doanh nghiệp tư nhân Cơ khí Chính xác Thái Hà, Trung tâm Thí nghiệm thực hành khoa Cơ khí, Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp đã giúp đỡ tôi hoàn thành các công việc liên quan đến thí nghiệm, thực nghiệm và đo đạc.

Tôi xin trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ giúp đỡ của đồng nghiệp tại Trung tâm Thí nghiệm thực hành khoa Cơ khí, Bộ môn Cơ sở Thiết kế máy và Robot, khoa Cơ khí, Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên đã dành những điều kiện thuận lợi để tôi hoàn thành luận án của mình.

Cuối cùng tôi gửi lời cảm ơn và biết ơn sâu sắc tới gia đình, những người đã luôn động viên, chia sẻ giúp đỡ tôi về mặt tinh thần trong suốt thời gian qua.

Hà Nội, ngày tháng năm 2026

Tác giả luận án

Hoàng Anh Toàn

MỤC LỤC

LỜI CẢM ƠN iii
DANH MỤC HÌNH ẢNH viii
DANH MỤC BẢNG BIỂU xiii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU xiii
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT xiv
MỞ ĐẦU 1
1. Tính cấp thiết của đề tài 1
2. Mục tiêu nghiên cứu 2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu 2
4. Phương pháp nghiên cứu 2
4.1. Phương pháp lý thuyết 2
4.2. Phương pháp thực nghiệm 3
5. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn 3
5.1. Ý nghĩa khoa học 3
5.2. Ý nghĩa thực tiễn của đề tài 3
6. Những điểm mới của luận án 3
7. Cấu trúc của luận án 3
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU VỀ PHAY CỨNG, CÔNG NGHỆ BÔI TRƠN VÀ MÔ HÌNH HÓA - TỐI ƯU HÓA 5
1.1. Giới thiệu về phay cứng 5
1.2. Giới thiệu về công nghệ bôi trơn tối thiểu và nano-MQL 7
1.2.1. Nguyên lý và hiệu quả của công nghệ MQL 7
1.2.2. Nano-MQL và vai trò đặc biệt của hạt nano CuO 13
1.3. Các nghiên cứu về mô hình hóa và tối ưu hóa trong phay cứng 20
1.3.1. Các nghiên cứu về mô hình hóa quá trình phay cứng 20
1.3.2. Tối ưu hóa đơn mục tiêu trong gia công phay cứng 22
1.3.3. Tối ưu hóa đa mục tiêu trong gia công phay cứng 23
1.4. Vật liệu dụng cụ cắt trong gia công cứng 24
1.5. Tình hình nghiên cứu phay cứng ở Việt Nam 28
1.6. Khoảng trống nghiên cứu 31
1.7. Kết luận chương 1 32
CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU 34
2.1. Cơ sở lý thuyết về phay cứng 34
2.1.1. Cơ chế hình thành phoi khi phay cứng 34
2.1.2. Cơ chế sinh nhiệt và ứng xử nhiệt-cơ của vật liệu 38

2.1.4. Cơ chế mòn dao trong phay cứng 46
2.1.5. Các chỉ tiêu đánh giá quá trình phay cứng 48
2.3. Phương pháp thiết kế thí nghiệm và định hướng lựa chọn thiết kế 58
2.4. Phương pháp mô hình hóa 60
2.4.1. Mô hình hồi quy bề mặt đáp ứng (RSM) 60
2.4.2. Mô hình học máy trong gia công 60
2.4.3. Mô hình Gaussian Process Regression (GPR) 61
2.4.4. Đánh giá và lựa chọn mô hình 61
2.4.5. Nhận xét và định hướng lựa chọn mô hình 61
2.5. Phương pháp tối ưu hóa 62
2.5.1. Tối ưu hóa đơn mục tiêu 62
2.5.2. Tối ưu hóa đa mục tiêu 62
2.5.3. Thuật toán NSGA-II 62
2.5.4. Kết hợp mô hình hóa và tối ưu hóa 63
2.5.5. Nhận xét và định hướng áp dụng 63
2.6. Kết luận chương 2 64
CHƯƠNG 3: HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM VÀ ĐIỀU KIỆN NGHIÊN CỨU ... 65
3.1. Giới thiệu 65
3.2. Thiết bị gia công và hệ thống thí nghiệm 66
3.2.1. Trung tâm phay CNC 66
3.2.2. Thiết bị đo lực Kistler 9257BA 67
3.2.3 Cân điện tử WT3003NE 68
3.3. Điều kiện bôi trơn-làm mát và thông số thí nghiệm 68
3.4. Setup thí nghiệm 69
3.5. Thiết kế thí nghiệm 70
3.5.1. Các biến công nghệ và yếu tố phân loại 71
3.5.2. Thiết kế bề mặt đáp ứng có phân khối 71
3.5.3. Đường kính dao phay như một biến rời rạc và chiến lược thu thập dữ liệu 72
3.5.4. Lặp thí nghiệm và xử lý dữ liệu đầu ra 72
3.5.5. Chiến lược theo đường kính dao: 75
3.6. Phương pháp đo và xác định đại lượng đầu ra 76
3.6.1. Đo độ nhám bề mặt (Ra) 76
3.6.2. Đo lực cắt (F) 76
3.6.3. Xác định tốc độ bóc tách vật liệu (MRR) 77
3.7. Kết luận chương 3 77

CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ MÔ HÌNH HÓA QUÁ TRÌNH PHAY CỨNG BỀ MẶT TRỤ NGOÀI THÉP 90CrSi DƯỚI ĐIỀU KIỆN NANO-MQL SỬ DỤNG HẠT CuO 79
4.1. Kết quả thực nghiệm 79
4.2. Phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ 80
4.2.1. Ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt (Ra) 80
4.2.2. Ảnh hưởng đến năng suất bóc tách (MRR) 83
4.2.3. Ảnh hưởng đến lực cắt (F) 86
4.3. Phân tích phương sai (ANOVA) của các mô hình 90
4.3.1. ANOVA cho mô hình độ nhám bề mặt (Ra) 90
4.3.2. ANOVA cho mô hình năng suất bóc tách (MRR) 91
4.3.3. ANOVA cho mô hình lực cắt (F) 92
4.4. Mô hình hóa ba hàm mục tiêu bằng RSM 93
4.4.1. Mục tiêu mô hình hóa 93
4.4.2. Mô hình hồi quy cho độ nhám bề mặt (Ra) 94
4.4.3. Mô hình hồi quy cho năng suất bóc tách vật liệu (MRR) 96
4.4.4. Mô hình hồi quy cho lực cắt tổng hợp (F) 98
4.4. Kết luận chương 4 100
CHƯƠNG 5: TỐI ƯU HÓA QUÁ TRÌNH PHAY CỨNG BỀ MẶT TRỤ NGOÀI THÉP 90CrSi DƯỚI ĐIỀU KIỆN NANO-MQL SỬ DỤNG HẠT CuO101
5.1. Tối ưu hóa đơn mục tiêu 101
5.1.1. Mục tiêu và phương pháp tối ưu hóa 101
5.1.2. Tối ưu hóa độ nhám bề mặt (Ra) 102
5.1.3. Tối ưu hóa năng suất bóc tách vật liệu (MRR 103
Tối ưu hóa năng suất bóc tách vật liệu (MRR 103
5.1.4. Tối ưu hóa lực cắt tổng hợp (F) 103
5.1.5. Kiểm chứng thực nghiệm 103
5.2. Cơ sở lý thuyết của tối ưu hóa đa mục tiêu và thuật toán NSGA-II 104
5.2.1. Bản chất của bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu 104
5.2.2. Khái niệm tập Pareto và biên Pareto 104
5.2.3. Các phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu 105
5.2.4. Thuật toán NSGA-II 105
5.3. Các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí 106
5.3.1. Phương pháp TOPSIS 106
5.3.2. Phương pháp MARCOS 107
5.3.3. Phương pháp EAMR 109

5.4. Thiết lập bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu bằng NSGA-II 111
5.4.1 Biến đầu vào và các hàm mục tiêu 111
5.4.2. Các ràng buộc công nghệ 112
5.4.3. Chuyển đổi và thống nhất hướng tối ưu hóa các hàm mục tiêu 112
5.4.4. Thiết lập tham số của thuật toán NSGA-II 113
5.4.5. Quy trình tối ưu hóa bằng NSGA-II 114
5.4.6. Xác định nghiệm Knee trên biên Pareto 115
5.5. Kết quả và thảo luận 116
5.5.8. Kiểm chứng thực nghiệm 122
5.6. Kết luận chương 5 123
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ 125
1. Kết luận 125
2. Hướng nghiên cứu tiếp 127
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN HƯỚNG NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN VĂN 128
TÀI LIỆU THAM KHẢO 129
PHỤ LỤC 1 137
PHỤ LỤC 2 140
PHỤ LỤC 3 142

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1: Khuôn phay cứng [1] 6
Hình 1.2: Khuôn điện thoại di động tạo bởi phay cứng và chế độ phay cứng đã dùng [1].....6
Hình 1.3. Chày dập thuốc viên định hình.....6
Hình 1.5. Sơ đồ nguyên lý hệ thống bôi trơn tối thiểu (MQL), trong đó dung dịch bôi trơn được trộn với khí nén và phun dưới dạng sương mù vào vùng cắt nhằm nâng cao hiệu quả làm mát và bôi trơn. 8
Hình 1.6. Thời gian bay hơi của giọt trong vùng cắt phụ thuộc vào kích thước giọt và lưu lượng nhũ tương [12].....9
Hình 1.7: Ảnh SEM và phân tích EDS bề mặt gia công thép X10CrNi18-8 [12] ...11
Hình 1.8. Ảnh hưởng trung bình của các phương pháp làm mát (tiền làm lạnh, phương pháp bôi trơn và loại dung dịch cắt) đến độ nhám bề mặt (Ra) [16]12
Hình 1.9. Ảnh hưởng trung bình của các phương pháp làm mát đến công suất cắt (Power Index – PI) [16] 12
Hình 1.10. So sánh độ dẫn nhiệt của một số vật liệu hữu cơ, chất lỏng truyền nhiệt, kim loại và oxit kim loại [28] 14
Hình 1.11. Biểu đồ xếp hạng các loại hạt nano theo tần suất nghiên cứu trong các công trình về nanofluid [28] 15
Hình 1.12. Giá trị trung bình của độ nhám bề mặt Ra dưới các điều kiện gia công khác nhau (cắt khô, MQL, MQCL và MQCL với nanofluid MoS_2) [29]..16
Hình 1.13. So sánh vi cấu trúc và biên dạng bề mặt sau gia công trong các điều kiện khác nhau: (a) gia công khô với sự xuất hiện rõ rệt của lớp trắng (white layer) và vết cháy (burn mark), bề mặt không ổn định; (b) gia công dưới điều kiện MQCL sử dụng nanofluid MoS_2 (0.2 wt%), cho thấy bề mặt đồng đều hơn, giảm đáng kể khuyết tật và cải thiện profile bề mặt [29] ..16
Hình 1.14. So sánh lực cắt khi sử dụng các loại nanofluid trên nền dầu thực vật khác nhau và các loại hạt nano khác nhau [31] 17
Hình 1.15. Ảnh hưởng của các loại nanofluid trên nền dầu thực vật đến độ nhám bề mặt gia công.....18
Hình 1.16. Cơ chế tương tác giữa hạt nano và dầu nền trong điều kiện bôi trơn biên [31].....18
Hình 1.17. Minh họa bổ sung cơ chế tương tác giữa hạt nano và bề mặt tiếp xúc trong vùng cắt [31].....19

Hình 1.18. Phân tích EDS bề mặt gia công dưới điều kiện MQL sử dụng nanofluid Al_2O_3, cho thấy sự hiện diện của các nguyên tố từ hạt nano và sự hình thành lớp tribofilm trên bề mặt [32] 19
Hình 1.19. Phân tích EDS bề mặt gia công dưới điều kiện MQL sử dụng nanofluid CuO, thể hiện thành phần nguyên tố đặc trưng và mức độ hình thành lớp màng bôi trơn trên bề mặt gia công [32] 20
Hình 1.20. Ảnh hưởng chính của các thông số công nghệ (nồng độ hạt nano, tốc độ cắt và lượng chạy dao) đến lực cắt tổng F. 20
Hình 1.21. Kết quả thử nghiệm scratch của lớp phủ trên nền thép AISI D2, thể hiện tín hiệu phát xạ âm thanh (AE) theo lực tác dụng và xác định tải tới hạn gây bong tróc lớp phủ [65].....25
Hình 1.22. Sự thay đổi mòn rãnh (notch wear) và hình ảnh dụng cụ sau gia công theo chiều dài cắt khi phay Ti6Al4V [65].....26
Hình 1.23. So sánh chiều dài cắt đạt được đến khi đạt giới hạn mòn của các dụng cụ phủ và không phủ [65] 27
Hình 2.1 : Hình thái phoi thu được trong phay cao tốc thép đã tôi cứng: (a) phoi liên tục với biến dạng đồng đều; (b) phoi răng cưa với dải cắt biến dạng cục bộ, cho thấy sự chuyển đổi hình thái khi tăng tốc độ cắt [1] 37
Hình 2.2: Cấu trúc chi tiết của phoi răng cưa trong phay cứng: vi nứt xuất hiện ở vùng A và các vết cắt phân đoạn do nhiệt tập trung ở vùng B, minh họa sự khác biệt về biến dạng cục bộ trong quá trình hình thành phoi [96] 38
Hình 2.3. Bề mặt ứng suất - biến dạng - nhiệt độ của các bộ tham số vật liệu được so sánh [98]. 39
Hình 2.4. Sự thay đổi của lực cắt chính theo tốc độ cắt [98]. 40
Hình 2.5. Sự thay đổi của nhiệt độ tiếp xúc theo tốc độ cắt [98]. 40
Hình 2.6. So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm đối với: (a) lực cắt chính; (b) lực hướng kính; (c) nhiệt độ vùng cắt; và (d) chiều dày phoi [99]. 41
Hình 2.7. Ảnh hưởng của sự thay đổi các tham số trong mô hình Johnson-Cook đến đường cong ứng suất–biến dạng tại các tốc độ biến dạng khác nhau [99] 41
Hình 2.8: Các điều kiện biên nhiệt – cơ trong mô phỏng phần tử hữu hạn phay cứng [35] 42
Hình 2.9: Phân bố nhiệt độ trong mô hình phay cứng thép AISI H13 (ap = 0,8 mm, ae = 0,6 mm, vc = 280 m/phút, fz = 0,35 mm/răng), cho thấy vùng nhiệt độ cực đại tập trung ở phía phải của bề mặt tiếp xúc dao–phôi, nơi chiều dày phoi đạt giá trị lớn nhất [63] 43

Hình 2.10: Biểu đồ so sánh nhiệt độ cắt khi phay thép Strenx 900 trong hai điều kiện khô (Dry) và bôi trơn tối thiểu (MQL) ở các thông số cắt khác nhau [36] 43
Hình 2.11. Mô hình phân chia giao diện dao-phoi thành hai vùng tiếp xúc đặc trưng [101]. 44
Hình 2.12. Vùng mòn trên mặt trước của dụng cụ khi phay thép SKD11 ở các nhiệt độ gia công khác nhau [102] 45
Hình 2.13. Ảnh hưởng của nhiệt độ gia công hỗ trợ nhiệt (TAM) đến khối lượng mòn (a) và chiều cao mòn (b) của dụng cụ khi phay tốc độ cao thép SKD11 [102] 46
Hình 2.10. Ảnh hưởng của nhiệt độ và tốc độ cắt đến mòn dao và độ nhám bề mặt khi phay tốc độ cao thép SKD11 trong điều kiện gia công hỗ trợ nhiệt (TAM)) [107]. 48
Hình 2.11. Các lợi ích của công nghệ gia công khô đối với chi phí sản xuất, môi trường và điều kiện lao động [108] 49
Hình 2.12. Cấu trúc của hệ thống bôi trơn tối thiểu (MQL) [108] 50
Hình 2.13. So sánh nhiệt độ dụng cụ khi khoan dưới các điều kiện gia công khô, MQL và gia công ngập [108] 51
Hình 2.14. So sánh hiệu suất tarô khi sử dụng các môi chất MQL khác nhau với gia công khô và gia công ngập [109] 51
Hình 2.15. So sánh độ nhám bề mặt khi tiện dưới các điều kiện bôi trơn khác nhau [110] 52
Hình 2.16. So sánh lực cắt tổng hợp khi tiện thép H13 dưới điều kiện làm mát bằng nitơ lỏng và làm mát ngập ở các tốc độ cắt và chiều sâu cắt khác nhau [111] 53
Hình 2.17. Độ nhám bề mặt khi tiện thép H13 dưới các điều kiện làm mát bằng nitơ lỏng và làm mát ngập [111] 53
Hình 2.18. So sánh trạng thái mòn của dụng cụ khi tiện thép H13 bằng nitơ lỏng và làm mát ngập [111] 54
Hình 2.19. So sánh lực cắt khi phay thép H13 dưới điều kiện làm mát bằng nitơ lỏng và làm mát ngập [111] 54
Hình 2.20. So sánh độ nhám bề mặt khi phay thép H13 dưới điều kiện làm mát bằng nitơ lỏng và làm mát ngập [111] 54
Hình 2.21. Sơ đồ nguyên lý của hệ thống Cryogenic MQL đa chức năng [18] 55
Hình 2.22. Các cơ chế truyền nhiệt, thâm nhập và bôi trơn của công nghệ Nano-MQL [18] 56

Hình 2.23. Ảnh hưởng của các loại nano-fluid đến tỷ số mài (G-ratio) và hệ số ma sát trong gia công [18]. 56
Hình 3.1. Trung tâm phay đứng Mazak VCS 530C 66
Hình 3.2:Thiết bị đo lực KISTTLER 9257BA....67
Hình 3.3: Cân điện tử WT3003NE....68
Hình 3.4: Setup thí nghiệm và mẫu thép gia công: (a) Hệ thống phay CNC cho quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài của thép 90CrSi dưới điều kiện bôi trơn-làm mát nano-MQL (CuO); (b) Các mẫu thép 90CrSi sau khi gia công thực nghiệm; c) Sơ đồ quá trình gia công-tạo hình bề mặt trụ ngoài; d) bản vẽ phôi....69
Hình 3.5. Biểu diễn hình học của thiết kế BBD có phân khối trong không gian vc, fz, ap; màu sắc biểu thị các mức $Davg$, còn ký hiệu biểu thị loại điểm thí nghiệm (trung tâm cạnh, tâm và điều chỉnh). 75
Hình 3.6: Sơ đồ xác định lực cắt tổng hợp F từ các lực cắt thành phần 77
Hình 4.1. Biểu đồ hiệu ứng chính của các thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt (Ra) 80
Hình 4.2. Biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa (standardized effects) của mô hình RSM cho Ra....81
Hình 4.3. Giá trị tuyệt đối của các hệ số hồi quy chuẩn hóa (|β|) của mô hình RSM bậc hai cho Ra....82
Hình 4.4. Đồ thị đường đồng mức của Ra theo vc và fz 82
Hình 4.5. Biểu đồ hiệu ứng chính của các thông số công nghệ đến năng suất bóc tách vật liệu (MRR) 83
Hình 4.6. Biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa (standardized effects) của mô hình RSM cho MRR 85
Hình 4.7. Giá trị tuyệt đối của các hệ số hồi quy chuẩn hóa $|\beta|$ của mô hình RSM bậc hai cho MRR 85
Hình 4.8. Đồ thị đường đồng mức của MRR theo vc và fz khi các yếu tố khác giữ ở giá trị trung bình 86
Hình 4.9. Biểu đồ hiệu ứng chính của các thông số công nghệ đến lực cắt F 87
Hình 4.10. Biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa (standardized effects) của mô hình RSM cho lực cắt F....88
Hình 4.11. Giá trị tuyệt đối của các hệ số hồi quy chuẩn hóa $|\beta|$ của mô hình RSM bậc hai cho lực cắt F 89
Hình 4.12. Đồ thị đường đồng mức của lực cắt F theo vc và fz khi các yếu tố khác giữ ở giá trị trung bình 89

Hình 5.1: Sơ đồ khối thuật toán NSGA-II áp dụng cho bài toán tối ưu đa mục tiêu114
Hình 5.2. So sánh giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm của các mô hình GPR cho MRR, Ra và F. 116
Hình 5.3. Sự thay đổi của chỉ số Hypervolume theo số thế hệ tiến hóa của thuật toán NSGA-II. 117
Hình 5.4. Sự tiến hóa của tập nghiệm Pareto tại các thế hệ khác nhau của thuật toán NSGA-II. 117
Hình 5.5. Tập nghiệm Pareto cuối cùng trong không gian mục tiêu MRR-Ra-F... 118
Hình 5.6. Các quan hệ hai chiều giữa MRR, Ra và F trên biên Pareto. 118
Hình 5.7. Khoảng cách từ các nghiệm Pareto đến mặt phẳng CHIM 119
Hình 5.8. Vị trí nghiệm Knee trên các mặt phẳng MRR-Ra, MRR-F và Ra-F. 119

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 2.1. Hiệu quả của các công nghệ bôi trơn-làm mát khác nhau [18] 57
Bảng 3.1. Thông số kỹ thuật chính của Trung tâm phay đứng Mazak VCS 530C ...66
Bảng 3.2 Thông số kỹ thuật của cân điện tử WT3003NE.....68
Bảng 3.3. Thông số hình học của các dao phay sử dụng trong thí nghiệm 70
Bảng 3.4. Ma trận thiết kế thí nghiệm (DOE) cho nghiên cứu phay cứng dựa trên BBD có phân khối, bao gồm các mức của yếu tố và phân loại điểm (biên-tâm, tâm và điểm điều chỉnh).....73
Bảng 4.1. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho mô hình Ra 90
Bảng 4.2. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho mô hình MRR.....91
Bảng 4.3. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho mô hình F 92
Bảng 5.1. Kết quả kiểm chứng thực nghiệm các nghiệm tối ưu đơn mục tiêu.....104
Bảng 5.2. Các biến đầu vào và miền khảo sát sử dụng trong bài toán tối ưu đa mục tiêu.....111
Bảng 5.3. Các tham số của thuật toán NSGA-II và mô hình GPR 113
Bảng 5.4. Một số kết quả tính toán và xếp hạng các phương án bằng phương pháp TOPSIS. 121
Bảng 5.5. Một số kết quả tính toán và xếp hạng các phương án bằng phương pháp MARCOS.....121
Bảng 5.6. Một số kết quả tính toán và xếp hạng các phương án bằng phương pháp EAMR. 121
Bảng 5.7. So sánh các nghiệm được lựa chọn bởi các phương pháp MCDM và nghiệm Knee. 122
Bảng 5.8. So sánh giữa giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm tại chế độ công nghệ tối ưu được lựa chọn bởi phương pháp EAMR. 123

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị
a_p	Chiều sâu cắt	mm
v_c	Tốc độ cắt	vòng/phút
D_{avg}	Kích thước trung bình hạt nano	nm
f_z	Lượng chạy dao răng	mm/răng
D_t	Đường kính dao	mm
R_a	Giá trị nhám bề mặt	μm
MRR	năng suất bóc tách vật liệu	g/phút
Fx	Lực cắt theo phương X	N
Fy	Lực cắt theo phương Y	N
Fz	Lực cắt theo phương Z	N
F	Lực cắt tổng hợp theo 3 phương XYZ	N

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

Ký hiệu	Tiếng Anh	Tiếng Việt
MQL	Minimum Quantity Lubrication	Bôi Trơn tối thiểu
MQCL	Minimum Quantity Cooling Lubrication	Làm mát và bôi Trơn tối thiểu
CBN	Cubic Boron Nitride	Khối bo nitorat dạng lập phương
CNC	Computer Numerical Control	Máy điều khiển số
EDM	Electrical Discharge Machining	Gia công bằng tia lửa điện
PMEDM	Powder Mixed Electrical Discharge Machining	Gia công bằng tia lửa điện có trộn bột vào chất điện môi
HRC	Hardness Rockwell C	Độ cứng Rockwellthang C
RSM	Response Surface Method	Phương pháp đáp ứng bề mặt
GPR	Gaussian Process Regression	Hồi quy quá trình Gaussian
FEM	Finite Element Method	Phương pháp phần tử hữu hạn
BBD	Box–Behnken design	Dạng thiết kế thí nghiệmtheo BBD
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II	Thuật toán di truyền đa mục tiêu
AHP	Analytic Hierarchy Process	Phương pháp phân tích thứ bậc
HSM	High-Speed Machining	Gia công tốc độ cao
MOO	Multi-Objective Optimization	Tối ưu đa mục tiêu

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Trên thực tế sản xuất cơ khí, các bề mặt trụ định hình lồi xuất hiện rất phổ biến trong nhiều loại chi tiết và khuôn mẫu, đặc biệt là các chày dập định hình, chày dập thuốc viên, chày dập thép tấm và các chi tiết chịu tải, chịu mài mòn cao. Các bề mặt này có thể được gia công bằng nhiều phương pháp khác nhau như mài, tiện hoặc phay, tùy thuộc vào yêu cầu về hình dạng, độ chính xác và điều kiện sản xuất.

Trong đó, phương pháp mài bề mặt trụ định hình thường được thực hiện trên máy mài CNC hoặc máy mài chuyên dùng. Phương pháp này cho chất lượng bề mặt cao và độ chính xác tốt, phù hợp với các yêu cầu gia công tinh và siêu tinh. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của gia công mài là chi phí đầu tư thiết bị và đồ gá cao, năng suất thấp hơn so với gia công cắt gọt, đồng thời tính linh hoạt trong sản xuất đơn chiếc hoặc loạt nhỏ còn hạn chế.

Gần đây, một số nghiên cứu đã đề cập đến việc gia công bề mặt trụ định hình bằng phương pháp xung tia lửa điện (EDM) và xung tia lửa điện có trộn bột (PMEDM). Các phương pháp này cho phép gia công các vật liệu có độ cứng rất cao và biên dạng phức tạp. Tuy nhiên, EDM và PMEDM thường có năng suất bóc tách vật liệu thấp, thời gian gia công dài, chi phí điện cực lớn và khó đảm bảo chất lượng bề mặt đồng đều cho các chi tiết có yêu cầu cao về năng suất sản xuất.

Trong khi đó, phương pháp phay cứng trên máy phay CNC được xem là một hướng tiếp cận tiềm năng nhằm thay thế hoặc giảm bớt các nguyên công mài và EDM trong chuỗi gia công. Phay cứng cho phép gia công trực tiếp vật liệu đã nhiệt luyện, rút ngắn quy trình công nghệ, nâng cao tính linh hoạt và phù hợp với xu hướng gia công tích hợp. Mặc dù đã có khá nhiều nghiên cứu về gia công các bề mặt định hình bằng mài, tiện và phay trên các vật liệu khác nhau, nhưng cho đến nay chưa ghi nhận các nghiên cứu có hệ thống về phay cứng bề mặt trụ định hình vật liệu thép 90CrSi sau tôi trên máy phay CNC.

Thép 90CrSi là loại thép dụng cụ hợp kim có độ cứng và khả năng chống mài mòn cao, được sử dụng rộng rãi trong chế tạo khuôn và các chi tiết dập. Việc gia công phay cứng các bề mặt trụ định hình trên vật liệu này đặt ra nhiều thách thức do lực cắt lớn, sinh nhiệt mạnh và yêu cầu cao về chất lượng bề mặt. Đồng thời, nhu cầu thực tế về gia công các chi tiết có dạng bề mặt này trong công nghiệp ngày càng tăng, đòi hỏi các giải pháp gia công hiệu quả hơn về kỹ thuật và kinh tế.

Xuất phát từ những yêu cầu thực tiễn và khoảng trống nghiên cứu nêu trên, đề tài *"Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến năng suất và chất lượng quá trình phay cứng khi gia công bề mặt trụ ngoài trên máy phay CNC"* có

tính cấp thiết cao, vừa góp phần bổ sung cơ sở khoa học cho lĩnh vực phay cứng, vừa mở ra khả năng ứng dụng thực tiễn trong sản xuất cơ khí chính xác.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của luận án là nâng cao hiệu quả quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi thông qua việc kết hợp công nghệ nano-MQL với các phương pháp mô hình hóa và tối ưu hóa hiện đại.

Các mục tiêu cụ thể gồm:

- Thiết lập cơ sở dữ liệu thực nghiệm phục vụ phân tích quá trình;
- Làm rõ ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt, năng suất bóc tách vật liệu và lực cắt;
- Xây dựng các mô hình dự đoán bằng phương pháp RSM và GPR;
- Thực hiện tối ưu hóa đơn mục tiêu và đa mục tiêu nhằm xác định chế độ cắt tối ưu;
- Đề xuất chế độ gia công cân bằng, có khả năng ứng dụng trong thực tế sản xuất.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi trên máy phay CNC dưới điều kiện bôi trơn–làm mát nano-MQL sử dụng hạt nano CuO.

Phạm vi nghiên cứu bao gồm:

- Vật liệu phôi: thép 90CrSi đã nhiệt luyện (vùng phay cứng).
- Dạng bề mặt: bề mặt trụ ngoài định hình.
- Công nghệ bôi trơn–làm mát: nano-MQL với hạt nano CuO.
- Các chỉ tiêu đánh giá: độ nhám bề mặt (Ra), năng suất bóc tách vật liệu (MRR, g/phút) và lực cắt tổng hợp (F).

4. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu tổng hợp, kết hợp giữa phương pháp lý thuyết và phương pháp thực nghiệm nhằm phân tích, mô hình hóa và nâng cao hiệu quả quá trình phay cứng bề mặt trụ định hình thép 90CrSi trên máy phay CNC dưới điều kiện nano-MQL sử dụng hạt CuO.

4.1. Phương pháp lý thuyết

Phương pháp lý thuyết được áp dụng để xây dựng cơ sở khoa học cho nghiên cứu, bao gồm phân tích cơ chế phay cứng và mô hình hóa mối quan hệ giữa các thông số công nghệ và các đại lượng đầu ra. Mô hình RSM được sử dụng để dự đoán độ nhám bề mặt, năng suất bóc tách vật liệu và lực cắt. Trên cơ sở đó, các bài toán tối ưu đơn mục tiêu và tối ưu đa mục tiêu được giải quyết bằng thuật toán

NSGA-II, kết hợp với phương pháp AHP và điểm Knee để lựa chọn chế độ gia công tối ưu tổng thể.

4.2. Phương pháp thực nghiệm

Phương pháp thực nghiệm được triển khai nhằm xây dựng cơ sở dữ liệu và kiểm chứng các mô hình lý thuyết. Các thí nghiệm phay cứng được tiến hành trên máy phay CNC với hệ thống nano-MQL sử dụng hạt CuO và dùng dao phay ngón hợp kim cứng phủ nano composite. Các đại lượng đầu ra gồm độ nhám bề mặt, năng suất bóc tách vật liệu và lực cắt tổng hợp được đo lường bằng các thiết bị chuyên dụng. Kết quả thực nghiệm được xử lý thống kê và sử dụng để xây dựng mô hình, cũng như thực hiện các thí nghiệm kiểm chứng cho các chế độ cắt tối ưu.

5. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn

5.1. Ý nghĩa khoa học

Luận án góp phần làm rõ cơ chế ảnh hưởng của các thông số công nghệ và điều kiện nano-MQL đến hiệu quả phay cứng thép 90CrSi khi sử dụng dao phay ngón hợp kim cứng phủ nano composite. Đồng thời, luận án đề xuất khung phương pháp tích hợp RSM – GPR – NSGA-II – AHP cho tối ưu hóa đa mục tiêu, đóng góp về mặt phương pháp luận trong lĩnh vực gia công cơ khí chính xác.

5.2. Ý nghĩa thực tiễn của đề tài

Các kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học để lựa chọn chế độ phay cứng hợp lý bề mặt trụ định hình bằng thép 90CrSi khi dùng dao phay ngón hợp kim cứng phủ nano composite trong sản xuất thực tế. Chế độ gia công tối đa mục tiêu đề xuất giúp cân bằng giữa chất lượng bề mặt và năng suất, đồng thời giảm lực cắt, góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế và tính bền vững của quá trình gia công.

6. Những điểm mới của luận án

- Nghiên cứu có hệ thống quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi sử dụng dao phay ngón hợp kim cứng phủ nano composite với 6 me cắt dưới điều kiện nano-MQL sử dụng hạt CuO.
- Xây dựng các mô hình RSM cho dự đoán Ra, MRR và F.
- Ứng dụng NSGA-II kết hợp GPR để tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình phay cứng.
- Kết hợp phương pháp AHP và điểm Knee để lựa chọn chế độ gia công tối ưu tổng thể.
- Đề xuất chế độ gia công cân bằng có kiểm chứng thực nghiệm.
- Sử dụng các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí TOPSIS, MARCOS và EAMR đã được áp dụng để lựa chọn nghiệm tối ưu từ tập nghiệm Pareto khả thi.

7. Cấu trúc của luận án

Ngoài phần Mở đầu và Kết luận – Kiến nghị, luận án gồm 5 chương:

Chương 1: Tổng quan về phay cứng, bôi trơn thiểu và tối ưu hóa.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết về phay cứng, mô hình hóa và tối ưu hóa.

Chương 3: Xây dựng hệ thống thí nghiệm.

Chương 4: Kết quả thực nghiệm và mô hình hóa quá trình phay cứng bề mặt ngoài thép 90CrSi dưới điều kiện Nano-MQL sử dụng hạt CuO.

Chương 5: Tối ưu hóa quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi dưới điều kiện Nano-MQL sử dụng hạt CuO.

CHƯƠNG 1:
TỔNG QUAN VỀ PHAY CỨNG, BÔI TRƠN THIỂU VÀ TỐI ƯU HÓA

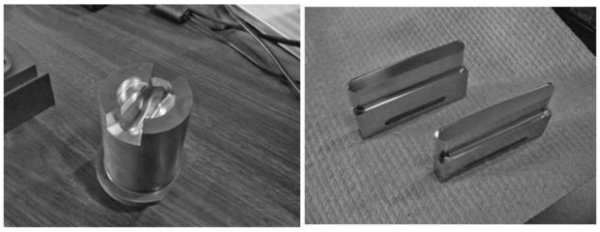
Chương này trình bày tổng quan về gia công phay cứng, bao gồm các vấn đề cơ bản, các yếu tố ảnh hưởng và các hướng nghiên cứu liên quan đến vật liệu dụng cụ, công nghệ bôi trơn – làm nguội cũng như mô hình hóa và tối ưu hóa quá trình gia công. Nội dung chương nhằm làm rõ cơ sở lý thuyết và thực tiễn của phay cứng, đồng thời tổng hợp các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước để xác định xu hướng phát triển của lĩnh vực này.

Bên cạnh đó, chương cũng phân tích tình hình nghiên cứu hiện nay, từ đó chỉ ra các hạn chế và khoảng trống còn tồn tại, đặc biệt liên quan đến gia công phay cứng thép hợp kim có độ cứng cao, điều kiện bôi trơn tiên tiến như nano-MQL và các phương pháp mô hình hóa – tối ưu hóa hiện đại. Trên cơ sở đó, định hướng nghiên cứu của luận án được xác lập nhằm góp phần giải quyết các vấn đề còn tồn tại, nâng cao hiệu quả và chất lượng của quá trình phay cứng trong điều kiện thực tế sản xuất.

1.1. Giới thiệu về phay cứng

Phay cứng (hard milling) là một kỹ thuật gia công tiên tiến được sử dụng rộng rãi trong ngành chế tạo khuôn – mẫu và các lĩnh vực gia công chính xác. Đây là quá trình cắt gọt vật liệu sau nhiệt luyện với độ cứng điển hình từ 45–70 HRC, nhằm tạo hình bán tinh hoặc tinh các bề mặt có yêu cầu cao về độ chính xác và độ nhẵn. Theo Mickelson [1], phay cứng khác biệt cơ bản với phay truyền thống và phay tốc độ cao (HSM) ở chỗ nó được thực hiện sau khi chi tiết đã qua tôi; trong khi đó HSM thường được áp dụng cho giai đoạn thô và bán tinh trước nhiệt luyện. Sự phân biệt này được trình bày rõ rằng phay cứng là bước "gia công hình dạng và độ chính xác cuối cùng" của chi tiết sau xử lý nhiệt [1].

Một trong những động lực thúc đẩy sự phát triển mạnh mẽ của phay cứng là khả năng rút ngắn chu trình chế tạo khuôn và giảm phụ thuộc vào EDM và đánh bóng thủ công. Chẳng hạn, một lõi khuôn bằng thép Hình 1.1.a ở độ cứng 58 HRC trước đây mất tới 30 giờ theo quy trình truyền thống (gồm phay mềm, gia công điện cực, EDM và đánh bóng), nhưng với phay cứng có thể hoàn thành trong chưa đầy 5 giờ [1]. Hay chi tiết Hình 1.1.b bằng thép D2 vốn tiêu tốn 6 giờ gia công (bao gồm EDM dây, nhiều bước bán tinh và đánh bóng), nay chỉ còn 20 phút nhờ phay cứng [1]. Các trường hợp này cho thấy phay cứng đang trở thành giải pháp chiến lược giúp giảm chi phí sản xuất, rút ngắn thời gian giao hàng và nâng cao năng lực cạnh tranh của các doanh nghiệp.



a) b)

Hình 1.1: *Khuôn phay cứng [1]*



BẢNG THÔNG SỐ KỸ THUẬT GIA CÔNG

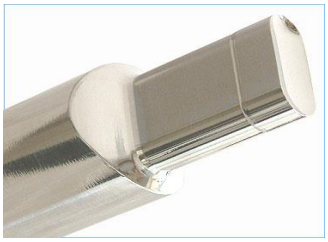
Máy gia công:	**HSM 400**
Trục chính:	**42.000 vòng/phút (min^{-1})**
Vật liệu:	**NAK 80** (0.15% C, 3% Ni, 1.5% Mn, 1% Cu, 1% Al, 0.3% Si)
Độ cứng:	**40 HRc**
Độ nhám:	**Ra 0.4 µm**
Thời gian gia công:	
• Phá thô:	**17 phút**
• Gia công tinh:	**393 mhút**
Dụng cụ cắt:	
• Tổng số:	**9**
• Đường kính lớn nhất ($Ø_{max}$):	**8 mm**
• Đường kính nhỏ nhất ($Ø_{min}$):	**0.4 mm**
Điểm nổi bật:	
• Độ chính xác biên dạng, Chất lượng bề mặt	

Hình 1.2: Khuôn điện thoại di động tạo bởi phay cứng và chế độ phay cứng đã dùng [1]

Phay cứng có tính linh hoạt và có khả năng thay thế EDM trong một số trường hợp. Chẳng hạn, khuôn điện thoại di động Hình 1.2. được phay với độ bóng và độ chính xác cao. Trường hợp này minh chứng rằng phay cứng không chỉ phù hợp cho các bề mặt dạng lòng khuôn phức tạp mà còn mang lại chất lượng bề mặt vượt trội, nhiều khi tốt hơn EDM trong một số nguyên công nhất định.

Cho đến nay phay cứng đã trở thành một công nghệ sản xuất hiệu quả, ổn định và kinh tế, đặc biệt trong chế tạo khuôn - mẫu và chi tiết chính xác. Nó đã trở thành một giải pháp công nghệ quan trọng, cho phép gia công trực tiếp các chi tiết khuôn mẫu, chi tiết máy sau nhiệt luyện về kích thước cuối cùng, thay thế cho quy trình truyền thống gồm gia công mềm, nhiệt luyện và mài hoặc gia công tia lửa điện (EDM) [2], [3].

Trong công nghiệp, phay cứng được ứng dụng rộng rãi để chế tạo khuôn ép nhựa, khuôn đúc áp lực, các chi tiết trục cam, cổ trục khuỷu trong ngành ô tô và cánh tuabin trong hàng không. Đặc biệt, các bề mặt trụ định hình - xuất hiện rất phổ biến trên các chi tiết như các chày dập viên nén định hình trong công nghiệp dược phẩm (Hình 1.3), các chày đột lỗ định hình trong gia công thép tấm, trục cam vv...



Hình 1.3. *Chày dập thuốc viên định hình*

Việc gia công phay cứng các bề mặt này đặt ra thách thức lớn do góc tiếp xúc giữa dao và phôi thay đổi liên tục theo biên dạng cong, dẫn đến sự biến thiên của lực cắt và chiều dày phoi, gây ra rung động và làm chất lượng bề mặt không đồng đều. Theo Wojciechowski và cộng sự [4] động lực học của quá trình phay bề mặt cong phức tạp hơn nhiều so với phay phẳng và hiện vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ, đặc biệt là trong bối cảnh áp dụng các công nghệ bôi trơn tiên tiến.

Cơ chế bóc tách vật liệu trong phay cứng khác biệt đáng kể so với gia công vật liệu mềm. Do giới hạn chảy của vật liệu rất cao, ứng suất tại vùng cắt có thể đạt tới hàng ngàn MPa, dẫn đến nhiệt độ vùng cắt tăng lên rất nhanh và tập trung cục bộ. Phoi được hình thành chủ yếu thông qua cơ chế trượt đoạn nhiệt (adiabatic shear), tạo ra dạng phoi dây (saw-tooth chip) đặc trưng. Lực cắt đơn vị trong phay cứng thường lớn hơn gấp 3-4 lần so với thép thường, đòi hỏi máy phay phải có độ cứng vững động lực học cao để tránh rung động. Một hiện tượng quan trọng thường gặp là sự hình thành "lớp trắng" (white layer) trên bề mặt gia công, là một lớp vật liệu có cấu trúc hạt rất mịn và độ cứng cao do quá trình gia nhiệt và làm nguội cực nhanh [5], [6]. Nếu chiều dày lớp trắng vượt quá giới hạn cho phép (thường > 5 μm), nó có thể trở thành nguyên nhân gây nứt tế vi và làm giảm đáng kể độ bền mỏi của chi tiết [7].

Khi so sánh với các phương pháp gia công tinh khác như mài và EDM, phay cứng thể hiện những ưu và nhược điểm riêng biệt. Ưu điểm lớn nhất của phay cứng là khả năng tạo hình linh hoạt các bề mặt 3D phức tạp trên máy phay CNC chỉ trong một lần gá đặt, rút ngắn đáng kể chu trình sản xuất và giảm sai số tích lũy do gá đặt lại. Tốc độ bóc tách vật liệu (MRR) của phay cứng cũng cao hơn nhiều so với mài và EDM. Tuy nhiên, nhược điểm là tuổi thọ dụng cụ thấp, rủi ro về biến đổi nhiệt bề mặt cao, và khó đạt được độ bóng bề mặt siêu tinh (Ra < 0.1 μm) như mài. Ngược lại, mài cho chất lượng bề mặt tốt nhất nhưng tốn nhiều dung dịch trơn nguội và hạn chế về hình dáng gia công. EDM không chịu lực cắt nhưng tốc độ rất chậm và chịu ảnh hưởng của lớp biến trắng dày. Các nghiên cứu của Brinksmeier và cộng sự [8] và König và cộng sự [9] đã chỉ ra rằng, với chế độ cắt hợp lý, phay cứng có thể tạo ra ứng suất dư nén trên bề mặt, có lợi cho tuổi thọ mỏi của chi tiết.

1.2. Giới thiệu về công nghệ bôi trơn tối thiểu và nano-MQL

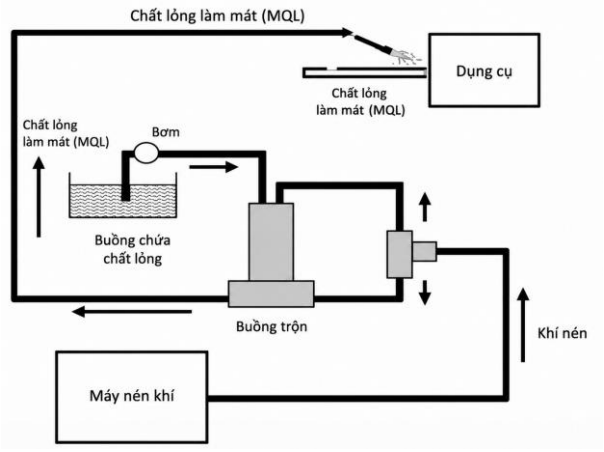
1.2.1. Nguyên lý và hiệu quả của công nghệ MQL

Trong lịch sử phát triển của gia công cơ khí, phương pháp tưới nguội truyền thống (flood cooling) sử dụng một lượng lớn dung dịch trơn nguội (10-100 lít/phút) để làm mát và bôi trơn vùng cắt. Tuy nhiên, phương pháp này đang gặp phải sự phản đối ngày càng tăng do các vấn đề nghiêm trọng về môi trường, sức khỏe và chi phí. Dung dịch trơn nguội thải ra là chất thải nguy hại, chi phí xử lý và tái chế rất

cao. Về mặt sức khỏe, tiếp xúc lâu dài với dầu cắt gọt có thể gây ra các bệnh về da và hô hấp cho người vận hành. Theo thống kê của Klocke và Eisenbläter [10], chi phí liên quan đến dung dịch trơn nguội có thể chiếm tới 16-20% tổng chi phí gia công, trong khi chi phí dụng cụ chỉ chiếm khoảng 4%. Bối cảnh này đã thúc đẩy sự ra đời của công nghệ Bôi trơn tối thiểu (Minimum Quantity Lubrication - MQL) vào những năm 1990 như một giải pháp thay thế bền vững. MQL sử dụng một lượng rất nhỏ dầu bôi trơn (10-100 ml/giờ) được phun dưới dạng sương mù bởi khí nén áp suất cao (3-8 bar) trực tiếp vào vùng cắt.

Các nghiên cứu tổng hợp cho thấy kỹ thuật bôi trơn tối thiểu (MQL) là một giải pháp hiệu quả thay thế cho làm mát truyền thống trong gia công, vừa giảm lượng dung dịch cắt gọt vừa cải thiện hiệu năng công nghệ. Như minh họa trong Hình 1.5, hệ thống MQL hoạt động dựa trên việc phun một lượng rất nhỏ dầu bôi trơn dưới dạng sương mù vào vùng cắt bằng dòng khí nén áp suất cao, giúp dung dịch tiếp cận trực tiếp vùng tiếp xúc dao-phoi. Nhờ cơ chế này, MQL vừa đảm bảo chức năng làm mát vừa tăng cường bôi trơn hiệu quả hơn so với điều kiện gia công khô.

Cơ chế bôi trơn của MQL khác biệt hoàn toàn so với tưới nguội. Các hạt sương dầu có kích thước micromet (1-10 μm) nhờ động năng lớn của dòng khí nén có khả năng xâm nhập sâu vào vùng tiếp xúc giữa dao-phoi và dao-phôi thông qua hiệu ứng mao dẫn. Tại đây, chúng tạo thành một màng bôi trơn mỏng (chế độ bôi trơn biên), giúp giảm hệ số ma sát trượt từ mức 0.4-0.6 (gia công khô) xuống còn 0.1-0.2. Việc giảm ma sát giúp giảm trực tiếp lượng nhiệt sinh ra tại nguồn, đây là chức năng chính của MQL. Bên cạnh đó, luồng khí nén đóng vai trò làm mát thứ cấp thông qua đối lưu cưỡng bức và hỗ trợ đẩy phoi ra khỏi vùng cắt, ngăn chặn việc cắt lại phoi gây xước bề mặt [11], [12].

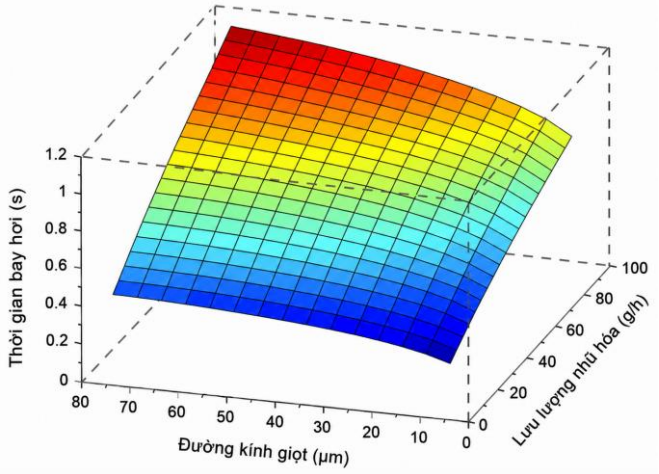


Hình 1.5. Sơ đồ nguyên lý hệ thống bôi trơn tối thiểu (MQL), trong đó dung dịch bôi trơn được trộn với khí nén và phun dưới dạng sương mù vào vùng cắt nhằm nâng cao hiệu quả làm mát và bôi trơn.

R. W. Maruda cùng các công sự [12] báo cáo các kết quả nghiên cứu về đặc trưng của sương mù nhũ tương (emulsion mist) trong điều kiện MQCL đóng vai trò quyết định đến hiệu quả làm mát và bôi trơn trong vùng cắt. Một trong những phát hiện quan trọng là kích thước giọt chất lỏng phụ thuộc chủ yếu vào lưu lượng khí nén và khoảng cách từ vòi phun đến vùng gia công. Cụ thể, khi tăng lưu lượng khí và khoảng cách vòi phun, đường kính giọt giảm đáng kể, như thể hiện trong *Hình1.6* . Ngược lại, lưu lượng dung dịch nhũ tương gần như không ảnh hưởng đáng kể đến kích thước giọt (dao động dưới 12%), cho thấy các thông số khí động học chi phối quá trình tạo giọt hơn là lượng dung dịch cung cấp.

Ngoài ra, sự phân bố và mật độ giọt trong vùng cắt cũng bị ảnh hưởng mạnh bởi các thông số phun [12]. Kết quả nghiên cứu này cho thấy, khi khoảng cách vòi phun nhỏ, các giọt có xu hướng kết tụ và biến dạng, làm giảm hiệu quả phân tán . Trong khi đó, ở khoảng cách tối ưu (0.2–0.4 m), các giọt phân bố đồng đều hơn và tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình làm mát và bôi trơn. Đồng thời, khi tăng lưu lượng khí, số lượng giọt trên một đơn vị diện tích tăng lên, dẫn đến tăng diện tích làm ướt và cải thiện hiệu quả trao đổi nhiệt.

Về mặt cơ chế, kết quả nghiên cứu trong [12] cho thấy kích thước giọt có ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình truyền nhiệt trong vùng cắt. Mô hình tính toán và kết quả thực nghiệm (Hình 1.6) chỉ ra rằng các giọt lớn (D > 30 µm) hoặc lưu lượng dung dịch cao (E > 60 g/h) không thể bay hơi hoàn toàn trong thời gian ngắn, làm giảm hiệu quả tản nhiệt . Ngược lại, các giọt nhỏ có khả năng bay hơi nhanh hơn, từ đó tăng cường khả năng mang nhiệt ra khỏi vùng cắt. Điều này nhấn mạnh vai trò của việc tối ưu hóa kích thước giọt trong thiết kế hệ MQCL.



Hình 1.6. *Thời gian bay hơi của giọt trong vùng cắt phụ thuộc vào kích thước giọt và lưu lượng nhũ tương [12]*

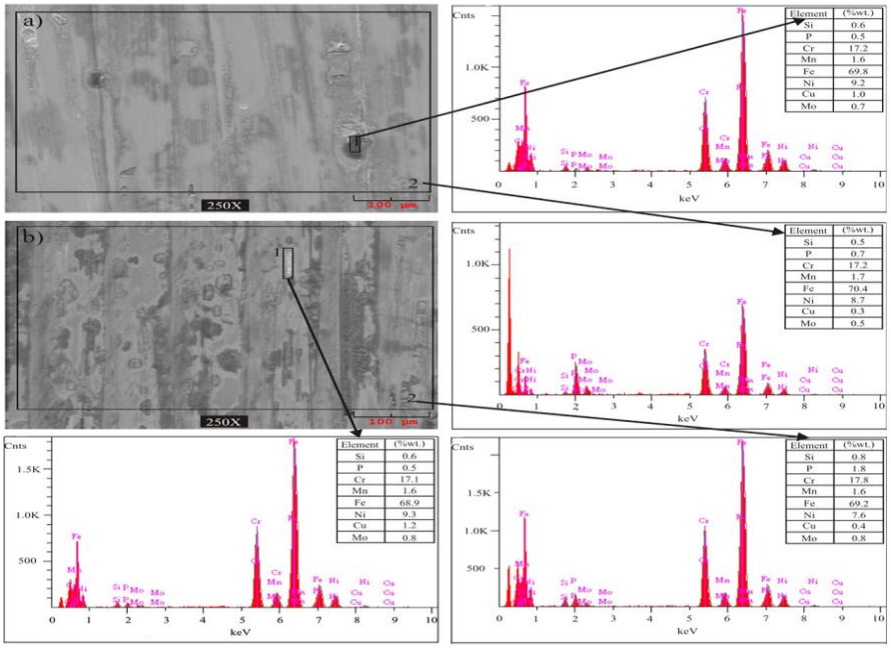
T. Mali và cộng sự [13] đã tổng hợp các kết quả thực nghiệm trong nhiều nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu cho thấy MQL cải thiện đáng kể chất lượng bề mặt,

tuổi thọ dụng cụ và giảm mòn dao so với gia công khô và thậm chí cả làm mát tràn. Cụ thể, trong các quá trình tiện, phay và khoan, việc sử dụng dầu thực vật, dầu tổng hợp hoặc nanofluid trong MQL giúp giảm nhiệt độ vùng cắt, giảm lực cắt và cải thiện độ nhám bề mặt. Ví dụ, khi gia công thép hoặc hợp kim khó cắt, MQL có thể làm giảm lực cắt từ 5-28%, giảm nhiệt độ vùng cắt khoảng 10-30% và cải thiện đáng kể tuổi thọ dụng cụ. Ngoài ra, khi kết hợp với phụ gia nano (như Al_2O_3, MoS_2, graphite), hiệu quả bôi trơn và truyền nhiệt còn được nâng cao hơn nữa.

Trong gia công tiện, nhiều nghiên cứu cho thấy MQL với dầu thực vật hoặc nanolubricant giúp cải thiện đáng kể độ nhám bề mặt và giảm mòn dụng cụ. Chẳng hạn, việc sử dụng dầu hạt cải hoặc dầu thầu dầu trong MQL có thể kéo dài tuổi thọ dao và giảm độ nhám bề mặt so với gia công khô. Đồng thời, việc bổ sung hạt nano Al_2O_3 hoặc WS_2 vào dầu nền giúp giảm lực cắt và mòn dao rõ rệt nhờ cơ chế giảm ma sát và hình thành lớp màng bôi trơn tại vùng tiếp xúc . Tương tự, trong phay, MQL cho thấy khả năng giảm mòn dao tới khoảng 16–20% và giảm độ nhám bề mặt trên 30% so với điều kiện khô, đặc biệt khi sử dụng dầu thực vật kết hợp hạt nano [13].

Cơ chế giảm ma sát trong MQCL gắn liền với sự hình thành lớp màng bôi trơn từ các giọt chất lỏng. Cơ chế này đã được nghiên cứu trong [12] nhờ phân tích bề mặt bằng SEM-EDS (Hình 1.7). Cụ thể, trên bề mặt sau gia công xuất hiện các nguyên tố như phosphor (P) và đồng (Cu) - là thành phần của phụ gia EP/AW - với hàm lượng đáng kể. Các nguyên tố này được vận chuyển tới vùng cắt thông qua các giọt emulsion, sau đó phần dung môi bay hơi và để lại lớp màng hóa học trên bề mặt tiếp xúc dao-phoi. Lớp tribofilm này có vai trò làm giảm hệ số ma sát trượt và hạn chế mài mòn nhờ tạo ra một lớp ngăn cách giữa hai bề mặt tiếp xúc. Đặc biệt, khi kích thước giọt nhỏ, quá trình bay hơi diễn ra hiệu quả hơn, làm tăng hàm lượng phụ gia trên bề mặt và do đó nâng cao hiệu quả giảm ma sát. Điều này chứng tỏ cơ chế bôi trơn trong MQCL không chỉ phụ thuộc vào lượng dung dịch mà chủ yếu do khả năng hình thành và duy trì màng bôi trơn từ các giọt kích thước nhỏ [12].

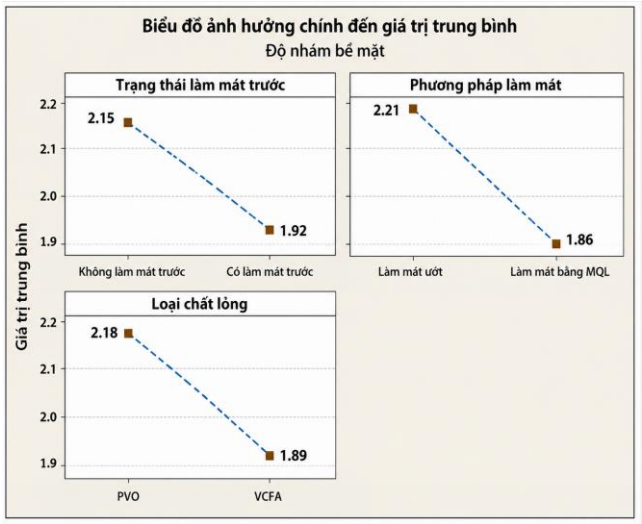
Để so sánh hiệu quả của MQL so với các phương pháp gia công khác, nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã được tiến hành. Khan và cộng sự [14] khi tiện thép AISI 9310 đã phát hiện ra rằng MQL giúp giảm nhiệt độ cắt 15-20% so với gia công khô nhờ khả năng bôi trơn hiệu quả. Trong lĩnh vực phay cứng, S. Wu và cộng sự [15] đã khám phá ra rằng gia công với kết hợp làm mát bằng MQL và nitơ lỏng có thể kéo dài tuổi thọ dụng cụ lên tới 60% so với khi gia công chỉ với MQL hoặc chỉ với làm mát bằng nitơ lỏng.



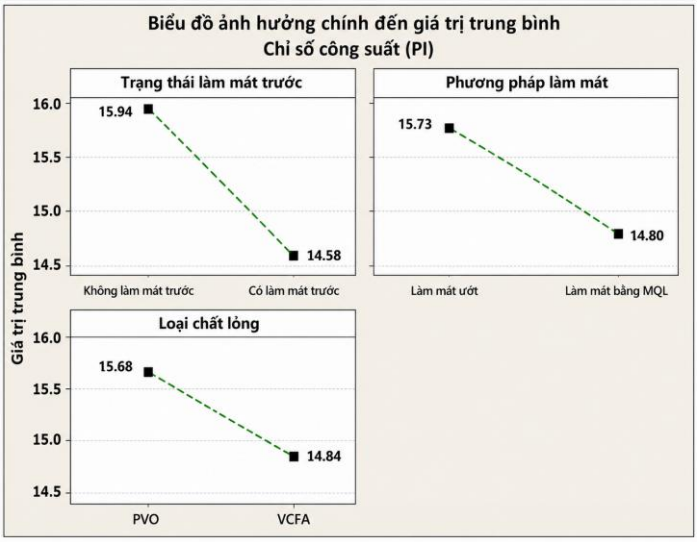
Hình 1.7: *Ảnh SEM và phân tích EDS bề mặt gia công thép X10CrNi18-8 [12]*

Tuy nhiên, công nghệ MQL truyền thống cũng bộc lộ những hạn chế nhất định. Do lượng dầu rất nhỏ và khả năng truyền nhiệt của khí nén thấp hơn nhiều so với chất lỏng, khả năng làm mát (tải nhiệt) của MQL bị hạn chế khi gia công ở tốc độ cắt rất cao (>150 m/phút) hoặc đối với các vật liệu khó cắt sinh nhiệt lớn như hợp kim Titan hay Inconel. Ngoài ra, kích thước hạt sương và khả năng xâm nhập của chúng vào vùng cắt kín phụ thuộc nhiều vào thiết kế vòi phun và thông số khí động học, gây khó khăn trong việc kiểm soát độ ổn định của quá trình. Những hạn chế này là động lực thúc đẩy sự phát triển của thế hệ tiếp theo: công nghệ MQL kết hợp với làm lạnh [16], [17].

Y. Shokoohi và cộng sự [16] đã đề xuất một phương pháp làm mát kết hợp gồm tiền làm lạnh phôi (pre-cooling), bôi trơn tối thiểu MQCL và sử dụng dung dịch cắt sinh học VCFA. Kết quả nghiên cứu cho thấy hiệu quả vượt trội so với các phương pháp truyền thống. Kết quả thực nghiệm cho thấy phương pháp này giúp giảm đáng kể độ nhám bề mặt và công suất cắt, trong đó điều kiện tối ưu (pre-cooling + MQCL + VCFA) đạt giá trị Ra thấp nhất, như thể hiện trong Hình 1.8. Bên cạnh đó, tiền làm lạnh phôi đóng vai trò quan trọng trong việc giảm công suất cắt nhờ làm vật liệu giòn hơn và giảm biến dạng dẻo, dẫn đến giảm lực cắt, thể hiện rõ qua xu hướng giảm chỉ số công suất trong Hình 1.9. Bên cạnh đó, việc sử dụng MQCL kết hợp với dung dịch VCFA giúp cải thiện đáng kể cơ chế tạo phoi, tạo ra phoi ngắn và dễ gãy hơn so với điều kiện khô hoặc bôi trơn truyền thống [16]. Ngoài hiệu quả công nghệ, dung dịch VCFA còn thể hiện ưu điểm về môi trường và sức khỏe người vận hành khi hạn chế sự phát triển vi khuẩn và giảm các tác động ô nhiễm, được chứng minh qua kết quả so sánh vi sinh và sơ đồ tác động môi trường [16].



Hình 1.8. *Ảnh hưởng trung bình của các phương pháp làm mát (tiền làm lạnh, phương pháp bôi trơn và loại dung dịch cắt) đến độ nhám bề mặt (Ra) [16]*



Hình 1.9. *Ảnh hưởng trung bình của các phương pháp làm mát đến công suất cắt (Power Index – PI) [16]*

Hiệu quả của MQL phụ thuộc mạnh vào các yếu tố như loại dầu nền, áp suất khí, lưu lượng khí và đặc biệt là khả năng hình thành và phân bố của các giọt dầu trong vùng cắt. Các nghiên cứu tổng quan gần đây cho thấy việc tối ưu hóa các thông số này có thể cải thiện đáng kể hiệu quả bôi trơn và làm mát [18], [19]. Tuy nhiên, đối với các vật liệu khó gia công và gia công cứng, MQL truyền thống đôi khi chưa đáp ứng được yêu cầu về khả năng tản nhiệt, do lượng dầu sử dụng quá nhỏ và khả năng dẫn nhiệt của dầu nền còn hạn chế [8], [10].

Để khắc phục hạn chế này, hướng nghiên cứu mới tập trung vào việc sử dụng các dung dịch bôi trơn có bổ sung hạt nano (nano-MQL), nhằm nâng cao khả năng truyền nhiệt và giảm ma sát trong vùng cắt [20] [21]. Các nghiên cứu cho thấy hạt nano có thể hoạt động theo nhiều cơ chế khác nhau như lăn (rolling), trượt (sliding), đánh

bóng (polishing) và tạo màng (tribofilm), qua đó làm giảm hệ số ma sát và cải thiện điều kiện tiếp xúc [20], [22]. Ngoài ra, việc sử dụng dầu thực vật kết hợp với hạt nano còn giúp nâng cao tính thân thiện môi trường và hiệu quả gia công [23], [21].

Trong bối cảnh gia công cứng hiện đại, MQL được xem là một giải pháp trung gian giữa gia công khô và làm mát tràn, cho phép đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả công nghệ và tính bền vững [18], [24]. Các nghiên cứu gần đây cũng chỉ ra rằng việc kết hợp MQL với các phương pháp tối ưu hóa thông số cắt có thể cải thiện đáng kể hiệu năng gia công, đặc biệt trong các quá trình phay cứng thép dụng cụ [25], [24], [26]. Đồng thời, việc kiểm soát hư hỏng dụng cụ và sự suy giảm lớp phủ trong điều kiện MQL cũng là một hướng nghiên cứu quan trọng nhằm nâng cao độ tin cậy của quá trình gia công [27].

Tóm lại, công nghệ MQL đóng vai trò quan trọng trong việc giảm ma sát, kiểm soát nhiệt và nâng cao hiệu quả gia công trong điều kiện cắt khắc nghiệt. Tuy nhiên, để đạt hiệu quả tối ưu trong gia công cứng, cần kết hợp MQL với các giải pháp nâng cao như nano-MQL và tối ưu hóa thông số công nghệ, từ đó mở rộng khả năng ứng dụng của công nghệ này trong sản xuất hiện đại.

1.2.2. Nano-MQL và vai trò đặc biệt của hạt nano CuO

Để khắc phục những hạn chế về khả năng làm mát và bôi trơn của MQL truyền thống, công nghệ bôi trơn tối thiểu có bổ sung hạt nano (nano-MQL) đã được phát triển như một hướng tiếp cận hiệu quả nhằm nâng cao hiệu năng gia công, đặc biệt trong điều kiện gia công cứng và vật liệu khó cắt. Về nguyên lý, nano-MQL sử dụng các hạt nano phân tán trong dầu nền để cải thiện đồng thời khả năng dẫn nhiệt và tính bôi trơn của dung dịch cắt, từ đó làm giảm ma sát và nhiệt độ trong vùng cắt [20], [22]. Các nghiên cứu tổng quan cho thấy nano-MQL có thể làm giảm đáng kể lực cắt, nhiệt độ và mài mòn dụng cụ so với MQL truyền thống và gia công khô [18], [19], [23].

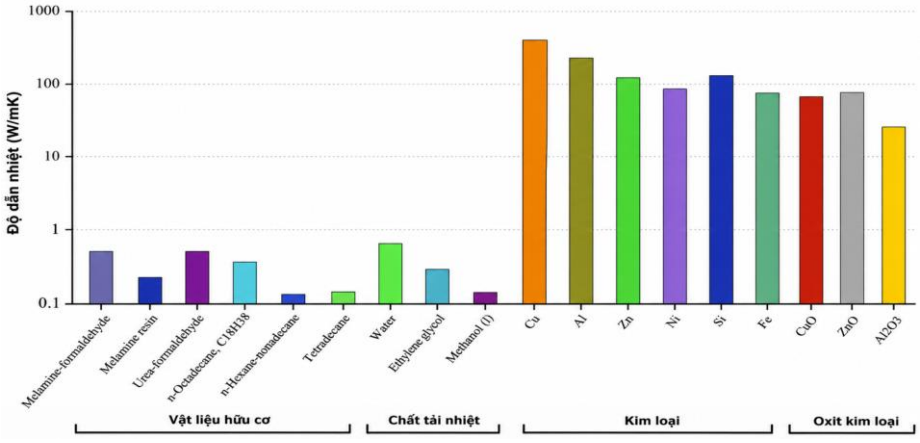
Hiệu quả vượt trội của nano-MQL chủ yếu xuất phát từ các cơ chế hoạt động đặc trưng của hạt nano trong vùng cắt. Các hạt nano có thể đóng vai trò như các "ổ bi vi mô", tạo ra hiệu ứng lăn (rolling effect) giữa bề mặt dao và phoi, từ đó làm giảm hệ số ma sát [20], [22]. Đồng thời, các hạt nano cũng có thể lấp đầy các vi khe hở trên bề mặt tiếp xúc, tạo nên lớp màng bôi trơn (tribofilm) ổn định, giúp giảm mài mòn và tăng tuổi thọ dụng cụ [23], [21]. Ngoài ra, nhờ kích thước rất nhỏ và diện tích bề mặt riêng lớn, các hạt nano còn góp phần cải thiện đáng kể khả năng truyền nhiệt của dung dịch, qua đó tăng hiệu quả làm mát vùng cắt [19], [22].

Trong số các loại hạt nano được nghiên cứu, như Al_2O_3, MoS_2, graphite, CNT và CuO, mỗi loại có những đặc trưng riêng về độ cứng, hình dạng và tính chất

nhiệt–cơ học, dẫn đến sự khác biệt về hiệu quả gia công [20], [23]. Đặc biệt, hạt nano CuO đã được chứng minh là một trong những vật liệu có tiềm năng cao trong nano-MQL nhờ sự kết hợp giữa độ dẫn nhiệt tương đối cao, khả năng ổn định hóa học và đặc tính bôi trơn tốt. Các nghiên cứu cho thấy CuO có thể cải thiện đáng kể khả năng tản nhiệt trong vùng cắt, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành lớp tribofilm, qua đó giảm ma sát và mài mòn dụng cụ [19], [22].

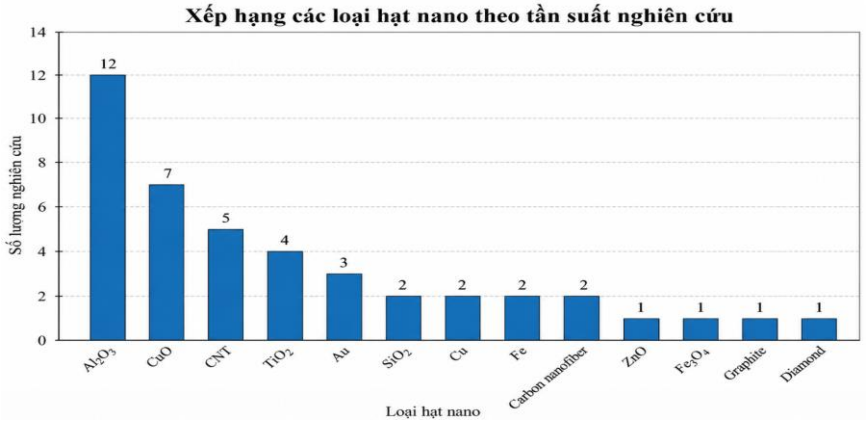
Việc lựa chọn loại hạt nano phù hợp là yếu tố then chốt quyết định hiệu quả của nanofluid trong các ứng dụng truyền nhiệt và gia công. Nghiên cứu tổng quan [28] cho thấy hiệu quả của nanofluid phụ thuộc mạnh vào loại vật liệu hạt nano, kích thước, hình dạng và khả năng phân tán trong dung môi nền. Bên cạnh bản chất vật liệu, kích thước và hình dạng hạt nano cũng đóng vai trò quan trọng. Nghiên cứu này chỉ ra rằng hạt nano có kích thước nhỏ và tỷ lệ diện tích bề mặt/thể tích lớn sẽ làm tăng hiệu quả truyền nhiệt nhờ tăng cường chuyển động Brown và tương tác với chất lỏng nền. Ngoài ra, các hạt dạng sợi hoặc ống (như ống nano carbon) thường cho hiệu quả cao hơn so với hạt cầu do khả năng tạo mạng dẫn nhiệt tốt hơn. Điều này cũng được phản ánh trong Hình 1.10, nơi các vật liệu nano khác nhau có độ dẫn nhiệt rất khác biệt, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả của nanofluid trong ứng dụng thực tế.

Tuy nhiên, việc lựa chọn hạt nano không chỉ dựa trên khả năng tăng cường truyền nhiệt mà còn phải cân nhắc các yếu tố thực tế như độ ổn định phân tán, độ nhớt và chi phí. Các hạt kim loại hoặc ống nano carbon tuy có hiệu quả cao nhưng thường làm tăng độ nhớt và chi phí hệ thống, trong khi các oxit kim loại lại có ưu điểm về tính ổn định và giá thành thấp hơn. Ngoài ra, hiện tượng kết tụ và lắng đọng hạt nano theo thời gian có thể làm giảm hiệu quả truyền nhiệt và gây tắc nghẽn hệ thống. Do đó, lựa chọn tối ưu cần đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả nhiệt, tính ổn định và khả năng ứng dụng thực tế [28].



Hình 1.10. *So sánh độ dẫn nhiệt của một số vật liệu hữu cơ, chất lỏng truyền nhiệt, kim loại và oxit kim loại [28]*

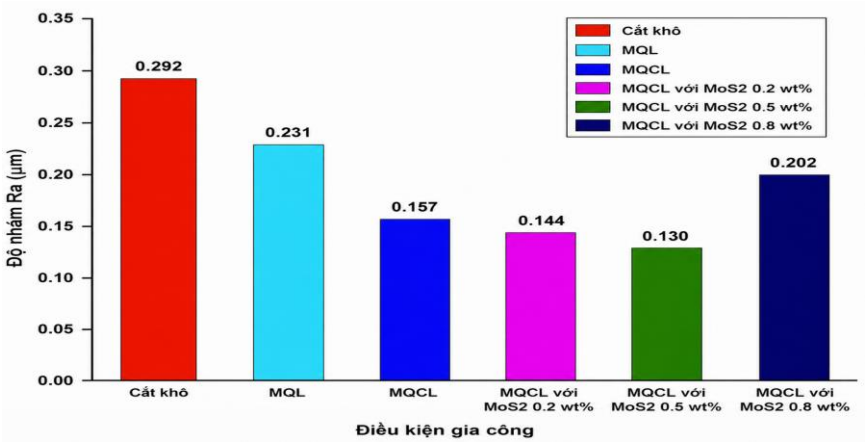
Xu hướng lựa chọn vật liệu nano trong các nghiên cứu được thể hiện qua Hình 1.11, trong đó Al_2O_3 và CuO là hai loại hạt nano có số lượng nghiên cứu lớn nhất, tiếp theo là ống nano carbon và TiO_2. Trên thực tế, việc lựa chọn hạt nano không chỉ dựa trên hiệu quả truyền nhiệt mà còn phải cân nhắc đến các yếu tố như tính ổn định huyền phù, độ nhớt, chi phí và khả năng triển khai trong điều kiện công nghiệp. Đặc biệt, các hạt nano oxit được ưu tiên do dễ phân tán và ít gây kết tụ, trong khi ống nano carbon và các hạt kim loại tuy có hiệu suất cao nhưng đòi hỏi kỹ thuật xử lý phức tạp hơn [28].



Hình 1.11. *Biểu đồ xếp hạng các loại hạt nano theo tần suất nghiên cứu trong các công trình về nanofluid [28]*

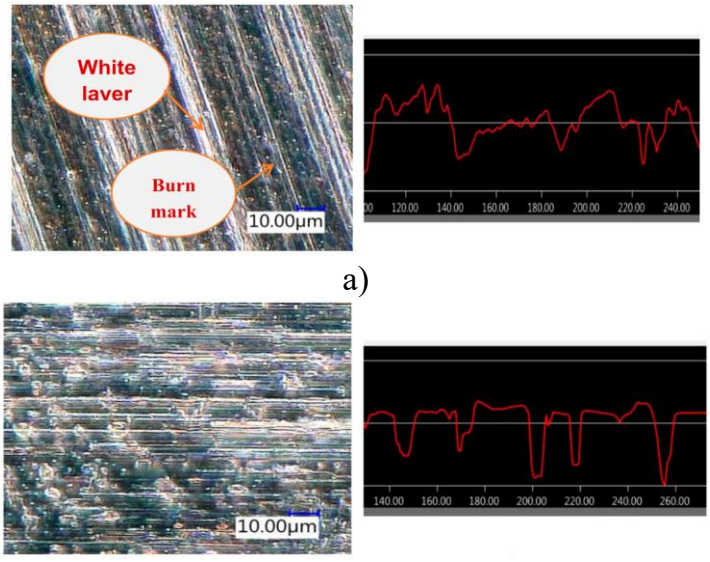
Do đó, việc lựa chọn loại hạt nano phù hợp cần đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả nhiệt – tribology và tính khả thi trong ứng dụng. Trong các nghiên cứu gần đây, xu hướng tối ưu không phải là chọn vật liệu có độ dẫn nhiệt cao nhất, mà là lựa chọn vật liệu có hiệu quả tổng thể tốt nhất, bao gồm khả năng giảm ma sát, cải thiện truyền nhiệt, duy trì độ ổn định và chi phí hợp lý. Đây cũng là cơ sở quan trọng để phát triển các hệ nanofluid tiên tiến như nano-MQL hoặc MQCL trong gia công vật liệu khó cắt.

Trong nghiên cứu về phay cứng thép SKD11 dưới điều kiện nano-MQCL [29], vai trò của các hạt nano MoS_2 trong việc giảm độ nhám bề mặt (Ra) được thể hiện rõ ràng thông qua cả kết quả thực nghiệm và phân tích cơ chế. Cụ thể, khi bổ sung MoS_2 vào dung dịch bôi trơn, giá trị Ra giảm đáng kể so với các điều kiện cắt khô, MQL và MQCL sử dụng dung dịch nền, đạt giá trị tối ưu khoảng 0.130 µm tại nồng độ 0.5 wt% (Hình 1.12). Sự cải thiện này chủ yếu xuất phát từ đặc tính cấu trúc lớp của MoS_2, cho phép các lớp vật liệu trượt dễ dàng lên nhau, từ đó làm giảm hệ số ma sát tại vùng tiếp xúc dao–phoi và dao–chi tiết. Đồng thời, các hạt nano còn tham gia hình thành lớp màng bôi trơn (tribofilm) trên bề mặt gia công, giúp hạn chế tiếp xúc trực tiếp giữa các bề mặt kim loại, giảm mài mòn và biến dạng dẻo cục bộ. Ngoài ra, hiệu ứng "lăn" của các hạt nano với kích thước nano cũng góp phần chuyển một phần ma sát trượt thành ma sát lăn, qua đó tiếp tục làm giảm lực cắt và dao động trong quá trình gia công.



Hình 1.12. *Giá trị trung bình của độ nhám bề mặt Ra dưới các điều kiện gia công khác nhau (cắt khô, MQL, MQCL và MQCL với nanofluid MoS_2) [29]*

Bên cạnh đó, sự hiện diện của nanofluid còn nâng cao khả năng truyền nhiệt của dung dịch MQCL, giúp giảm nhiệt độ vùng cắt, từ đó hạn chế sự hình thành lớp trắng và vết cháy bề mặt, như quan sát trong các ảnh vi cấu trúc trên Hình 1.13. Tuy nhiên, hiệu quả này phụ thuộc mạnh vào nồng độ hạt nano; khi nồng độ vượt quá giá trị tối ưu (0.5 wt%), hiện tượng kết tụ làm giảm khả năng thâm nhập và bôi trơn, dẫn đến sự gia tăng trở lại của Ra. Như vậy, nghiên cứu khẳng định rằng việc sử dụng hạt nano MoS_2 trong MQCL là một giải pháp hiệu quả để giảm độ nhám bề mặt, thông qua sự kết hợp của các cơ chế giảm ma sát, hình thành tribofilm và cải thiện điều kiện nhiệt trong vùng cắt.

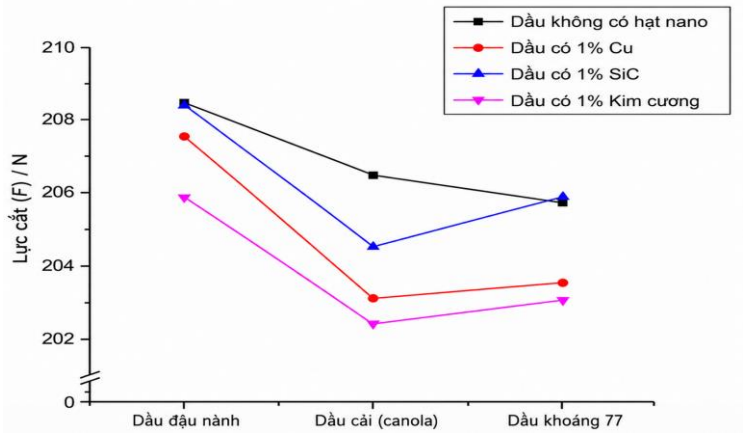


Hình 1.13. *So sánh vi cấu trúc và biên dạng bề mặt sau gia công trong các điều kiện khác nhau: (a) gia công khô với sự xuất hiện rõ rệt của lớp trắng (white layer) và vết cháy (burn mark), bề mặt không ổn định; (b) gia công dưới điều kiện MQCL sử dụng nanofluid MoS_2 (0.2 wt%), cho thấy bề mặt đồng đều hơn, giảm đáng kể khuyết tật và cải thiện profile bề mặt [29]*

Trong các nghiên cứu về gia công cứng dưới điều kiện MQL, việc sử dụng nanofluid trên nền dầu thực vật, đặc biệt là dầu hạt cải, đã thu hút nhiều sự quan tâm nhờ khả năng kết hợp giữa hiệu quả công nghệ và tính thân thiện môi trường. Trong [30] sử dụng hạt nano Al_2O_3 phân tán trong dầu hạt cải nhằm cải thiện điều kiện bôi trơn - làm mát tại vùng cắt. Kết quả nghiên cứu cho thấy nồng độ hạt nano đóng vai trò quyết định đến các đặc trưng lực cắt, trong đó xu hướng giảm lực rõ rệt khi tăng nồng độ hạt nano đã được ghi nhận. Đặc biệt, trong khoảng nồng độ từ 1.0% đến 1.5%, các thành phần lực cắt giảm đáng kể, cho thấy hiệu quả tổng hợp của cơ chế bôi trơn và truyền nhiệt được nâng cao [30].

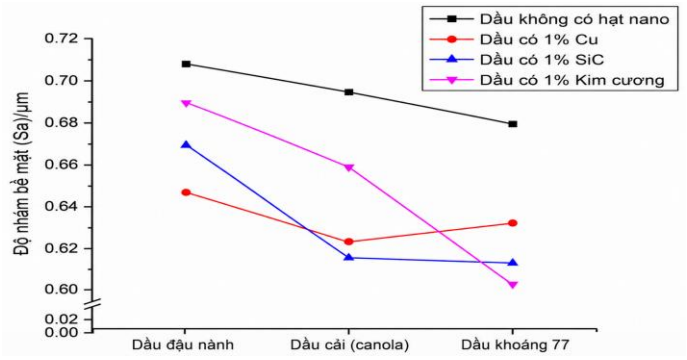
Về cơ chế, sự cải thiện hiệu năng của nanofluid Al_2O_3/dầu hạt cải có thể lý giải bởi hai yếu tố chính. Thứ nhất, các hạt nano có độ dẫn nhiệt cao giúp tăng cường khả năng tản nhiệt của dầu nền, từ đó làm giảm nhiệt độ vùng cắt. Thứ hai, các hạt nano với hình dạng gần cầu đóng vai trò như các "vi ổ bi", tạo hiệu ứng lăn trong vùng tiếp xúc, giúp giảm hệ số ma sát và hạn chế biến dạng dẻo tại bề mặt gia công . Nhờ đó, không chỉ lực cắt giảm mà điều kiện tribology trong vùng cắt cũng được cải thiện đáng kể [30].

Nghiên cứu của S. Yuan và cộng sự [31] cũng đã chỉ ra rằng việc bổ sung hạt nano vào hệ bôi trơn MQL trên nền dầu thực vật có thể cải thiện đáng kể hiệu năng gia công so với các phương pháp bôi trơn truyền thống. Cụ thể, việc phân tán hạt nano vào dung dịch nền dẫn đến sự giảm rõ rệt các thành phần lực cắt, như thể hiện trong Hình 1.14. Trong số các loại hạt nano được khảo sát, nano kim cương và nano đồng cho thấy hiệu quả vượt trội trong việc giảm lực cắt so với nano SiC, cho thấy rằng tính chất vật liệu của hạt nano đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định hiệu quả gia công. Bên cạnh đó, loại dầu nền cũng ảnh hưởng đáng kể đến kết quả, trong đó dầu hạt cải và dầu natural77 luôn cho hiệu năng tốt hơn so với dầu đậu nành, cho thấy độ nhớt của dung dịch nền là một yếu tố chi phối quan trọng.



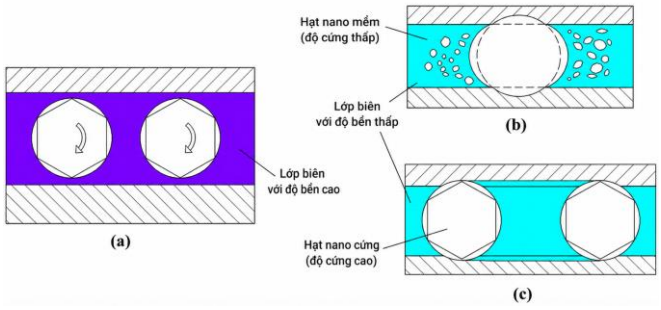
Hình 1.14. *So sánh lực cắt khi sử dụng các loại nanofluid trên nền dầu thực vật khác nhau và các loại hạt nano khác nhau [31]*

Ngoài lực cắt, chất lượng bề mặt gia công cũng chịu ảnh hưởng mạnh bởi sự tương tác giữa hạt nano và dầu nền. Như thể hiện trong Hình 1.15, các nanofluid trên nền dầu thực vật nhìn chung cho giá trị độ nhám bề mặt thấp hơn so với điều kiện MQL thuần túy . Tuy nhiên, hiệu quả của hạt nano phụ thuộc lớn vào mức độ tương thích với dầu nền. Cụ thể, nano kim cương không phải lúc nào cũng cho chất lượng bề mặt tốt nhất khi sử dụng với dầu có độ nhớt thấp như dầu đậu nành, trong khi lại đạt hiệu quả tối ưu khi kết hợp với dầu có độ nhớt cao như dầu natural77. Kết quả trong [31] cho thấy rằng công nghệ nanofluid MQL có thể làm giảm độ nhám bề mặt tới 14.92% so với gia công khô, nhấn mạnh hiệu ứng cộng hưởng giữa hạt nano và đặc tính của dầu nền.

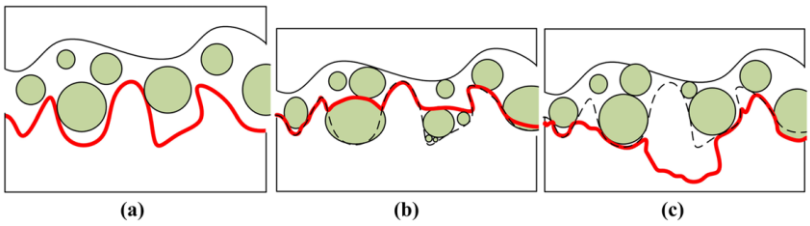


Hình 1.15. *Ảnh hưởng của các loại nanofluid trên nền dầu thực vật đến độ nhám bề mặt gia công*

Cơ chế của quá trình nano-MQL cũng được đưa ra trong [31]. Kết quả của nghiên cứu này chỉ ra rằng sự tương thích giữa độ cứng của hạt nano và độ nhớt của dầu nền là yếu tố quyết định đến hành vi ma sát trong vùng cắt. Như minh họa trong Hình 1.16 và Hình 1.17, hạt nano có thể đóng vai trò như phần tử lăn, tạo màng bảo vệ hoặc tác nhân đánh bóng tùy thuộc vào độ cứng và trạng thái của màng dầu. Các hạt nano cứng (ví dụ kim cương) có thể gây hiện tượng cào xước hoặc cày xới bề mặt nếu điều kiện bôi trơn không đủ, trong khi các hạt mềm hơn (như Cu) có xu hướng biến dạng và góp phần cải thiện độ nhẵn bề mặt. Ngoài ra, nghiên cứu cũng cho thấy dầu nền có độ nhớt cao giúp hình thành màng bôi trơn ổn định hơn, từ đó cải thiện khả năng giảm ma sát và lực cắt .

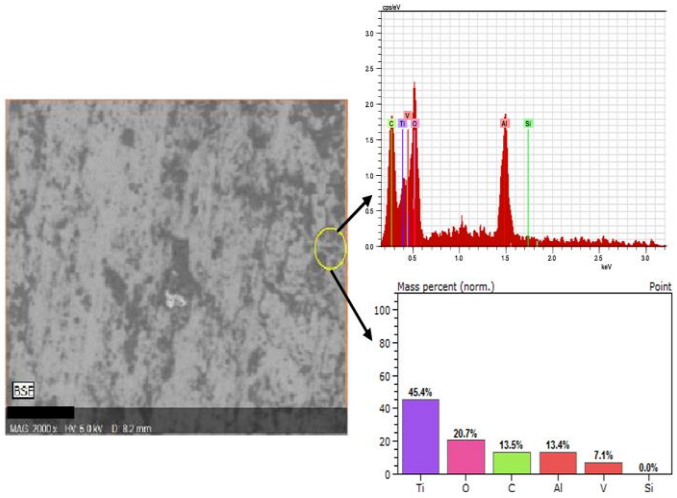


Hình 1.16. *Cơ chế tương tác giữa hạt nano và dầu nền trong điều kiện bôi trơn biên [31]*



Hình 1.17. *Minh họa bổ sung cơ chế tương tác giữa hạt nano và bề mặt tiếp xúc trong vùng cắt [31]*

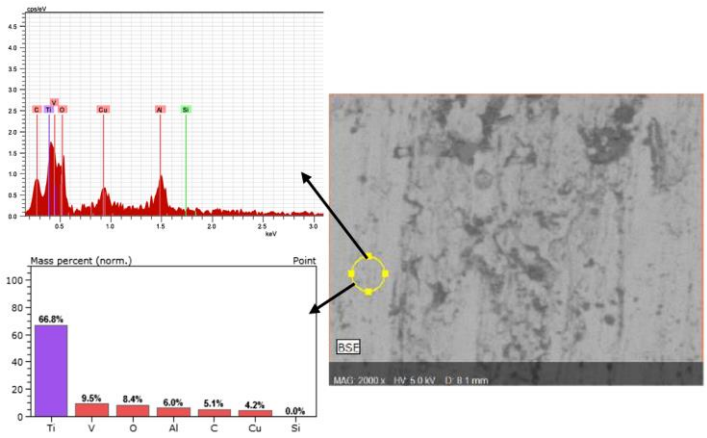
D. Setti cùng cộng sự [32] cũng giải thích cơ chế giảm ma sát thông qua sự hình thành lớp tribofilm trên bề mặt gia công khi mài hợp kim Ti–6Al–4V. Kết quả nghiên cứu cho thấy bề mặt gia công trong điều kiện MQL với nanofluid có cấu trúc mịn hơn và ít khuyết tật hơn so với điều kiện khô và ướt . Đồng thời, phân tích EDS (Hình 1.18 và 1.19) xác nhận sự hiện diện của các nguyên tố từ hạt nano có trên trên bề mặt gia công, chứng tỏ sự hình thành lớp màng bảo vệ. Lớp tribofilm này đặc biệt rõ rệt đối với Al_2O_3 do nhiệt độ nóng chảy cao, trong khi với CuO, lớp màng này kém ổn định hơn do dễ bị nóng chảy lại trong vùng mài.



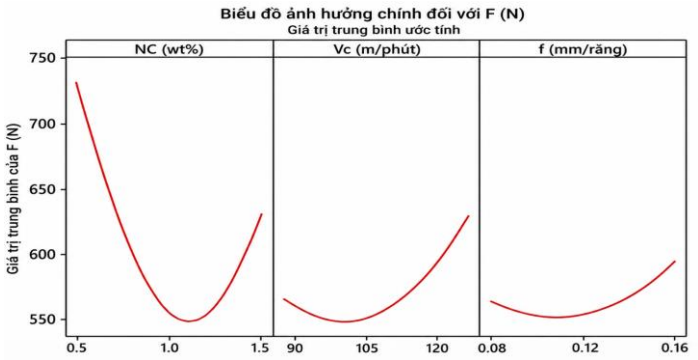
Hình 1.18. *Phân tích EDS bề mặt gia công dưới điều kiện MQL sử dụng nanofluid Al_2O_3, cho thấy sự hiện diện của các nguyên tố từ hạt nano và sự hình thành lớp tribofilm trên bề mặt [32]*

Nồng độ hạt nano là một thông số quan trọng cần tối ưu hóa. Kết quả nghiên cứu trong [33] cho thấy nồng độ hạt nano Al_2O_3 là yếu tố ảnh hưởng chi phối đến hiệu năng gia công trong điều kiện nano-MQL. Khi tăng nồng độ từ 0.5 wt% lên khoảng 1.0–1.25 wt%, lực cắt giảm đáng kể nhờ hiệu ứng bôi trơn và giảm ma sát tại vùng cắt (Hình 1.20). Tuy nhiên, độ nhám bề mặt có xu hướng tăng nhẹ ở vùng nồng độ trung bình do hiện tượng tương tác và va chạm giữa các hạt nano. Khi nồng độ tiếp tục tăng cao (>1.2 wt%), hiệu quả bôi trơn suy giảm do hiện tượng kết tụ và cản trở dòng chảy, dẫn đến lực cắt và độ nhám đều tăng trở lại. Nghiên cứu này cũng lưu ý rằng nồng độ hạt nano kết hợp với tốc độ cắt là yếu tố quyết định đến cả

lực cắt và chất lượng bề mặt. Kết quả tối ưu xác định giá trị nồng độ khoảng 1.27 wt% cho hiệu năng tổng thể tốt nhất, khẳng định vai trò quan trọng của việc lựa chọn nồng độ hạt nano phù hợp trong tối ưu hóa quá trình phay cứng dưới điều kiện nano-MQL.



Hình 1.19. *Phân tích EDS bề mặt gia công dưới điều kiện MQL sử dụng nanofluid CuO, thể hiện thành phần nguyên tố đặc trưng và mức độ hình thành lớp màng bôi trơn trên bề mặt gia công [32]*



Hình 1.20. *Ảnh hưởng chính của các thông số công nghệ (nồng độ hạt nano, tốc độ cắt và lượng chạy dao) đến lực cắt tổng F.*

Tóm lại, nano-MQL là một bước phát triển quan trọng của công nghệ MQL, trong đó hạt nano CuO đóng vai trò đặc biệt nhờ khả năng cải thiện đồng thời tính bôi trơn và truyền nhiệt. Việc lựa chọn và tối ưu hóa hạt nano CuO không chỉ giúp nâng cao hiệu quả gia công mà còn góp phần hướng tới các giải pháp gia công bền vững và thân thiện môi trường trong công nghiệp hiện đại.

1.3. Các nghiên cứu về mô hình hóa và tối ưu hóa trong phay cứng

1.3.1. Các nghiên cứu về mô hình hóa quá trình phay cứng

Mô hình hóa quá trình phay cứng đóng vai trò quan trọng trong việc dự đoán, phân tích và tối ưu hóa các đại lượng đặc trưng như lực cắt, nhiệt độ, độ nhám bề mặt và mài mòn dụng cụ. Trong những năm gần đây, nhiều hướng tiếp cận khác nhau đã được phát triển, bao gồm mô hình thực nghiệm, mô hình thống kê và mô hình số dựa trên cơ học quá trình cắt. Các nghiên cứu ban đầu tập trung vào việc

xây dựng các quan hệ thực nghiệm giữa thông số cắt và chất lượng bề mặt hoặc lực cắt thông qua các phương pháp hồi quy và thiết kế thí nghiệm [34], [35]. Các mô hình này cho phép dự đoán nhanh các đại lượng đầu ra, tuy nhiên thường bị giới hạn trong phạm vi điều kiện thí nghiệm cụ thể.

Song song với đó, các mô hình dựa trên cơ học quá trình cắt đã được phát triển nhằm mô tả chi tiết hơn các hiện tượng xảy ra trong vùng cắt. Các nghiên cứu sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) đã cho phép mô phỏng sự hình thành phoi, phân bố ứng suất – biến dạng và nhiệt độ trong quá trình phay cứng [36], [37]. Đặc biệt, các mô hình này có khả năng phân tích ảnh hưởng của tải nhiệt – cơ đến biến đổi cấu trúc vật liệu và chất lượng bề mặt gia công. Ngoài ra, các nghiên cứu về cơ chế ma sát và phân bố nhiệt tại vùng tiếp xúc dao–phoi cũng đã được thực hiện nhằm nâng cao độ chính xác của mô hình [38].

Một hướng nghiên cứu quan trọng khác là mô hình hóa năng lượng và hiệu suất gia công. Các nghiên cứu đã chỉ ra mối quan hệ chặt chẽ giữa năng lượng cắt, lực cắt và điều kiện công nghệ trong phay cứng, qua đó cho phép đánh giá hiệu quả quá trình gia công từ góc độ tiêu thụ năng lượng và tính bền vững [39], [40]. Đồng thời, các mô hình này còn được sử dụng để xây dựng các chỉ số đặc trưng cho trạng thái bề mặt và cơ chế biến dạng vật liệu trong quá trình gia công [41].

Bên cạnh các mô hình vật lý và thực nghiệm, các phương pháp mô hình hóa hiện đại dựa trên trí tuệ nhân tạo và học máy cũng đang được áp dụng rộng rãi. Các mô hình lai kết hợp giữa cơ học quá trình và học máy cho phép nâng cao độ chính xác dự đoán trong điều kiện gia công phức tạp [42], [43]. Những phương pháp này đặc biệt hiệu quả khi xử lý dữ liệu thực nghiệm lớn và các mối quan hệ phi tuyến giữa các thông số đầu vào và đầu ra của quá trình.

Ngoài ra, một số nghiên cứu cũng tập trung vào việc mô hình hóa ảnh hưởng của lớp phủ dụng cụ và điều kiện bôi trơn đến quá trình phay cứng. Các mô hình số đã cho thấy lớp phủ cứng có ảnh hưởng đáng kể đến phân bố tải và ứng suất trong dụng cụ, từ đó ảnh hưởng đến mài mòn và tuổi thọ dụng cụ [44], [45]. Đồng thời, việc kết hợp các mô hình này với điều kiện bôi trơn tiên tiến như MQL cũng giúp nâng cao khả năng dự đoán hiệu năng gia công [46].

Tổng thể, các nghiên cứu về mô hình hóa quá trình phay cứng đã đạt được nhiều tiến bộ quan trọng, từ các mô hình thực nghiệm đơn giản đến các mô hình số phức tạp và các phương pháp học máy hiện đại. Tuy nhiên, vẫn tồn tại khoảng trống nghiên cứu trong việc xây dựng các mô hình tích hợp có khả năng dự đoán đồng thời nhiều mục tiêu (đa mục tiêu) và phù hợp với các điều kiện gia công tiên tiến như nano-MQL, đặc biệt đối với các vật liệu khó cắt và điều kiện gia công thực tế.

1.3.2. Tối ưu hóa đơn mục tiêu trong gia công phay cứng

Tối ưu hóa đơn mục tiêu là hướng tiếp cận phổ biến trong nghiên cứu phay cứng, trong đó một đại lượng đầu ra chính như độ nhám bề mặt, lực cắt, mài mòn dụng cụ hoặc năng suất gia công được lựa chọn làm hàm mục tiêu cần tối ưu. Các nghiên cứu ban đầu chủ yếu tập trung vào việc tối ưu hóa độ nhám bề mặt nhằm nâng cao chất lượng gia công. Thông qua các phương pháp thiết kế thí nghiệm và hồi quy, nhiều tác giả đã xây dựng được các mô hình dự đoán và xác định được vùng thông số cắt tối ưu cho các vật liệu thép tôi như AISI D2 hoặc H13 [34], [35], [26]. Các kết quả này cho thấy tốc độ cắt và lượng chạy dao là hai yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến chất lượng bề mặt trong phay cứng.

Bên cạnh đó, một số nghiên cứu tập trung vào tối ưu hóa lực cắt và năng lượng tiêu thụ nhằm nâng cao hiệu quả gia công và giảm tải cho hệ thống máy công cụ. Các mô hình năng lượng và lực cắt đã được sử dụng để xác định các điều kiện gia công tối ưu, góp phần giảm tiêu hao năng lượng và tăng độ ổn định của quá trình [39], [40]. Ngoài ra, việc tối ưu hóa mài mòn dụng cụ và tuổi thọ dao cũng là một hướng nghiên cứu quan trọng, đặc biệt trong gia công vật liệu khó cắt, nơi mà chi phí dụng cụ chiếm tỷ trọng lớn trong tổng chi phí sản xuất [27].

Trong những năm gần đây, các phương pháp tối ưu hóa thống kê như Taguchi, ANOVA và phương pháp quan hệ xám (Grey Relational Analysis - GRA) đã được áp dụng rộng rãi trong phay cứng. Các phương pháp này cho phép đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng thông số công nghệ và xác định nhanh bộ thông số tối ưu với số lượng thí nghiệm hạn chế [25], [24]. Kết quả nghiên cứu cho thấy các phương pháp này có hiệu quả cao trong việc tối ưu hóa đơn mục tiêu như độ nhám bề mặt hoặc lực cắt, đặc biệt khi dữ liệu thực nghiệm có độ phân tán lớn.

Ngoài ra, một số nghiên cứu cũng xem xét tối ưu hóa năng suất gia công thông qua đại lượng tốc độ bóc tách vật liệu (MRR). Các kết quả cho thấy việc tăng tốc độ cắt và lượng chạy dao có thể cải thiện MRR, tuy nhiên cần kiểm soát chặt chẽ để không làm suy giảm chất lượng bề mặt hoặc gia tăng mài mòn dụng cụ [47], [48]. Điều này cho thấy tồn tại mối quan hệ đánh đổi (trade-off) giữa năng suất và chất lượng trong gia công phay cứng.

Bên cạnh các phương pháp truyền thống, một số nghiên cứu gần đây đã bắt đầu áp dụng các kỹ thuật mô hình hóa kết hợp với tối ưu hóa nhằm nâng cao độ chính xác và khả năng dự đoán. Các mô hình hồi quy kết hợp với phương pháp thiết kế thí nghiệm hoặc các thuật toán tối ưu hóa đã được sử dụng để xác định các thông số tối ưu trong các điều kiện gia công cụ thể [49], [50]. Ngoài ra, việc áp dụng các

phương pháp tối ưu hóa dựa trên dữ liệu thực nghiệm cũng cho phép cải thiện đáng kể hiệu năng gia công trong các điều kiện bôi trơn tiên tiến như MQL [51], [52].

Tuy nhiên, tối ưu hóa đơn mục tiêu vẫn tồn tại những hạn chế nhất định khi chỉ tập trung vào một đại lượng đầu ra mà chưa xem xét đồng thời các yếu tố khác. Trong thực tế, các mục tiêu như độ nhám bề mặt, lực cắt và MRR thường có mối quan hệ mâu thuẫn, do đó việc tối ưu hóa đơn mục tiêu khó có thể phản ánh đầy đủ bản chất của quá trình gia công. Điều này đã thúc đẩy sự phát triển của các phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu trong các nghiên cứu gần đây.

Tóm lại, các nghiên cứu về tối ưu hóa đơn mục tiêu trong phay cứng đã cung cấp nền tảng quan trọng cho việc lựa chọn thông số công nghệ phù hợp nhằm cải thiện chất lượng và hiệu quả gia công. Tuy nhiên, để đáp ứng yêu cầu ngày càng cao của sản xuất hiện đại, cần phát triển các phương pháp tối ưu hóa tiên tiến hơn có khả năng xem xét đồng thời nhiều mục tiêu và điều kiện gia công phức tạp.

1.3.3. Tối ưu hóa đa mục tiêu trong gia công phay cứng

Trong thực tế gia công phay cứng, các mục tiêu công nghệ như độ nhám bề mặt, lực cắt, mài mòn dụng cụ, năng suất (MRR) và tiêu hao năng lượng thường tồn tại mối quan hệ mâu thuẫn, do đó việc tối ưu hóa đa mục tiêu (multi-objective optimization) trở thành hướng tiếp cận cần thiết nhằm đạt được sự cân bằng tối ưu giữa các tiêu chí này. Khác với tối ưu hóa đơn mục tiêu, tối ưu hóa đa mục tiêu cho phép xác định tập nghiệm Pareto, trong đó không tồn tại nghiệm nào vượt trội hoàn toàn so với nghiệm khác về tất cả các mục tiêu.

Các nghiên cứu ban đầu trong lĩnh vực này chủ yếu sử dụng các phương pháp thống kê như Taguchi kết hợp với phân tích quan hệ xám (GRA) để chuyển bài toán đa mục tiêu thành bài toán đơn mục tiêu thông qua hàm tổng hợp [25], [24]. Phương pháp này cho phép đánh giá đồng thời nhiều chỉ tiêu như độ nhám và lực cắt, tuy nhiên phụ thuộc vào cách xác định trọng số và không thể biểu diễn đầy đủ mối quan hệ đánh đổi giữa các mục tiêu. Một số nghiên cứu khác cũng áp dụng các phương pháp tương tự để tối ưu hóa đồng thời chất lượng bề mặt và năng suất gia công trong các quá trình phay vật liệu cứng [53].

Sự phát triển của các thuật toán tiến hóa đã mở ra hướng tiếp cận hiệu quả hơn cho tối ưu hóa đa mục tiêu trong phay cứng. Các thuật toán như NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng tìm kiếm hiệu quả tập nghiệm Pareto và duy trì tính đa dạng của nghiệm [54], [55]. Các nghiên cứu cho thấy NSGA-II có thể xác định được các bộ thông số cắt tối ưu, đồng thời cải thiện đáng kể các chỉ tiêu như độ nhám bề mặt và lực cắt trong gia công thép cường độ cao và vật liệu khó cắt [54]. Ngoài ra, các phương pháp tối ưu hóa

dựa trên thuật toán metaheuristic cũng đã được áp dụng để giải quyết các bài toán đa mục tiêu phức tạp trong gia công [56], [57].

Bên cạnh đó, các phương pháp kết hợp giữa mô hình hóa và tối ưu hóa cũng ngày càng được quan tâm. Các mô hình hồi quy, RSM hoặc các mô hình học máy được sử dụng để xây dựng hàm mục tiêu, sau đó kết hợp với các thuật toán tối ưu hóa để tìm nghiệm tối ưu [58], [59]. Cách tiếp cận này cho phép nâng cao độ chính xác dự đoán và giảm số lượng thí nghiệm cần thiết. Đặc biệt, các nghiên cứu gần đây đã áp dụng các mô hình học máy kết hợp với thuật toán tối ưu hóa đa mục tiêu để dự đoán và tối ưu hóa đồng thời mài mòn dụng cụ và chất lượng bề mặt trong quá trình phay [60].

Ngoài ra, trong điều kiện bôi trơn tiên tiến như MQL và nano-MQL, tối ưu hóa đa mục tiêu đóng vai trò quan trọng trong việc cân bằng giữa chất lượng gia công và hiệu quả năng lượng. Các nghiên cứu thực nghiệm đã cho thấy việc tối ưu hóa đồng thời độ nhám bề mặt, lực cắt và MRR dưới điều kiện nano-MQL có thể nâng cao đáng kể hiệu năng gia công so với các phương pháp truyền thống [61], [62]. Điều này đặc biệt có ý nghĩa trong bối cảnh gia công bền vững, nơi các tiêu chí về môi trường và năng lượng ngày càng được chú trọng.

Tuy nhiên, mặc dù đã đạt được nhiều kết quả tích cực, các nghiên cứu hiện tại vẫn còn một số hạn chế. Phần lớn các nghiên cứu tập trung vào số lượng mục tiêu hạn chế (2–3 mục tiêu) và chưa xem xét đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng như điều kiện bôi trơn, vật liệu dụng cụ và cấu trúc lớp phủ. Ngoài ra, việc lựa chọn nghiệm tối ưu từ tập Pareto vẫn còn mang tính chủ quan và phụ thuộc vào kinh nghiệm của người nghiên cứu.

Tóm lại, tối ưu hóa đa mục tiêu trong gia công phay cứng là một hướng nghiên cứu quan trọng và đang phát triển mạnh mẽ, đặc biệt với sự hỗ trợ của các thuật toán tiến hóa và học máy. Việc kết hợp giữa mô hình hóa chính xác và các phương pháp tối ưu hóa tiên tiến sẽ là nền tảng để nâng cao hiệu quả gia công, đồng thời đáp ứng các yêu cầu về chất lượng, năng suất và tính bền vững trong sản xuất hiện đại.

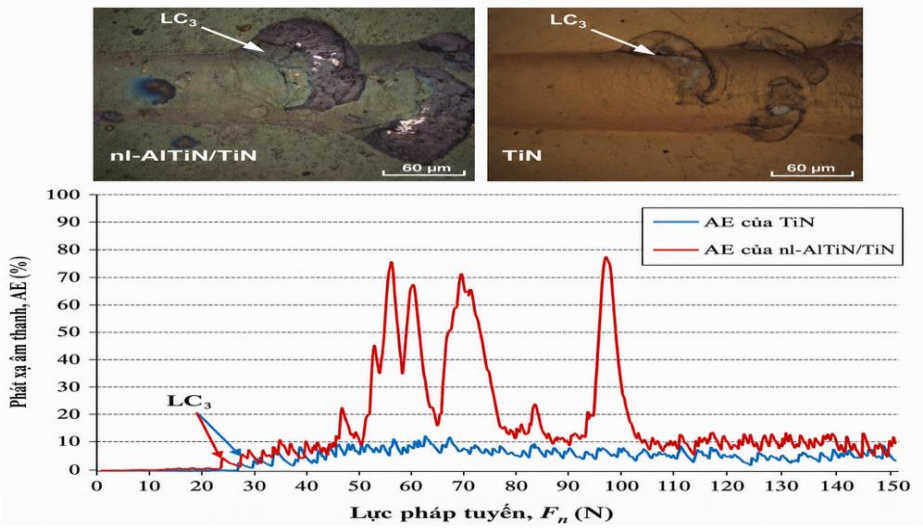
1.4. Vật liệu dụng cụ cắt trong gia công cứng

Gia công cứng là quá trình gia công các vật liệu có độ cứng cao (thường lớn hơn 45 HRC), trong đó điều kiện làm việc của dụng cụ cắt trở nên khắc nghiệt do nhiệt độ cao, ứng suất lớn và ma sát mạnh tại vùng cắt. Trong các điều kiện này, vật liệu dụng cụ cắt cần đáp ứng đồng thời nhiều yêu cầu như độ cứng cao ở nhiệt độ làm việc, khả năng chống mài mòn và biến dạng dẻo tốt, độ bền nhiệt cao và khả năng chống oxy hóa, đồng thời vẫn duy trì độ dai nhất định để hạn chế hiện tượng mẻ lưỡi cắt [1], [63]. Các nghiên cứu cho thấy trong gia công cứng, nhiệt độ vùng cắt có thể vượt quá 1000 °C, làm gia tăng nhanh chóng mài mòn dụng cụ và ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bề mặt gia công [1], [39].

Các vật liệu dụng cụ cắt phổ biến trong gia công cứng bao gồm hợp kim cứng (WC–Co), gốm (ceramic), nitride bo lập phương (CBN) và kim cương đa tinh thể (PCD). Trong đó, hợp kim cứng phủ được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng cân bằng giữa độ bền, độ dai và chi phí, đặc biệt trong các nguyên công phay cứng [63], [64]. Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy dụng cụ CBN có khả năng gia công hiệu quả ở độ cứng rất cao, tuy nhiên chi phí lớn và tính giòn hạn chế phạm vi ứng dụng, trong khi dụng cụ hợp kim cứng phủ vẫn là lựa chọn phổ biến trong công nghiệp [63], [64].

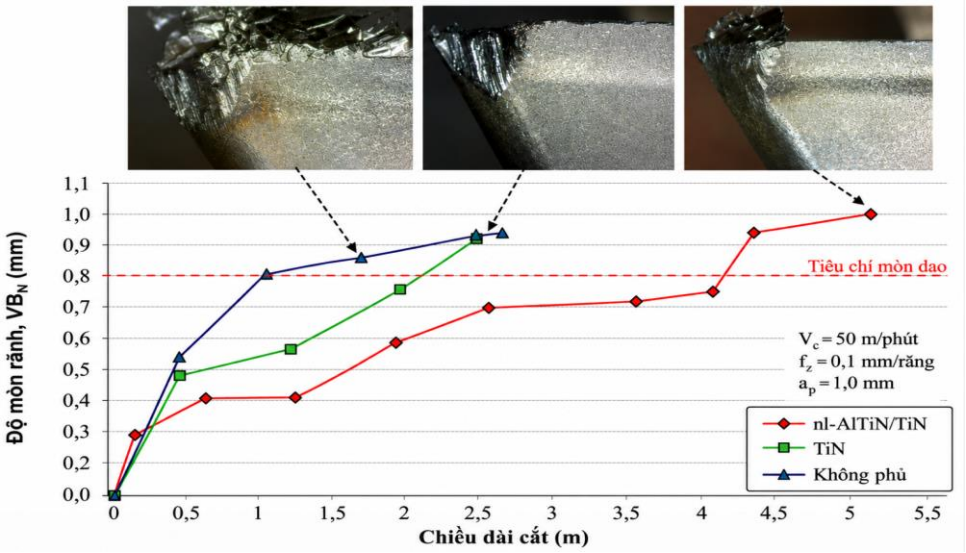
Để nâng cao hiệu năng của dụng cụ cắt, việc sử dụng các lớp phủ cứng (hard coatings) đã trở thành giải pháp chủ đạo. Các lớp phủ như TiN, TiAlN và AlTiN giúp cải thiện đáng kể độ cứng, giảm ma sát và nâng cao khả năng chống oxy hóa ở nhiệt độ cao, qua đó kéo dài tuổi thọ dụng cụ [63], [64]. Đặc biệt, các lớp phủ chứa Al có khả năng hình thành lớp oxit bảo vệ Al_2O_3 ở nhiệt độ cao, giúp ổn định quá trình gia công trong điều kiện khô hoặc tốc độ cao [63].

Trong những năm gần đây, các lớp phủ cấu trúc nano như multilayer, nanolayer và nanocomposite đã thu hút sự quan tâm mạnh mẽ do khả năng cải thiện đồng thời nhiều tính chất cơ học và tribology. Cấu trúc nanocomposite, trong đó các hạt nitride kích thước nano phân tán trong nền vô định hình, giúp tăng độ cứng và khả năng chống biến dạng nhờ hiệu ứng biên hạt. Đồng thời, cấu trúc nhiều lớp hoặc nanolayer tạo ra các mặt phân cách dày đặc, góp phần ngăn chặn sự lan truyền vết nứt và nâng cao độ bám dính của lớp phủ với nền [63]. Các nghiên cứu gần đây cũng cho thấy việc kết hợp lớp phủ nano với các chiến lược bôi trơn tiên tiến như MQL hoặc nano-MQL có thể tiếp tục cải thiện hiệu năng gia công, giảm lực cắt, nhiệt độ và mài mòn dụng cụ [15] [23].



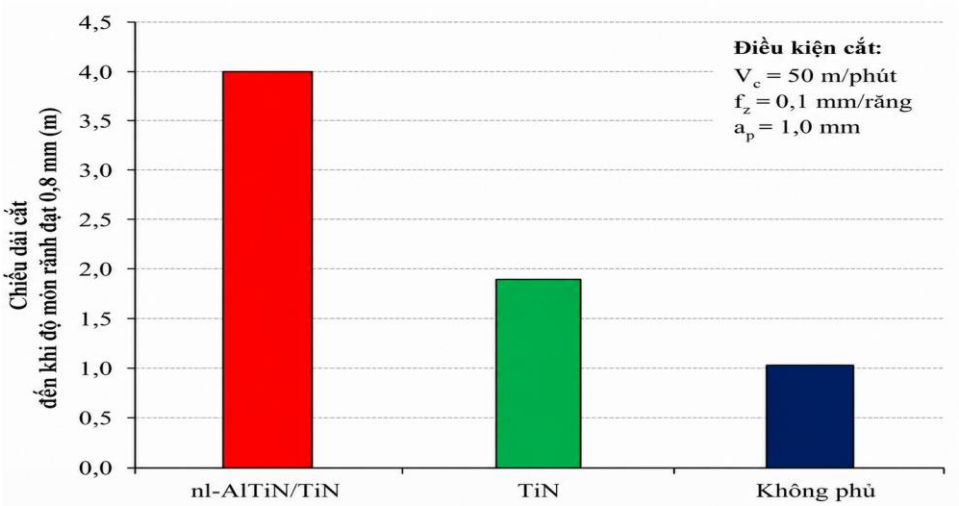
Hình 1.21. *Kết quả thử nghiệm scratch của lớp phủ trên nền thép AISI D2, thể hiện tín hiệu phát xạ âm thanh (AE) theo lực tác dụng và xác định tải tới hạn gây bong tróc lớp phủ [65]*

Kết quả nghiên cứu trong [65] cho thấy lớp phủ nanolayer AlTiN/TiN chế tạo bằng phương pháp PVD mang lại sự cải thiện đáng kể về tính chất cơ học, khả năng chống mài mòn và hiệu năng gia công khi phay hợp kim Ti6Al4V. Kết quả cho thấy lớp phủ nanolayer có độ cứng và đặc biệt là khả năng chống biến dạng dẻo (tỷ số H^3/E^{*2}) cao hơn so với lớp phủ TiN đơn lớp. Đồng thời, thử nghiệm scratch cho thấy lớp phủ nanolayer đạt giá trị tải tới hạn LC_5 cao hơn (≈98 N so với 76 N của TiN), chứng tỏ độ bám dính với nền vượt trội (Hình 1.21). Trong điều kiện gia công, lớp phủ AlTiN/TiN giúp giảm đáng kể mài mòn dạng rãnh (notch wear) và kéo dài tuổi thọ dụng cụ lên khoảng 2.1 lần so với lớp phủ TiN và khoảng 4 lần so với dụng cụ không phủ (Hình 1.22 và Hình 1.23). Thêm vào đó, lớp phủ nanolayer cũng giúp giảm hiện tượng bám dính và hình thành cạnh dính trên lưỡi cắt [65].



Hình 1.22. *Sự thay đổi mòn rãnh (notch wear) và hình ảnh dụng cụ sau gia công theo chiều dài cắt khi phay Ti6Al4V [65]*

Faga, M và cộng sự [66] cho biết lớp phủ nanocomposite AlSiTiN chế tạo bằng công nghệ PVD mang lại nhiều ưu điểm vượt trội so với các lớp phủ truyền thống trong gia công tốc độ cao, đặc biệt ở điều kiện nhiệt độ cao. Nhờ cấu trúc đặc trưng gồm các hạt nanocrystalline AlTiN phân tán trong nền vô định hình Si_3N_4, lớp phủ này đạt được sự kết hợp tối ưu giữa độ cứng cao và độ bền dai, đồng thời thể hiện độ bám dính tốt với nền dụng cụ . Nghiên cứu cũng nhấn mạnh rằng khả năng chống mài mòn của lớp phủ nanocomposite không chỉ vượt trội ở nhiệt độ cao (600 °C), nơi mà các lớp phủ truyền thống như AlCrN suy giảm mạnh hiệu năng (Hình 6), mà còn duy trì tính ổn định nhờ cơ chế hình thành lớp oxit bảo vệ (Al_2O_3 hoặc Al_2O_3-SiO_2) trên bề mặt. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng cho thấy lớp phủ nanocomposite cho khả năng chống mài mòn và độ ổn định cao hơn trong điều kiện cắt khô tốc độ cao, qua đó nâng cao tuổi thọ dụng cụ và hiệu quả gia công.



Hình 1.23. *So sánh chiều dài cắt đạt được đến khi đạt giới hạn mòn của các dụng cụ phủ và không phủ [65]*

J. Tymczyszyn và cộng sự [67] báo cáo rằng lớp phủ nanocomposite PVD nACo3 (AlTiSiN) mang lại hiệu quả vượt trội trong việc nâng cao khả năng chống mài mòn và ổn định quá trình gia công khi phay thép không gỉ 316L trong điều kiện làm mát bằng khí. Nhờ cấu trúc nanocomposite gồm các hạt nano AlTiN phân tán trong nền vô định hình Si_3N_4, lớp phủ này đạt được sự kết hợp tối ưu giữa độ cứng cao, độ bền nhiệt và khả năng chống oxy hóa, qua đó làm giảm đáng kể tốc độ mài mòn của dụng cụ và kéo dài tuổi thọ làm việc . Kết quả nghiên cứu của họ cho thấy lớp phủ nanocomposite có khả năng hạn chế sự bám dính vật liệu và hình thành cạnh dính (BUE), đồng thời giảm ảnh hưởng của các cơ chế mài mòn dính và khuếch tán.

S. Zhang và cộng sự [68] phát hiện lớp phủ đa lớp và nanocomposite AlCrTiSiN sau khi tối ưu cấu trúc có thể cải thiện rõ rệt khả năng gia công nhờ sự kết hợp giữa độ cứng cao, độ bám dính tốt và hệ số ma sát thấp. Cấu trúc nanocomposite với các pha nitride tinh thể mịn phân tán trong nền vô định hình giúp hạn chế chuyển động lệch mạng, từ đó tăng độ cứng và khả năng chống biến dạng dẻo, đồng thời nâng cao độ bền nhiệt. Kết quả nghiên cứu của họ cũng cho thấy lớp phủ này giảm mài mòn, hạn chế hiện tượng bám dính và ổn định quá trình gia công tốt hơn so với các lớp phủ truyền thống, qua đó kéo dài tuổi thọ dụng cụ và cải thiện chất lượng bề mặt, đặc biệt trong điều kiện gia công khô và tốc độ cao.

Ngoài ra, hiệu năng của dụng cụ cắt trong gia công cứng không chỉ phụ thuộc vào vật liệu và lớp phủ mà còn chịu ảnh hưởng bởi điều kiện công nghệ như tốc độ cắt, lượng chạy dao và phương pháp làm mát – bôi trơn. Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng sự kết hợp giữa vật liệu dụng cụ cắt tiên tiến và các phương pháp bôi trơn tối thiểu (MQL) hoặc nano-MQL có thể nâng cao đáng kể hiệu quả gia công, đặc biệt đối với các vật liệu khó cắt như thép tôi và hợp kim titan [15] [23].

Tóm lại, vật liệu dụng cụ cắt trong gia công cứng đóng vai trò quyết định đến hiệu quả và độ ổn định của quá trình gia công. Xu hướng phát triển hiện nay tập trung vào việc tối ưu hóa đồng thời vật liệu nền và lớp phủ nano nhằm đạt được sự cân bằng giữa độ cứng, độ bám dính và độ bền nhiệt, kết hợp với các chiến lược bôi trơn tiên tiến để hướng tới gia công hiệu quả và bền vững.

1.5. Tình hình nghiên cứu phay cứng ở Việt Nam

Trong những năm gần đây, nghiên cứu về phay cứng ở Việt Nam đã có bước phát triển rõ rệt, thể hiện qua sự gia tăng cả về số lượng công bố lẫn chiều sâu nội dung nghiên cứu. Các hướng nghiên cứu chủ yếu tập trung vào: đánh giá ảnh hưởng của thông số công nghệ đến chất lượng bề mặt, lực cắt và mòn dụng cụ; nghiên cứu các điều kiện bôi trơn - làm nguội tiên tiến như MQL [69], MQCL và nano-MQL [61], [62]; xây dựng mô hình thực nghiệm; và tối ưu hóa quá trình gia công theo các tiêu chí đơn mục tiêu hoặc đa mục tiêu [61], [62], [70], [71]. Điều này cho thấy cộng đồng nghiên cứu trong nước đã bắt đầu tiếp cận khá đồng bộ với các xu hướng quốc tế trong lĩnh vực gia công cứng.

Một trong những hướng nghiên cứu nổi bật là đánh giá ảnh hưởng của các thông số cắt đến chất lượng bề mặt và lực cắt khi phay thép đã nhiệt luyện. Các nghiên cứu trong nước đã xem xét nhiều loại vật liệu khác nhau như SKD11, SKD61, AISI H13, Hardox 500 và một số thép hợp kim khác. Nguyễn Quang Minh và Đỗ Thế Vinh đã nghiên cứu phay cứng SKD11 dưới điều kiện MQL sử dụng hạt SiO_2 và cho thấy việc lựa chọn phù hợp chế độ cắt và điều kiện bôi trơn có thể cải thiện đáng kể hiệu năng gia công [61]. Dương Trung khảo sát ảnh hưởng của thông số cắt đến nhám bề mặt khi phay thép AISI 1045, qua đó làm rõ vai trò của tốc độ cắt, lượng chạy dao và chiều sâu cắt trong việc hình thành chất lượng bề mặt [70]. Hoàng Tiến Dũng và cộng sự đã nghiên cứu lực cắt và độ nhám bề mặt khi phay mặt đầu thép SKD61 tôi cứng, cho thấy mối quan hệ chặt chẽ giữa chế độ cắt và tải cơ học tác dụng lên quá trình gia công [72]. Các nghiên cứu so sánh điều kiện gia công khô và có dung dịch trơn nguội đối với thép khuôn SKD61 cũng cho thấy môi trường bôi trơn có ảnh hưởng rõ rệt đến độ bóng bề mặt sau gia công [71].

Cùng với đó, một số nghiên cứu trong nước tập trung vào việc cải thiện hiệu quả phay cứng thông qua công nghệ bôi trơn tối thiểu và các biến thể của nó. Đỗ Thế Vinh và Hsu Quốc Cường đã tối ưu điều kiện MQL và thông số cắt trong phay cứng AISI H13, chứng minh rằng MQL là một giải pháp hiệu quả để giảm lực cắt và cải thiện bề mặt gia công [73]. Đỗ Thế Vinh và Lê Ngọc Anh Vũ tiếp tục tối ưu đồng thời độ nhám bề mặt và lực cắt trong phay cứng AISI H13 dưới điều kiện MQL [69]. Ở một hướng khác, nhiều công trình trong nước đã đi sâu vào MQCL và

nano-MQL, đặc biệt với các loại dầu nền có bổ sung hạt nano. Trần Minh Đức và cộng sự đã chứng minh hiệu quả của nanofluid Al_2O_3 trong MQL khi phay cứng thép 60Si2Mn bằng dao hợp kim cứng phủ, cho thấy khả năng giảm lực cắt và cải thiện chất lượng bề mặt [90]. Sau đó, Trần Minh Đức, Trần Thế Long và Ngô Minh Tuấn tiếp tục nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số MQL sử dụng dung dịch cắt nano đến hiệu năng phay cứng [118]. Các kết quả này đã tạo nền tảng quan trọng cho hướng nghiên cứu nano-MQL trong nước.

Một nhóm công trình khác tập trung vào vai trò của loại hạt nano, nồng độ hạt nano và môi trường bôi trơn trong phay cứng. Trần Minh Đức, Trần Thế Long và Trần Quyết Chiến đã nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ hạt nano Al_2O_3 và chế độ cắt đến nhám bề mặt khi phay cứng thép Hardox 500 sử dụng MQCL, cho thấy nồng độ hạt nano là một thông số công nghệ có ảnh hưởng đáng kể đến đầu ra quá trình [119]. Cũng theo hướng này, Trần Minh Đức và cộng sự đã công bố các nghiên cứu về dung dịch nano lai Al_2O_3/MoS_2 trong MQCL khi phay cứng Hardox 500 [121], cũng như dung dịch nhũ tương phân tán nano MoS_2 khi phay cứng thép AISI D2 [122]. Các nghiên cứu gần đây hơn tiếp tục mở rộng với việc khảo sát hiệu năng phay cứng dưới môi trường MQL có hỗ trợ nanofluid MoS_2 [29], [107]. Đặc biệt, công bố năm 2024 của Trần Minh Đức, Ngô Minh Tuấn và Trần Thế Long về tối ưu hóa nồng độ Al_2O_3 và thông số cắt trong phay cứng dưới môi trường nano-MQL đã chỉ ra rằng nồng độ hạt nano là yếu tố chi phối mạnh đến lực cắt và độ nhám bề mặt, đồng thời xác định được bộ thông số tối ưu cho quá trình [33]. Những kết quả này cho thấy nghiên cứu trong nước không chỉ dừng ở việc xác nhận hiệu quả của nano-MQL mà đã bắt đầu đi sâu vào tối ưu hóa định lượng.

Bên cạnh các nghiên cứu về môi trường gia công, một số công trình trong nước còn chú ý tới việc hoàn thiện hệ thống công nghệ phục vụ phay cứng. Trần Minh Đức, Phạm Quang Đồng, Trần Thế Long và Trần Quyết Chiến đã nghiên cứu chế tạo đầu phun dung dịch lạnh cho bôi trơn làm nguội tối thiểu và ứng dụng vào phay cứng thép SKD11[120]. Đây là hướng nghiên cứu có giá trị thực tiễn cao vì không chỉ khảo sát đầu ra công nghệ mà còn can thiệp vào chính hệ thống tạo môi trường bôi trơn – làm nguội, góp phần làm chủ thiết bị và công nghệ trong điều kiện trong nước.

Về mô hình hóa và tối ưu hóa, các nhà nghiên cứu Việt Nam cũng đã có nhiều đóng góp đáng chú ý. Nguyễn Quang Minh và Đỗ Thế Vinh đã đề xuất các cách tiếp cận tối ưu cho phay cứng SKD11 dưới MQL có sử dụng hạt SiO_2 [61]. Đỗ Thế Vinh và Hsu Quốc Cường [73], cũng như Đỗ Thế Vinh và Lê Ngọc Anh Vũ [69], sử dụng các phương pháp tối ưu hóa dựa trên thực nghiệm để xác định chế độ cắt hợp lý

trong phay cứng thép H13. Vũ Ngọc Cường, Đặng Xuân Phúc và Huang Sheng-Chih đã công bố các nghiên cứu tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình phay cứng AISI H13 theo các tiêu chí năng suất, chất lượng và năng lượng dưới điều kiện nanofluid MQL [74], đồng thời thực hiện tối ưu hóa đồng thời độ nhám bề mặt và lực cắt bằng Taguchi kết hợp RSM [75]. Do và Phan cũng nghiên cứu tối ưu hóa đa mục tiêu độ nhám và MRR trong phay thép SKD11 tôi cứng dưới điều kiện nanofluid MQL [62]. Gần đây, Ngô Cẩm Vũ, Đặng Xuân Phúc và Huang Sheng-Chih đã áp dụng Grey-Taguchi để tối ưu hóa gia công thép SKD61 dưới điều kiện nanofluid MQL [76], trong khi Phan Ngọc Linh và cộng sự nghiên cứu tối ưu hóa đa mục tiêu cho phay tinh thép C45 bằng thiết kế thực nghiệm [77], và Nguyễn Lam Khánh đề xuất phương pháp tham chiếu lý tưởng cho tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình phay thép X12M [78]. Những nghiên cứu này cho thấy cộng đồng nghiên cứu trong nước đã chuyển mạnh từ khảo sát thực nghiệm đơn thuần sang tích hợp mô hình hóa và tối ưu hóa.

Ngoài các phương pháp tối ưu truyền thống, xu hướng kết hợp học máy với tối ưu hóa cũng đã xuất hiện trong các công bố của các nhóm tác giả Việt Nam. Nguyễn Anh Tuấn, Nguyễn Văn Hùng, Lê Thanh Tùng và Nguyễn Thị Ngọc đã sử dụng học máy kết hợp NSGA-II để tối ưu hóa đa mục tiêu độ nhám bề mặt và mòn dụng cụ trong phay tốc độ cao hợp kim nhôm AA6061 [79]. Tiếp đó, Nguyễn Văn Hùng và cộng sự tiếp tục kết hợp học máy với NSGA-III để tối ưu hóa thông số phay 42CrMo4 [80]. Mặc dù các nghiên cứu này không hoàn toàn thuộc phay cứng thép tôi, nhưng về mặt phương pháp, chúng cho thấy các nhóm nghiên cứu trong nước đã bắt đầu tiếp cận các công cụ hiện đại như machine learning và evolutionary optimization, mở ra tiềm năng lớn cho việc áp dụng vào bài toán phay cứng trong thời gian tới.

Một số công trình cũng tập trung vào các khía cạnh chuyên sâu hơn như nhiệt độ vùng cắt, mòn dụng cụ và ảnh hưởng của điều kiện gia công đến bề mặt đã nhiệt luyện. Nguyễn Quốc, Đỗ Thế Vinh và Nguyễn đã nghiên cứu giảm nhiệt độ vùng cắt trong phay cứng thép SKD61 [81]. Lê Thế Hưng trong luận án tiến sĩ đã phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến chất lượng bề mặt và mòn dụng cụ khi phay cao tốc thép SKD61 đã nhiệt luyện [82]. Phạm Hữu Lộc và Nguyễn Thị Xuân Chinh đã ứng dụng Taguchi để cải tiến độ bóng bề mặt của thép SKD61 bằng lựa chọn thông số phay tối ưu [83]. Mạnh Vũ, Đỗ Thế Vinh cũng đã nghiên cứu tác động của điều kiện cắt và bôi trơn – làm nguội đến phay cứng SKD11 bằng tiếp cận Taguchi [84]. Những công trình này góp phần bổ sung tri thức theo hướng vừa thực nghiệm vừa tối ưu hóa, đồng thời ngày càng gắn với yêu cầu sản xuất thực tế.

Nhìn chung, tình hình nghiên cứu phay cứng ở Việt Nam đã hình thành khá rõ các hướng chính: khảo sát ảnh hưởng của chế độ cắt; nghiên cứu MQL, MQCL và nano-MQL; phân tích lực cắt, độ nhám, nhiệt độ vùng cắt và mòn dụng cụ; xây dựng mô hình thực nghiệm; và tối ưu hóa đơn mục tiêu hoặc đa mục tiêu [61], [62], [69], [70], [71], [84]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu vẫn tập trung vào một số vật liệu thép khuôn phổ biến như SKD11, SKD61, H13, AISI D2 hoặc Hardox 500; số lượng nghiên cứu về các hệ vật liệu khác, về lớp phủ dụng cụ, về mô hình dự đoán phi tuyến có độ chính xác cao, cũng như về tích hợp học máy với tối ưu hóa đa mục tiêu trong điều kiện nano-MQL vẫn còn hạn chế. Đây chính là cơ sở quan trọng để tiếp tục mở rộng nghiên cứu theo các hướng sâu hơn và hiện đại hơn trong thời gian tới.

1.6. Khoảng trống nghiên cứu

Tổng quan các nghiên cứu trên thế giới cho thấy phay cứng đã được khảo sát tương đối sâu ở nhiều khía cạnh như cơ chế tạo phoi, mô hình cơ - nhiệt, tính toàn vẹn bề mặt, mô phỏng số (FEM), tối ưu hóa đa mục tiêu, cũng như phát triển vật liệu dụng cụ và lớp phủ tiên tiến. Bên cạnh đó, các kỹ thuật làm mát - bôi trơn hiện đại như MQL, cryogenic và nano-MQL cũng đã được nghiên cứu rộng rãi nhằm nâng cao hiệu quả gia công. Tuy nhiên, phần lớn các công trình quốc tế tập trung vào các vật liệu phổ biến như AISI H13, D2, A2, 4340 hoặc các vật liệu bền nhiệt như Vanadis và ZrO_2, trong khi gần như chưa có nghiên cứu chuyên sâu về thép dụng cụ hợp kim 90CrSi - một vật liệu có ý nghĩa thực tiễn cao trong các ứng dụng như chày dập thuốc viên và chày dập kim loại tấm. Đồng thời, đa số các nghiên cứu tập trung vào các dạng bề mặt đơn giản như mặt phẳng, bề mặt hốc hoặc biên dạng 3D, trong khi bề mặt trụ ngoài định hình - một dạng hình học phổ biến trong thực tế - lại rất ít được đề cập.

Về môi trường bôi trơn - làm mát, mặc dù nhiều nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của nano-MQL với các loại hạt nano như Al_2O_3, MoS_2, TiO_2, SiO_2 hoặc graphene, nhưng hạt nano CuO - với ưu điểm về độ dẫn nhiệt, khả năng giảm ma sát và tiềm năng ứng dụng trong gia công cứng - vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống trong phay cứng. Các kết quả liên quan đến CuO chủ yếu tập trung vào các quá trình như tiện hoặc khoan, trong khi đối với phay cứng - nơi điều kiện cắt phức tạp hơn do tải trọng dao thay đổi liên tục - vẫn còn thiếu dữ liệu thực nghiệm. Hơn nữa, chưa có nghiên cứu nào đánh giá đồng thời và toàn diện ảnh hưởng của nano-CuO đến các chỉ tiêu quan trọng như lực cắt, độ nhám bề mặt và năng suất bóc tách vật liệu trong một khung phân tích tích hợp.

Ở góc độ mô hình hóa và tối ưu hóa, phần lớn các nghiên cứu hiện nay sử dụng các phương pháp truyền thống như RSM, Taguchi hoặc Grey Relational

Analysis, hoặc các thuật toán tiến hóa như NSGA-II để tối ưu hóa một số chỉ tiêu riêng lẻ (ví dụ Ra–MRR hoặc lực cắt-Ra). Tuy nhiên, rất ít công trình thực hiện tối ưu hóa đa mục tiêu một cách toàn diện, đồng thời xem xét các yếu tố như độ nhám bề mặt, lực cắt, mòn dụng cụ, nhiệt độ vùng cắt và hiệu quả năng lượng, đặc biệt trong điều kiện nano-MQL với biến số nồng độ hạt nano. Ngoài ra, chưa có nghiên cứu nào xây dựng được khung đánh giá mang tính bền vững cho quá trình phay cứng, trong đó tích hợp đồng thời hiệu suất gia công, tiêu hao năng lượng và tuổi thọ dụng cụ.

Trong nước, các nghiên cứu về phay cứng chủ yếu tập trung vào các vật liệu như SKD11, SKD61 và Hardox 500, trong khi chưa có công trình nào nghiên cứu về phay cứng thép 90CrSi, đặc biệt là đối với bề mặt trụ ngoài định hình. Mặc dù một số nghiên cứu đã áp dụng MQL hoặc nano-MQL với các hạt như Al_2O_3, SiO_2 và MoS_2, nhưng chưa có nghiên cứu nào sử dụng hạt nano CuO trong phay cứng thép đã nhiệt luyện. Bên cạnh đó, các nghiên cứu hiện có thường chỉ xem xét một hoặc hai chỉ tiêu đầu ra, thiếu các mô hình tích hợp có khả năng tối ưu hóa đồng thời các tiêu chí quan trọng như độ nhám bề mặt, lực cắt và năng suất bóc tách vật liệu.

Từ những phân tích trên, có thể thấy cần thiết phải phát triển một hướng nghiên cứu tích hợp, tập trung vào: (i) nghiên cứu thực nghiệm phay cứng thép 90CrSi trên bề mặt trụ ngoài định hình; (ii) đánh giá một cách hệ thống ảnh hưởng của nano-MQL sử dụng hạt nano CuO đến quá trình gia công; và (iii) xây dựng mô hình dự báo và tối ưu hóa đa mục tiêu nhằm xác định chế độ cắt tối ưu phục vụ ứng dụng công nghiệp. Đây là hướng nghiên cứu có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, góp phần bổ sung khoảng trống trong lĩnh vực phay cứng hiện nay.

Kết luận chương 1

Chương 1 đã trình bày tổng quan về gia công phay cứng, các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình gia công, cũng như các xu hướng nghiên cứu hiện đại liên quan đến vật liệu dụng cụ, công nghệ bôi trơn - làm nguội và các phương pháp mô hình hóa, tối ưu hóa. Qua phân tích, có thể khẳng định rằng phay cứng là một giải pháp gia công tiên tiến có khả năng thay thế các phương pháp truyền thống như mài trong nhiều trường hợp, nhờ ưu thế về năng suất, tính linh hoạt và khả năng tích hợp trong sản xuất hiện đại.

Các nghiên cứu trên thế giới đã đạt được nhiều kết quả quan trọng trong việc làm rõ cơ chế cắt, mô hình hóa quá trình và tối ưu hóa thông số công nghệ. Đặc biệt, sự phát triển của các công nghệ bôi trơn tối thiểu (MQL) và nano-MQL đã góp phần nâng cao hiệu quả gia công, giảm ma sát, giảm nhiệt độ vùng cắt và cải thiện chất lượng bề mặt. Đồng thời, các phương pháp tối ưu hóa hiện đại, đặc biệt là tối

ưu hóa đa mục tiêu kết hợp với các thuật toán tiến hóa và học máy, đã mở ra hướng tiếp cận hiệu quả trong việc giải quyết các bài toán phức tạp của quá trình gia công.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về phay cứng cũng đã có những bước tiến đáng kể, tập trung vào khảo sát thực nghiệm, nghiên cứu ảnh hưởng của thông số công nghệ và ứng dụng các phương pháp bôi trơn tiên tiến như MQL và nano-MQL. Tuy nhiên, các nghiên cứu này vẫn còn hạn chế về phạm vi vật liệu, dạng bề mặt gia công và mức độ tích hợp giữa mô hình hóa và tối ưu hóa.

Từ tổng quan nghiên cứu, có thể nhận thấy một số khoảng trống quan trọng, bao gồm: (i) thiếu các nghiên cứu về phay cứng thép dụng cụ hợp kim 90CrSi, đặc biệt đối với bề mặt trụ ngoài định hình; (ii) chưa có nghiên cứu hệ thống về ảnh hưởng của nano-MQL sử dụng hạt nano CuO trong phay cứng; (iii) thiếu các mô hình tích hợp có khả năng dự đoán và tối ưu hóa đồng thời nhiều chỉ tiêu đầu ra như độ nhám bề mặt, lực cắt và năng suất bóc tách vật liệu; và (iv) hạn chế trong việc áp dụng các phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu tiên tiến kết hợp với các mô hình học máy.

Xuất phát từ các khoảng trống này, luận án hướng tới việc nghiên cứu thực nghiệm và xây dựng mô hình dự báo - tối ưu hóa cho quá trình phay cứng thép 90CrSi trên bề mặt trụ ngoài định hình dưới điều kiện nano-MQL sử dụng hạt nano CuO. Nội dung nghiên cứu không chỉ góp phần làm rõ cơ chế và ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ mà còn hướng tới việc đề xuất các giải pháp tối ưu có ý nghĩa thực tiễn cao trong sản xuất cơ khí hiện đại.

CHƯƠNG 2:
CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ PHAY CỨNG, MÔ HÌNH HÓA VÀ TỐI ƯU HÓA

Trên cơ sở tổng quan các nghiên cứu đã được trình bày trong Chương 1, chương này tập trung xây dựng nền tảng lý thuyết và phương pháp nghiên cứu phục vụ cho việc phân tích, mô hình hóa và tối ưu hóa quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi dưới điều kiện bôi trơn - làm mát nano-MQL sử dụng hạt CuO. Việc lựa chọn và xây dựng hệ phương pháp phù hợp có ý nghĩa quyết định đến độ tin cậy của kết quả nghiên cứu cũng như khả năng ứng dụng thực tiễn của luận án.

Trước hết, chương này làm rõ các đặc điểm cơ bản của quá trình phay cứng, bao gồm cơ chế tạo phoi, các hiện tượng nhiệt - cơ trong vùng cắt và các chỉ tiêu đánh giá đặc trưng. Tiếp theo, các phương pháp bôi trơn - làm mát trong gia công được hệ thống hóa theo hướng từ truyền thống đến hiện đại, qua đó làm nổi bật vai trò của công nghệ nano-MQL trong việc cải thiện điều kiện cắt. Đồng thời, các thiết bị phục vụ bôi trơn - làm mát cũng được đề cập nhằm làm rõ cơ sở triển khai thực nghiệm trong nghiên cứu.

Bên cạnh đó, chương này trình bày phương pháp thiết kế thí nghiệm và định hướng lựa chọn thiết kế phù hợp với đặc điểm của bài toán nghiên cứu, đặc biệt là trong trường hợp tồn tại đồng thời các biến liên tục và các yếu tố phân loại. Các phương pháp mô hình hóa, bao gồm mô hình hồi quy bề mặt đáp ứng và phương pháp học máy Gaussian Process Regression, được giới thiệu nhằm xây dựng các mô hình dự đoán có độ chính xác cao. Cuối cùng, các phương pháp tối ưu hóa, đặc biệt là tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng thuật toán NSGA-II, được trình bày nhằm xác định tập nghiệm tối ưu thỏa hiệp giữa các chỉ tiêu công nghệ.

2.1. Cơ sở lý thuyết về phay cứng

2.1.1. Cơ chế hình thành phoi khi phay cứng

Trong phay cứng, quá trình hình thành phoi chịu ảnh hưởng đồng thời của độ cứng cao của vật liệu gia công, tốc độ biến dạng lớn trong vùng cắt và đặc tính cắt gián đoạn của từng răng dao. Đối với các thép tôi cứng như 90CrSi, SKD11… hoặc thép chịu mài mòn HARDOX 500, ứng suất chảy lớn làm giảm khả năng chảy dẻo đồng đều của vật liệu. Do đó, vật liệu thường không tạo phoi liên tục ổn định mà có xu hướng xuất hiện biến dạng cục bộ, phân đoạn và hình thành phoi răng cưa. Ở tốc độ cắt cao, nhiệt sinh ra trong vùng cắt không kịp khuếch tán ra môi trường xung quanh, dẫn đến hiện tượng mềm nhiệt cục bộ và làm thay đổi đáng kể cơ chế biến dạng vật liệu. Vì vậy, hình thái phoi được xem là chỉ thị quan trọng phản ánh trạng

thái biến dạng, ma sát, nhiệt cắt và độ ổn định của quá trình gia công [85], [86], [87], [88].

Trong gia công kim loại, phoi thường tồn tại dưới ba dạng cơ bản gồm phoi liên tục, phoi gián đoạn và phoi răng cưa. Phoi liên tục được hình thành khi biến dạng dẻo trong vùng cắt phân bố tương đối đồng đều và mặt trượt phát triển ổn định. Dạng phoi này chủ yếu xuất hiện khi gia công vật liệu dẻo hoặc khi chiều dày lớp cắt nhỏ [86, 89]. Ngược lại, phoi gián đoạn được tạo thành khi vật liệu không duy trì được quá trình biến dạng liên tục mà tách thành các đoạn riêng biệt do sự phát triển của các vết nứt cắt xen kẽ với biến dạng dẻo. Dạng phoi này thường đi kèm với tải trọng cắt lớn và dao động lực cắt cao [85]. Trong phay cứng tốc độ cao, dạng phoi phổ biến nhất là phoi răng cưa hoặc phoi phân đoạn. Đây là kết quả của quá trình trượt cục bộ tuần hoàn trong các dải cắt hẹp, nơi tác động cạnh tranh giữa hóa bền biến dạng và mềm hóa nhiệt làm xuất hiện các vùng biến dạng tập trung [85], [91], [92].

Do chiều dày phoi tức thời thay đổi liên tục theo góc quay dao, cơ chế tạo phoi trong phay cứng cũng biến đổi trong suốt chu kỳ cắt. Vì vậy, trên cùng một dải phoi có thể đồng thời quan sát thấy các đặc trưng của phoi liên tục, phoi bán phân đoạn và phoi răng cưa [87], [93], [94].

Trong vùng cắt chính, lớp vật liệu trước lưỡi cắt trước hết chịu nén mạnh, sau đó trượt dẻo trên một mặt trượt nghiêng để tách khỏi vật liệu nền và hình thành phoi. Mức độ biến dạng của vật liệu có thể được đánh giá thông qua tỷ số nén phoi:

$$r = \frac{t_1}{t_2} \qquad (2.1)$$

trong đó t_1 là chiều dày lớp cắt chưa biến dạng và t_2 là chiều dày phoi sau cắt. Giá trị r phản ánh mức độ nén dẻo của vật liệu. Giá trị r càng nhỏ cho thấy mức độ nén vật liệu càng lớn và xu hướng phân đoạn phoi càng rõ [86], [89].

Góc trượt có thể được biểu diễn gần đúng theo quan hệ hình học:

$$tan\varphi = \frac{r\,cos\alpha}{1 - r\,sin\alpha} \qquad (2.2)$$

trong đó φ là góc trượt và α là góc trước hiệu dụng. Khi góc trượt giảm, chiều dài mặt trượt tăng lên, làm tăng năng lượng tiêu hao trong vùng cắt [86], [89].

Biến dạng cắt trung bình trong vùng cắt chính được biểu diễn bởi:

$$\gamma = \tan(\varphi - \alpha) + \cot\varphi \qquad (2.3)$$

Theo phương trình (2.3), biến dạng cắt tăng đáng kể khi góc trượt giảm hoặc khi vật liệu bị nén mạnh trước lưỡi cắt. Trong điều kiện phay cứng tốc độ cao, tốc độ biến dạng lớn kết hợp với khả năng thoát nhiệt hạn chế làm cho quá trình biến dạng chuyển dần từ chảy dẻo tương đối đồng đều sang trượt cục bộ trong các dải cắt hẹp [85], [91], [92].

Ứng suất trượt trung bình trên mặt trượt được xác định bởi:

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (2.4)$$

trong đó F_s là lực theo phương trượt và A_s là diện tích mặt trượt. Đối với vật liệu có độ cứng cao, ứng suất trượt tăng đáng kể do ứng suất chảy lớn và mặt trượt có xu hướng kéo dài, dẫn đến mức tiêu hao năng lượng riêng cao hơn so với gia công thép mềm [86], [88].

Sau khi được hình thành trong vùng cắt chính, phoi tiếp tục chịu biến dạng trong vùng tiếp xúc giữa phoi và mặt trước dao, hay còn gọi là vùng biến dạng thứ cấp. Tại đây, phoi chịu tác động đồng thời của ma sát trượt, ma sát dính và nhiệt độ cao, làm thay đổi chiều dày phoi, độ cong phoi cũng như tốc độ mòn của dụng cụ cắt [85], [93], [94]. Hệ số ma sát tại giao diện dao-phoi được biểu diễn bởi:

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan\beta \quad (2.5)$$

trong đó F là lực ma sát, N là lực pháp tuyến và β là góc ma sát. Khi hệ số ma sát tăng, nhiệt cắt thứ cấp tăng theo, làm gia tăng xu hướng dính bám vật liệu và thúc đẩy các cơ chế mòn trên mặt trước dao [93].

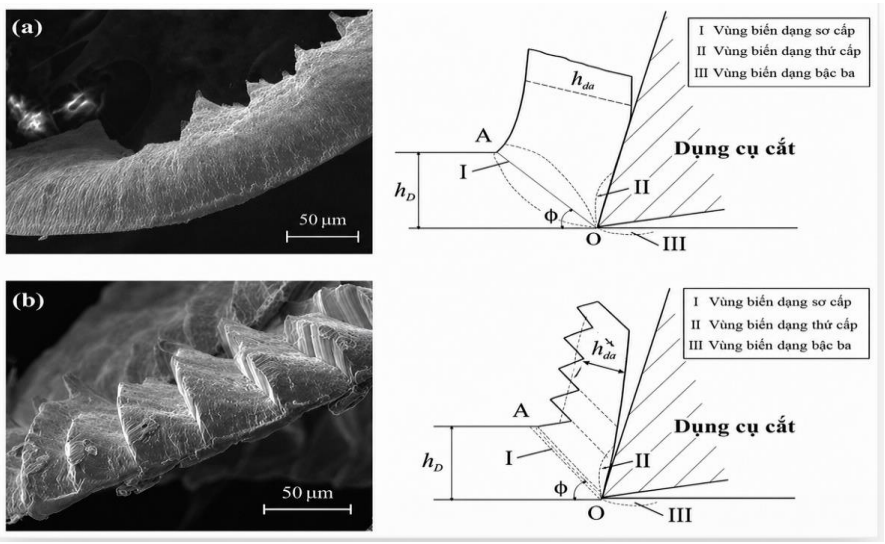
Mức độ phân đoạn của phoi răng cưa thường được đánh giá thông qua hệ số:

$$S = \frac{h_{max} - h_{min}}{h_{max}} \quad (2.6)$$

Trong đó h_{max} là chiều dày cực đại tại đỉnh răng phoi, và h_{min} là chiều dày cực tiểu tại đáy lõm của răng phoi. Sự chênh lệch giữa hai thông số này thể hiện mức độ trượt vật liệu, với S càng gần 1 khi phoi răng cưa càng rõ rệt do dải trượt đoạn nhiệt [92].

Về bản chất, phoi răng cưa hình thành do mất ổn định nhiệt–cơ trong vùng cắt. Ban đầu, vật liệu hóa bền dưới tác dụng của biến dạng dẻo; tuy nhiên, nhiệt sinh ra từ công biến dạng lại tập trung trong các dải cắt hẹp. Khi tốc độ mềm hóa nhiệt vượt quá tốc độ hóa bền, ứng suất chảy cục bộ giảm đột ngột, làm biến dạng tập trung vào một dải trượt hẹp và tạo thành một đoạn phoi mới. Chu kỳ tích lũy biến dạng – mất ổn định – trượt cục bộ lặp lại liên tục tạo nên hình thái phoi răng cưa đặc trưng của quá trình phay cứng [85], [91], [92], [95].

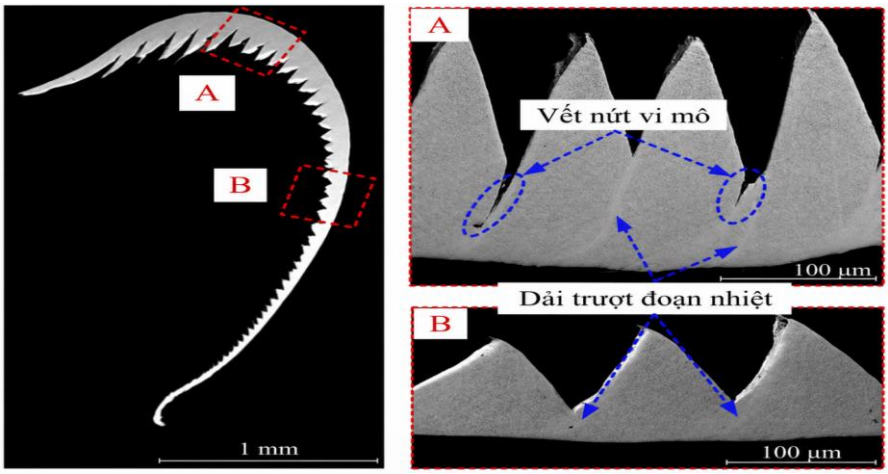
Kết quả nghiên cứu của C. Wang và cộng sự [1] đã xác nhận cơ chế trên khi khảo sát phay tốc độ cao thép đã tôi cứng. Các tác giả cho thấy phoi có thể tồn tại dưới dạng liên tục hoặc răng cưa tùy theo điều kiện cắt (Hình 2.1). Khi tốc độ cắt tăng, biến dạng và nhiệt độ cục bộ trong vùng cắt gia tăng, dẫn đến sự xuất hiện của các dải biến dạng tập trung và hình thành phoi răng cưa. Đồng thời, cấu trúc vi mô của phoi cho thấy sự cạnh tranh giữa hóa bền biến dạng và mềm hóa nhiệt, phù hợp với cơ chế mất ổn định nhiệt–cơ được chấp nhận rộng rãi trong phay cứng hiện nay [1].



Hình 2.1 : *Hình thái phoi thu được trong phay cao tốc thép đã tôi cứng: (a) phoi liên tục với biến dạng đồng đều; (b) phoi răng cưa với dải cắt biến dạng cục bộ, cho thấy sự chuyển đổi hình thái khi tăng tốc độ cắt [1]*

Thêm vào đó, Hình 2.1 minh họa rõ sự khác biệt giữa phoi liên tục và phoi răng cưa trong phay cứng, cho thấy sự chuyển đổi hình thái phoi khi tốc độ cắt tăng. Ở tốc độ cắt thấp, phoi chủ yếu hình thành theo cơ chế trượt tương đối đồng đều và duy trì hình thái liên tục. Khi tốc độ cắt tăng, biến dạng và nhiệt độ cục bộ trong vùng cắt gia tăng, dẫn đến sự xuất hiện của các dải biến dạng tập trung và hình thành phoi răng cưa. Kết quả nghiên cứu cho thấy tốc độ cắt và độ cứng vật liệu là hai yếu tố có ảnh hưởng quyết định đến hình thái phoi. Đồng thời, các thông số hình học của phoi như diện tích tiết diện, chiều cao răng phoi và góc răng phoi có thể được sử dụng như các chỉ số định lượng để đánh giá mức độ biến dạng cục bộ cũng như độ ổn định của quá trình phay [1].

Cơ chế hình thành phoi có ảnh hưởng trực tiếp đến sự phát sinh nhiệt và điều kiện ma sát trong vùng cắt. Đối với phoi liên tục, biến dạng dẻo diễn ra tương đối đồng đều trên toàn bộ vùng cắt nên năng lượng biến dạng được phân bố rộng hơn. Do đó, nhiệt sinh ra tương đối ổn định, ít tập trung cục bộ và ma sát tại giao diện dao-phoi ít biến động. Điều này giúp quá trình gia công diễn ra ổn định hơn, hạn chế rung động và làm giảm tốc độ mòn dụng cụ. Ngược lại, đối với phoi răng cưa, biến dạng tập trung mạnh trong các dải cắt cục bộ (adiabatic shear bands), nơi tốc độ biến dạng rất lớn và hiện tượng mềm hóa nhiệt diễn ra mạnh mẽ. Hệ quả là nhiệt độ cục bộ tăng nhanh, đồng thời sự tách rời tuần hoàn của các đoạn phoi làm lực cắt và ma sát biến thiên theo chu kỳ. Những dao động này có thể gây rung động tần số cao, thúc đẩy quá trình mòn dao, giảm độ ổn định gia công và làm suy giảm chất lượng bề mặt chi tiết [1].



Hình 2.2: *Cấu trúc chi tiết của phoi răng cưa trong phay cứng: vi nứt xuất hiện ở vùng A và các vết cắt phân đoạn do nhiệt tập trung ở vùng B, minh họa sự khác biệt về biến dạng cục bộ trong quá trình hình thành phoi [92]*

B. Li cùng cộng sự [92] đã nghiên cứu cơ chế hình thành phoi răng cưa khi phay cứng thép AISI H13 bằng phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn kết hợp với thực nghiệm. Kết quả cho thấy sự hình thành phoi răng cưa liên quan chặt chẽ đến sự xuất hiện của các vi nứt và các dải cắt phân đoạn do nhiệt trong vùng biến dạng cục bộ. Các vi nứt thường xuất hiện tại phần đầu phoi và đóng vai trò khởi phát quá trình phân đoạn, trong khi các dải cắt adiabatic thúc đẩy sự phát triển của biến dạng tập trung. Hình 2.2 minh họa sự xuất hiện của các vi nứt tại vùng A và dải cắt phân đoạn do nhiệt tại vùng B của phoi răng cưa, cho thấy sự khác biệt rõ rệt về trạng thái ứng suất và nhiệt độ giữa các vùng trong phoi. Mô hình FEM đã dự đoán chính xác hình dạng phoi, lực cắt và sự phân bố biến dạng, phù hợp tốt với kết quả thực nghiệm. Nghiên cứu khẳng định rằng mất ổn định cắt adiabatic là cơ chế chi phối sự hình thành phoi răng cưa trong phay cứng. Đồng thời, sự xuất hiện của loại phoi này làm gia tăng dao động lực cắt, biến dạng dư trên bề mặt gia công và ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bề mặt cũng như tuổi thọ của chi tiết sau gia công [92].

2.1.2. Cơ chế sinh nhiệt và ứng xử nhiệt-cơ của vật liệu

2.1.2.1. Ứng xử nhiệt-cơ của vật liệu

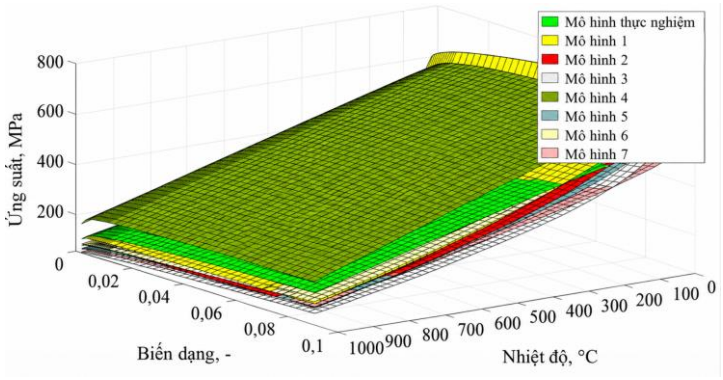
Trong quá trình phay cứng, vật liệu gia công đồng thời chịu biến dạng dẻo lớn, tốc độ biến dạng rất cao và nhiệt độ tăng nhanh trong vùng cắt. Sự tương tác giữa các yếu tố cơ học và nhiệt học này làm cho ứng xử của vật liệu trở nên phi tuyến mạnh và khác biệt đáng kể so với điều kiện tải tĩnh thông thường. Do đó, việc mô tả chính xác ứng xử nhiệt–cơ của vật liệu có vai trò quyết định đối với độ tin cậy của các mô hình dự đoán lực cắt, nhiệt độ, ứng suất dư, mòn dụng cụ và chất lượng bề mặt sau gia công.

Để mô tả ứng xử nhiệt-cơ của vật liệu trong vùng cắt, nhiều nghiên cứu sử dụng mô hình Johnson-Cook, được xem là một trong những mô hình vật liệu phổ biến nhất trong mô phỏng phần tử hữu hạn các quá trình gia công kim loại [97]. Mô hình này biểu diễn ứng suất chảy của vật liệu như một hàm của biến dạng dẻo, tốc độ biến dạng và nhiệt độ:

$$\sigma = \left(A+B\varepsilon_p^n\right)\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1-\left(\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right)^m\right] \quad (2.7)$$

Trong đó, A giới hạn chảy ban đầu, B và n đặc trưng cho khả năng hóa bền biến dạng, C phản ánh ảnh hưởng của tốc độ biến dạng và $m$mô tả mức độ mềm hóa nhiệt của vật liệu. Nhờ kết hợp đồng thời ba cơ chế quan trọng gồm hóa bền biến dạng, hóa bền theo tốc độ biến dạng và mềm hóa nhiệt, mô hình Johnson-Cook cho phép mô tả tương đối chính xác ứng xử của vật liệu dưới các điều kiện khắc nghiệt đặc trưng cho quá trình phay cứng [28].

Nghiên cứu trong [98] cho thấy các bộ tham số Johnson-Cook khác nhau có thể tạo ra các đặc tính ứng suất-biến dạng-nhiệt độ rất khác nhau mặc dù đều sử dụng cùng dạng phương trình vật liệu. Như thể hiện trong Hình 2.3, các bộ tham số khác nhau tạo ra các bề mặt ứng xử nhiệt-cơ có độ cong và vị trí khác biệt đáng kể, phản ánh sự thay đổi của ứng suất chảy theo biến dạng và nhiệt độ. Kết quả này cho thấy việc lựa chọn các tham số vật liệu có ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của các mô phỏng số và khả năng dự đoán thực tế của vật liệu trong vùng cắt [98].

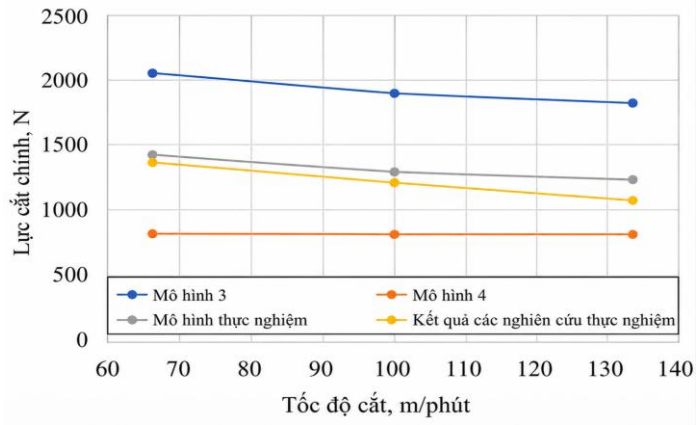


Hình 2.3. *Bề mặt ứng suất - biến dạng - nhiệt độ của các bộ tham số vật liệu được so sánh [98].*

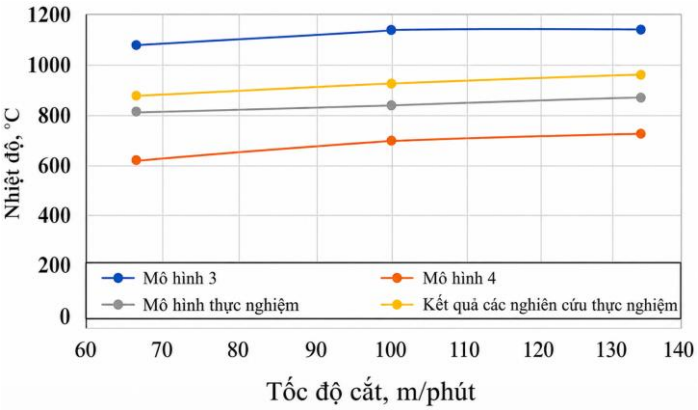
Để đánh giá ảnh hưởng của bộ tham số Johnson-Cook đến kết quả mô phỏng, [98] đã so sánh lực cắt và nhiệt độ thu được từ mô hình với dữ liệu thực nghiệm. Kết quả trong Hình 2.4 và Hình 2.5 cho thấy bộ tham số được xác định từ thực nghiệm cho độ phù hợp cao nhất, với sai lệch lực cắt khoảng 3-15% và sai lệch nhiệt độ khoảng 6-8%. Ngược lại, việc sử dụng các bộ tham số không phù hợp có thể dẫn đến sai số đáng kể trong dự đoán lực cắt và nhiệt độ vùng cắt, mặc dù cấu trúc toán học của mô hình vẫn không thay đổi. Điều này khẳng định rằng độ chính

xác của mô hình Johnson-Cook phụ thuộc mạnh vào quá trình xác định tham số vật liệu [98].

Tương tự, nghiên cứu trong [99] cũng cho thấy mô hình Johnson-Cook có khả năng mô tả chính xác đặc tính nhiệt-cơ của hợp kim Ti6Al4V trong quá trình tiện trực giao. So sánh giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm (Hình 2.6) cho thấy sai lệch lực cắt chính nhỏ hơn 8%, trong khi sai lệch nhiệt độ vùng cắt chỉ khoảng 3-4%. Đồng thời, chiều dày và hình dạng phoi dự đoán từ mô hình FEM cũng phù hợp tốt với quan sát thực nghiệm. Những kết quả này chứng minh rằng mô hình Johnson-Cook có khả năng tái hiện tương đối chính xác các hiện tượng biến dạng dẻo, hóa bền và mềm hóa nhiệt diễn ra trong vùng cắt [99].

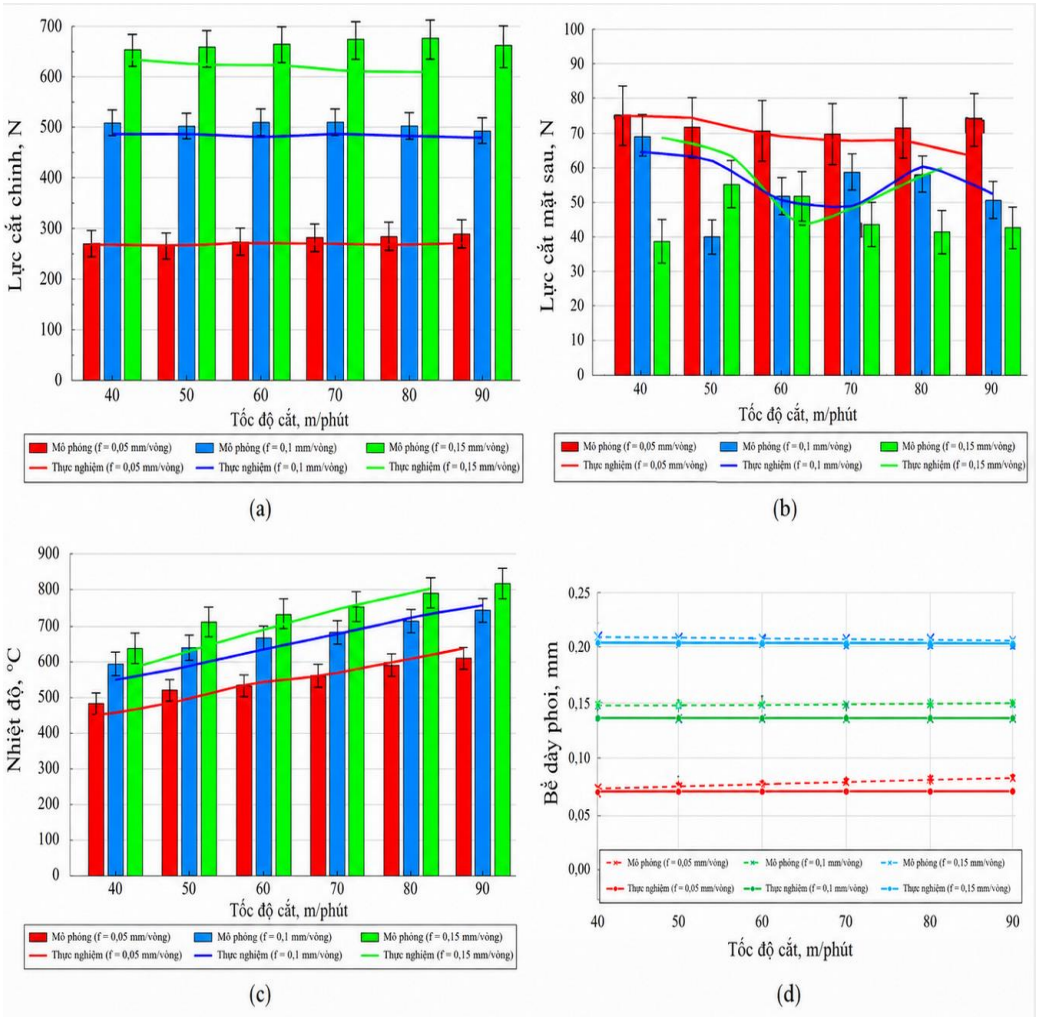


Hình 2.4. *Đồ thị về ảnh hưởng của lực cắt và tốc độ cắt [98].*

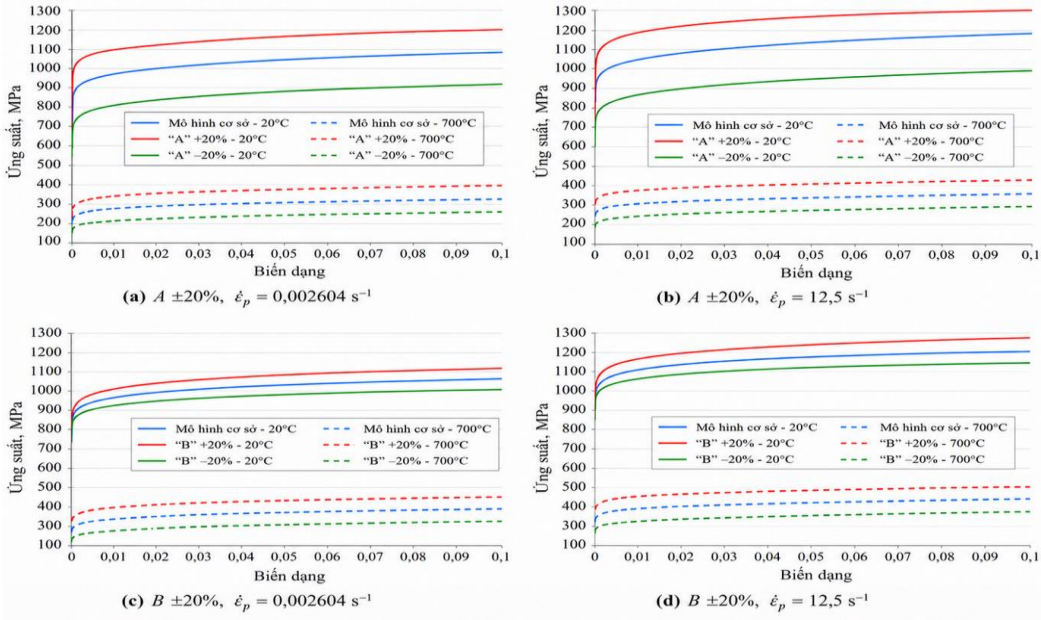


Hình 2.5. *Đồ thị về ảnh hưởng của nhiệt độ tiếp xúc theo tốc độ cắt [98].*

Bên cạnh việc mô tả ứng xử tổng thể của vật liệu, các tham số Johnson-Cook còn ảnh hưởng đáng kể đến hình dạng đường cong ứng suất-biến dạng. Kết quả phân tích độ nhạy trong [99] cho thấy tham số A có ảnh hưởng mạnh nhất đến giá trị ứng suất chảy, trong khi ảnh hưởng của tham số C tương đối nhỏ (Hình 2.7). Đặc biệt, tham số $m$chỉ thể hiện vai trò rõ rệt ở nhiệt độ cao, phản ánh trực tiếp cơ chế mềm hóa nhiệt của vật liệu. Điều này cho thấy việc hiệu chỉnh chính xác các tham số Johnson-Cook là điều kiện tiên quyết để xây dựng các mô hình dự đoán đáng tin cậy cho quá trình phay cứng [99].



***Hình 2.6**. Biểu đồ đối chiếu kết quả mô phỏng và thực nghiệm đối của các đại lượng đặc trưng trong quá trình tiện hợp kim Ti6Al4V theo tốc độ cắt: (a) lực cắt chính; (b) lực hướng kính; (c) nhiệt độ vùng cắt; và (d) chiều dày phoi [99].*

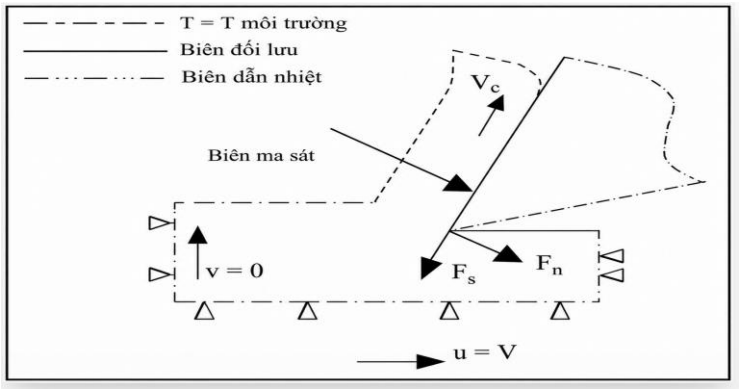


***Hình 2.7.** Ảnh hưởng của sự thay đổi các tham số trong mô hình Johnson-Cook đến đường cong ứng suất–biến dạng tại các tốc độ biến dạng khác nhau [99]*

2.1.2.2. Mô phỏng nhiệt-cơ bằng phương pháp phần tử hữu hạn

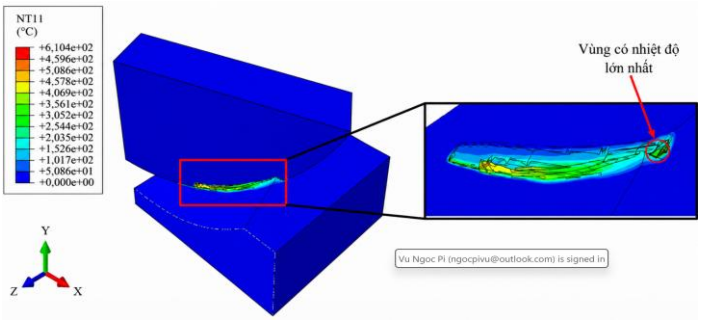
Các mô hình phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM) hiện được sử dụng rộng rãi để phân tích đồng thời các hiện tượng nhiệt học, cơ học và biến đổi vi cấu trúc trong gia công cắt gọt. Ưu điểm quan trọng của phương pháp này là khả năng mô tả sự tương tác giữa biến dạng dẻo, truyền nhiệt, ma sát tiếp xúc và ứng suất dư trong vùng cắt, những hiện tượng rất khó quan sát trực tiếp bằng thực nghiệm. Đối với phay cứng, các mô hình FEM cho phép dự đoán trường nhiệt độ, lực cắt, sự hình thành phoi, ứng suất dư và các biến đổi của lớp bề mặt sau gia công.

Nghiên cứu của B. Li và cộng sự [35] đã xây dựng mô hình phần tử hữu hạn nhiệt-cơ để phân tích sự hình thành lớp trắng trong phay cứng thép AISI H13. Kết quả cho thấy sự kết hợp giữa tải trọng nhiệt và biến dạng dẻo đóng vai trò quyết định đối với quá trình chuyển biến pha và hình thành lớp trắng trên bề mặt gia công. Như thể hiện trong Hình 2.8, mô hình đã xét đồng thời các điều kiện biên ma sát, dẫn nhiệt và đối lưu nhiệt, cho phép mô tả chính xác sự phân bố nhiệt độ, trường ứng suất và quá trình tiến triển vi cấu trúc trong vùng cắt. Các tác giả kết luận rằng việc chỉ xét riêng trường nhiệt hoặc trường ứng suất là chưa đủ để dự đoán chính xác các biến đổi vi cấu trúc trong phay cứng; thay vào đó cần sử dụng mô hình nhiệt-cơ liên hợp để phản ánh đúng bản chất của quá trình gia công [35].



Hình 2.8: *Các điều kiện biên nhiệt – cơ trong mô phỏng phần tử hữu hạn phay cứng [35]*

Tương tự, nghiên cứu của Q. Zhang và cộng sự [63] đã phát triển mô hình phần tử hữu hạn ba chiều (3D FEM) nhằm dự đoán lực cắt, nhiệt độ và sự hình thành phoi trong phay cứng thép AISI H13. Kết quả cho thấy mô hình có khả năng dự đoán lực cắt với sai số nhỏ hơn 15% so với thực nghiệm. Đặc biệt, Hình 2.9 cho thấy nhiệt độ cực đại tập trung tại vùng tiếp xúc dao-phoi có chiều dày phoi lớn nhất, phản ánh rõ mối liên hệ giữa biến dạng dẻo, ma sát tiếp xúc và sự phát sinh nhiệt trong vùng cắt. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng mặc dù nhiệt độ cắt tăng theo tốc độ cắt, giá trị nhiệt độ cực đại vẫn thấp hơn nhiệt độ Austenit hóa của thép H13, do đó khả năng hình thành lớp trắng trong điều kiện khảo sát là tương đối hạn chế [63].

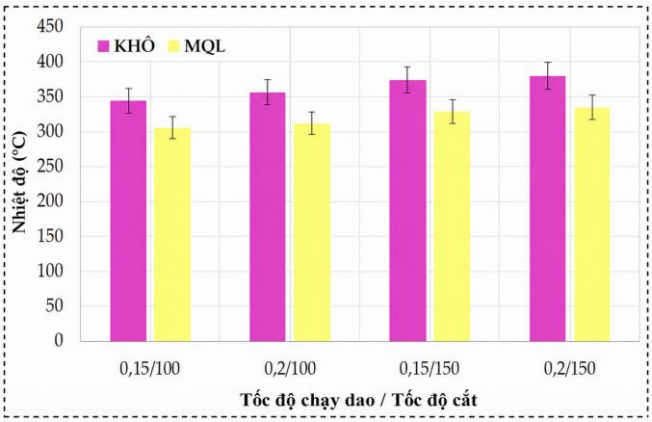


Hình 2.9: *Phân bố nhiệt độ trong mô hình phay cứng thép AISI H13 (ap = 0,8 mm, ae = 0,6 mm, vc = 280 m/phút, fz = 0,35 mm/răng), cho thấy vùng nhiệt độ cực đại tập trung ở phía phải của bề mặt tiếp xúc dao–phôi, nơi chiều dày phoi đạt giá trị lớn nhất [63]*

2.1.2.3. Ảnh hưởng của điều kiện bôi trơn đến trạng thái nhiệt-cơ

Điều kiện bôi trơn và làm mát có ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình sinh nhiệt, truyền nhiệt và trạng thái nhiệt-cơ trong vùng cắt. Trong gia công khô, nhiệt phát sinh tại giao diện dao-phoi và mặt sau của dụng cụ thường rất lớn do hệ số ma sát cao và không có môi chất hỗ trợ tản nhiệt. Ngược lại, các kỹ thuật bôi trơn tối thiểu (MQL) có khả năng đồng thời giảm ma sát và tăng hiệu quả tản nhiệt cục bộ, từ đó làm giảm nhiệt độ vùng cắt và cải thiện tuổi thọ dụng cụ.

Kết quả thực nghiệm của [36] đối với quá trình phay thép Strenx 900 cho thấy nhiệt độ cắt trong điều kiện MQL luôn thấp hơn đáng kể so với gia công khô ở mọi chế độ cắt khảo sát. Như thể hiện trong Hình 2.10, mức giảm nhiệt độ thường dao động từ khoảng 10-14%, tùy thuộc vào tốc độ cắt và lượng chạy dao. Sự cải thiện này được giải thích bởi khả năng hình thành màng bôi trơn mỏng tại vùng tiếp xúc dao-phoi, làm giảm ma sát và hạn chế sự tích tụ nhiệt trong vùng cắt. Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng MQL không chỉ góp phần làm giảm nhiệt độ cắt mà còn giúp giảm mòn dụng cụ và cải thiện chất lượng bề mặt gia công, qua đó nâng cao hiệu quả của quá trình phay cứng [36].



Hình 2.10: *Biểu đồ so sánh nhiệt độ cắt khi phay thép Strenx 900 trong hai điều kiện khô (Dry) và bôi trơn tối thiểu (MQL) ở các thông số cắt khác nhau [36]*

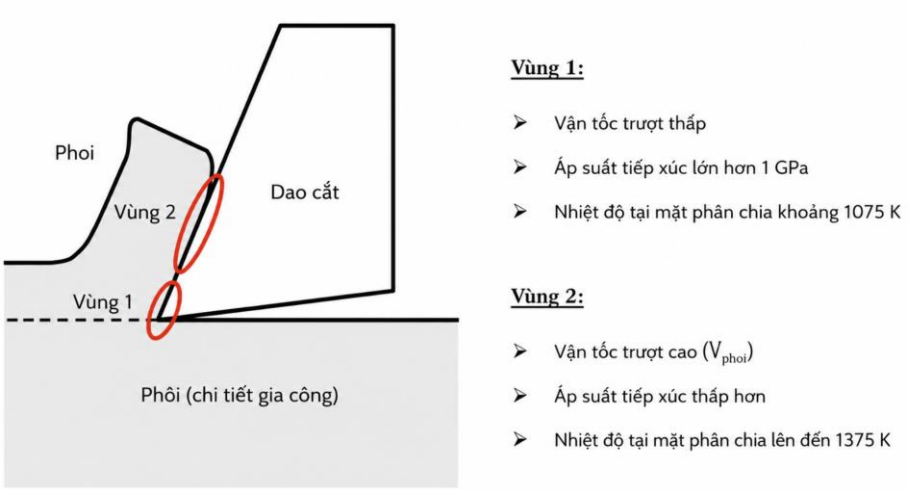
2.1.3. Cơ chế ma sát trong phay cứng

Ma sát là một trong những hiện tượng tribological quan trọng nhất trong quá trình phay cứng, phát sinh tại các vùng tiếp xúc giữa dao, phoi và bề mặt gia công. Không chỉ là nguồn sinh nhiệt chủ yếu của vùng cắt thứ cấp và vùng tiếp xúc mặt sau, ma sát còn ảnh hưởng trực tiếp đến lực cắt, mòn dụng cụ, độ nhám bề mặt và tuổi thọ dao. Đối với các vật liệu có độ cứng cao như thép 90CrSi hoặc HARDOX 500, áp suất tiếp xúc lớn kết hợp với nhiệt độ cao làm cho các cơ chế dính, trượt và mài mòn xảy ra đồng thời với cường độ lớn hơn nhiều so với gia công thông thường [100].

2.1.3.1. Các vùng tiếp xúc ma sát chủ yếu trong phay cứng

a. Ma sát trên mặt trước của dụng cụ cắt

Ma sát trên mặt trước phát sinh giữa phoi và mặt trước của dụng cụ trong quá trình hình thành và dịch chuyển phoi. Đây là vùng chịu áp suất tiếp xúc lớn nhất, nhiệt độ cao nhất và cũng là nơi tập trung phần lớn nhiệt ma sát của quá trình cắt. Theo Brocail và cộng sự [101], giao diện dao-phoi có thể được chia thành hai vùng tiếp xúc đặc trưng như thể hiện trong Hình 2.11. Vùng gần lưỡi cắt có áp suất tiếp xúc vượt quá 1 GPa nhưng vận tốc trượt tương đối nhỏ, do đó hiện tượng dính (sticking) thường chiếm ưu thế. Ngược lại, ở vùng xa lưỡi cắt hơn, áp suất tiếp xúc giảm nhưng vận tốc trượt tăng dần đến gần vận tốc của phoi, làm cho cơ chế ma sát chuyển dần sang trạng thái trượt (sliding). Sự phân bố không đồng nhất này làm cho trường nhiệt độ, ứng suất tiếp xúc và chiều dài tiếp xúc dao-phoi thay đổi mạnh theo vị trí trên mặt trước của dụng cụ [101].



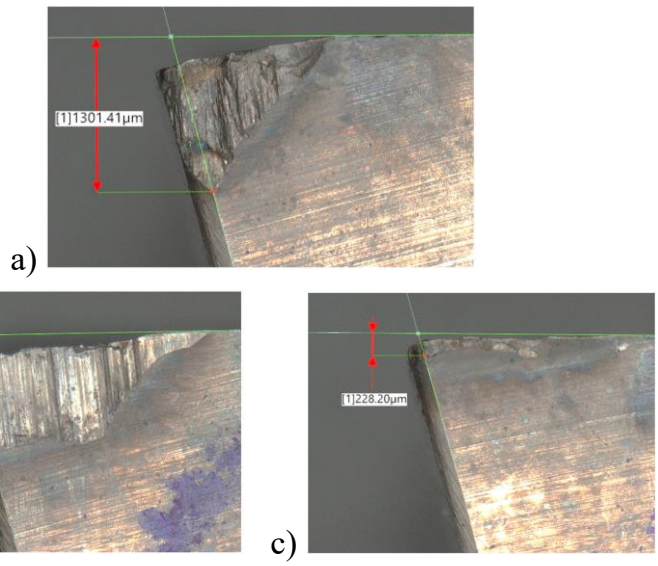
Hình 2.11. *Mô hình phân chia giao diện dao-phoi thành hai vùng tiếp xúc đặc trưng [101].*

Bằng chứng thực nghiệm về ảnh hưởng của ma sát dao-phoi được thể hiện trong nghiên cứu của Mac T.B. và cộng sự [102]. Kết quả quan sát trực tiếp sự mòn của dụng cụ cắt dưới các điều kiện nhiệt độ khác nhau được trình bày trong Hình

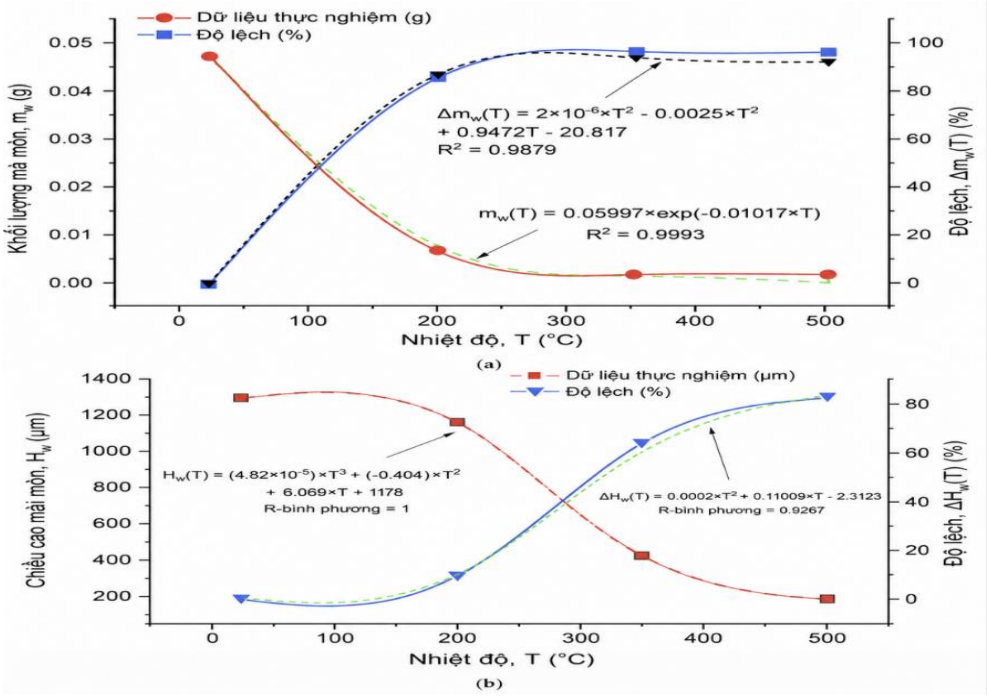
2.12. Khi phay thép SKD11 ở nhiệt độ phòng với tốc độ cắt 600 m/phút, lượng mòn của dao rất lớn và xuất hiện hiện tượng phá hủy nghiêm trọng ở vùng lưỡi cắt, với chiều cao mòn đo được lên tới khoảng 1301 µm (Hình 2.12.a). Điều này cho thấy điều kiện gia công tốc độ cao ở nhiệt độ thường tạo ra tải trọng cơ-nhiệt rất lớn tại vùng cắt, dẫn đến sự phát triển nhanh của các cơ chế mòn và làm giảm đáng kể tuổi thọ dụng cụ.

Khi áp dụng gia công hỗ trợ nhiệt (Thermally Assisted Machining), mức độ mòn của dao giảm đáng kể. Như thể hiện trong Hình 2.12.b, tại nhiệt độ 200 °C, dao cắt vẫn xuất hiện mòn tương đối lớn nhưng không còn xảy ra hiện tượng gãy vỡ như ở điều kiện nhiệt độ phòng. Khi nhiệt độ tiếp tục tăng lên 500 °C (Hình 2.12.c), vùng mòn trên lưỡi cắt giảm rõ rệt và hình dạng mép cắt được duy trì ổn định hơn. Sự suy giảm mức độ mòn này được giải thích bởi hiện tượng làm mềm vật liệu phôi dưới tác động của nhiệt, làm giảm lực cắt, giảm ma sát tại giao diện dao–phoi và hạn chế ứng suất tác dụng lên lưỡi cắt.

Để đánh giá ảnh hưởng của gia công hỗ trợ nhiệt đến mức độ mòn dụng cụ khi phay tốc độ cao thép SKD11, Mac T.B. và cộng sự [102] đã khảo sát sự thay đổi khối lượng mòn và chiều cao mòn của dao cắt tại các mức nhiệt độ từ nhiệt độ phòng đến 500 °C. Kết quả được trình bày trong Hình 2.13 cho thấy nhiệt độ gia công có ảnh hưởng rất rõ rệt đến khả năng chống mòn của dụng cụ cắt. Khi nhiệt độ phôi tăng, cả khối lượng mòn và chiều cao mòn của dao đều giảm đáng kể. Sự suy giảm mạnh nhất được ghi nhận trong khoảng nhiệt độ từ 200 °C đến 350 °C, cho thấy đây là vùng nhiệt độ mà hiệu ứng làm mềm vật liệu bắt đầu phát huy tác dụng rõ rệt, giúp giảm tải trọng cơ học và ma sát tại vùng cắt.



Hình 2.12. *Vùng mòn trên mặt trước của dụng cụ khi phay thép SKD11 ở các nhiệt độ gia công khác nhau [102]*



Hình 2.13. *Đồ thị ảnh hưởng của nhiệt độ gia công hỗ trợ nhiệt (TAM) đến khối lượng mòn (a) và chiều cao mòn (b) của dụng cụ khi phay tốc độ cao thép SKD11 [102]*

Như thể hiện trong Hình 2.13.a, khối lượng mòn của dao giảm nhanh khi nhiệt độ tăng từ nhiệt độ phòng lên 350 °C và gần như không thay đổi khi tiếp tục tăng đến 500 °C. Trong khi đó, Hình 2.13.b cho thấy chiều cao mòn của dao tiếp tục giảm trên toàn bộ dải nhiệt độ khảo sát. Ở nhiệt độ 500 °C, chiều cao mòn và khối lượng mòn của dao giảm tương ứng 82,47% và 95,74% so với điều kiện gia công ở nhiệt độ phòng. Kết quả này chứng minh rằng gia công hỗ trợ nhiệt có khả năng cải thiện đáng kể tuổi thọ dụng cụ thông qua việc giảm lực cắt, giảm ma sát và hạn chế các cơ chế mòn tại vùng tiếp xúc dao-phoi [102].

b. Ma sát trên mặt sau của dụng cụ cắt

Ma sát trên mặt sau phát sinh giữa mặt sau của dụng cụ và bề mặt vừa được gia công. Mặc dù nhiệt phát sinh tại vùng này thường nhỏ hơn vùng dao-phoi, nhưng đây lại là vùng có ảnh hưởng trực tiếp nhất đến độ nhám bề mặt và độ chính xác gia công. Khi mòn mặt sau phát triển, diện tích tiếp xúc giữa dụng cụ và bề mặt gia công tăng lên, kéo theo sự gia tăng của lực ma sát, hiện tượng cày xới và biến dạng dẻo cục bộ của lớp vật liệu bề mặt [103].

2.1.4. Cơ chế mòn dao trong phay cứng

Mòn dao là một trong những nguyên nhân chính làm suy giảm năng suất, độ chính xác và chất lượng bề mặt trong phay cứng. Do quá trình cắt diễn ra dưới điều kiện tải trọng cơ học lớn, nhiệt độ cao và trạng thái ma sát khắc nghiệt, dụng cụ cắt thường chịu tác động đồng thời của nhiều cơ chế mòn khác nhau. Đối với các thép tôi cứng như 90CrSi hoặc HARDOX 500, sự hiện diện của các pha cacbit cứng

cùng nhiệt độ cắt cao làm cho quá trình mòn dao diễn ra nhanh và phức tạp hơn so với gia công vật liệu thông thường [103].

Dạng mòn phổ biến nhất trong phay cứng là mòn mặt sau (flank wear). Cơ chế này phát sinh do ma sát liên tục giữa mặt sau của dụng cụ và bề mặt vừa được gia công. Các hạt cacbit cứng trong vật liệu phôi đóng vai trò như các vi hạt mài, liên tục cào xước và lấy đi vật liệu của dụng cụ. Vì có mối liên hệ chặt chẽ với độ nhám bề mặt và độ chính xác gia công, chiều rộng mòn mặt sau thường được sử dụng làm chỉ tiêu đánh giá tuổi thọ dụng cụ trong thực tế sản xuất [103].

Bên cạnh mòn mặt sau, mòn mặt trước (crater wear) cũng thường xuất hiện trên bề mặt tiếp xúc giữa phoi và mặt trước của dụng cụ. Trong điều kiện tốc độ cắt cao, nhiệt độ tại giao diện dao–phoi tăng mạnh, thúc đẩy các cơ chế khuếch tán, oxy hóa và ăn mòn nhiệt. Kết quả là trên mặt trước hình thành các hố mòn dạng hõm, làm suy giảm độ bền của lưỡi cắt và tạo điều kiện cho các dạng hư hỏng khác phát triển [104], [105].

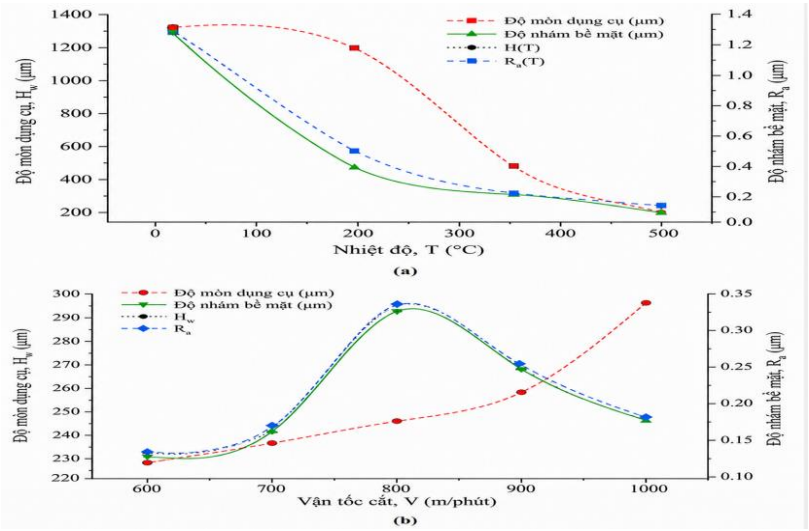
Ở nhiệt độ cao, bề mặt dụng cụ còn có thể bị oxy hóa và mòn khuếch tán. Các phản ứng hóa học giữa vật liệu dụng cụ và môi trường xung quanh hình thành các lớp oxit giòn, dễ bong tróc dưới tác dụng của tải trọng cơ học. Đồng thời, sự khuếch tán nguyên tử giữa phoi và dụng cụ ở vùng tiếp xúc nhiệt độ cao làm gia tăng tốc độ hao mòn vật liệu dụng cụ, đặc biệt đối với các dụng cụ carbide khi gia công thép tôi cứng [104], [105].

Do đặc trưng cắt gián đoạn của quá trình phay, lưỡi cắt còn chịu tải trọng va đập tuần hoàn, dẫn đến hiện tượng mẻ vỡ vi mô (micro-chipping) và nứt nhiệt. Các vết mẻ nhỏ thường xuất hiện tại mép cắt hoặc vùng giao tiếp giữa các khu vực chịu tải khác nhau. Theo thời gian, chúng phát triển thành các vùng mòn lớn hơn và làm suy giảm nhanh tuổi thọ dụng cụ. Ngoài ra, tại vị trí tương ứng với chiều sâu cắt thường xuất hiện mòn khía (notch wear) do sự tập trung ứng suất và khác biệt về điều kiện tiếp xúc giữa vùng đang cắt và vùng đã gia công [105], [106].

Một hiện tượng khác thường gặp là dính bám vật liệu trên mép cắt (Built-Up Edge – BUE). Lớp vật liệu bám này làm thay đổi hình học thực của lưỡi cắt, gây dao động lực cắt và khi bong ra có thể kéo theo một phần vật liệu dụng cụ, từ đó thúc đẩy quá trình mòn phát triển nhanh hơn [105].

Kết quả nghiên cứu của Mac T.B. và cộng sự [102] cho thấy trạng thái nhiệt–ma sát trong vùng cắt có ảnh hưởng quyết định đến tốc độ mòn dao khi phay tốc độ cao thép SKD11. Như thể hiện trong Hình 2.10, khi nhiệt độ gia công tăng từ 24 °C lên 500 °C nhờ gia công hỗ trợ nhiệt (HS–TAM), chiều cao mòn dao giảm tới 82,47% so với điều kiện gia công ở nhiệt độ phòng. Đồng thời, độ nhám bề mặt cũng giảm mạnh, chứng tỏ sự suy giảm ma sát và ứng suất tiếp xúc tại vùng cắt. Nghiên cứu này khẳng định rằng nguyên nhân gốc của mòn dao trong phay cứng là

sự kết hợp giữa tải trọng cơ học lớn, nhiệt độ cao và các cơ chế ma sát diễn ra tại giao diện dao-phoi và dao-phôi [102].



Hình 2.10. *Đồ thị ảnh hưởng của nhiệt độ và tốc độ cắt đến mòn dao và độ nhám bề mặt khi phay tốc độ cao thép SKD11 trong điều kiện gia công hỗ trợ nhiệt TAM[102].*

Đối với thép dụng cụ 90CrSi, độ cứng cao và khả năng chống biến dạng lớn làm tăng áp suất tiếp xúc cũng như cường độ ma sát trong vùng cắt. Vì vậy, các cơ chế mòn nêu trên thường phát triển nhanh hơn, khiến tuổi thọ dụng cụ giảm đáng kể nếu không áp dụng các giải pháp bôi trơn – làm mát và lựa chọn chế độ cắt phù hợp.

2.1.5. Các chỉ tiêu đánh giá quá trình phay cứng

Hiệu quả của quá trình phay cứng thường được đánh giá thông qua các chỉ tiêu chính bao gồm độ nhám bề mặt (Ra), lực cắt (F), Năng suất bóc tách vật liệu (MRR).

- **Độ nhám bề mặt (Ra):**

Đây là chỉ tiêu quan trọng phản ánh chất lượng bề mặt gia công. Độ nhám phụ thuộc mạnh vào chế độ cắt, hình học dao và điều kiện bôi trơn – làm nguội [96], [20]. Trong phay cứng, việc kiểm soát Ra là yếu tố then chốt để thay thế quá trình mài trong nhiều ứng dụng.

- **Lực cắt (F):**

Lực cắt ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định của quá trình, độ chính xác gia công và tuổi thọ dụng cụ. Các thành phần lực cắt trong phay thường biến thiên theo chu kỳ do đặc trưng tiếp xúc gián đoạn của quá trình [46].

- **Tốc độ bóc tách vật liệu (MRR):**

MRR là chỉ tiêu đánh giá năng suất gia công, thường được xác định dựa trên các thông số cắt như tốc độ trục chính, lượng chạy dao và chiều sâu cắt [77]. Trong phay cứng, việc tăng MRR cần được cân bằng với yêu cầu về chất lượng bề mặt và độ bền dụng cụ.

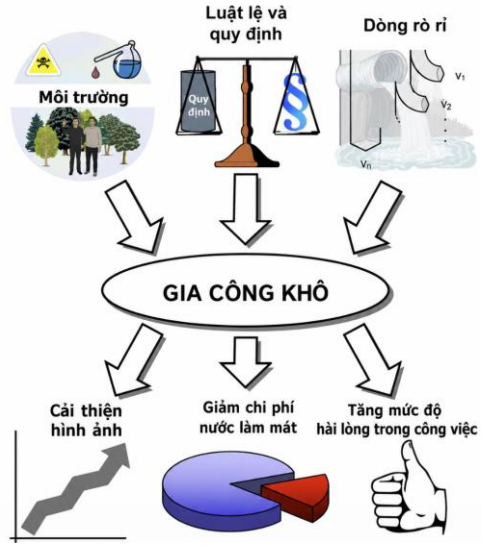
Nhìn chung, các chỉ tiêu Ra, lực cắt và MRR thường có mối quan hệ đánh đổi lẫn nhau, do đó việc tối ưu hóa quá trình phay cứng cần xem xét đồng thời nhiều tiêu chí để đạt được hiệu quả gia công tối ưu.

2.2. Các phương pháp bôi trơn-làm mát trong phay cứng

Trong phay cứng, trạng thái nhiệt-ma sát tại vùng cắt có ảnh hưởng trực tiếp đến lực cắt, nhiệt độ, mòn dụng cụ và chất lượng bề mặt gia công. Do đó, việc lựa chọn phương pháp bôi trơn-làm mát phù hợp đóng vai trò quyết định đối với hiệu quả của quá trình gia công. Theo xu hướng phát triển của công nghệ gia công hiện đại, các phương pháp bôi trơn-làm mát hiện nay có thể được chia thành bốn nhóm chính gồm gia công khô (dry machining), phương pháp bôi trơn ngập truyền thống (flood cooling), bôi trơn lượng tối thiểu (Minimum Quantity Lubrication - MQL) và các công nghệ làm mát tiên tiến như khí lạnh, làm mát lạnh sâu (cryogenic cooling) hoặc nano-MQL. Mỗi phương pháp có cơ chế tác động khác nhau đến trạng thái nhiệt-ma sát của vùng cắt và phù hợp với những điều kiện gia công riêng biệt.

2.2.1. Gia công khô (Dry Machining)

Gia công khô là phương pháp không sử dụng bất kỳ loại dung dịch bôi trơn hoặc làm mát nào trong quá trình cắt. Đây là một trong những hướng phát triển quan trọng của sản xuất bền vững nhờ khả năng loại bỏ hoàn toàn chi phí liên quan đến dung dịch trơn nguội, giảm tác động môi trường và cải thiện điều kiện lao động. Weinert và cộng sự cho rằng chi phí liên quan đến dung dịch trơn nguội có thể chiếm từ 7-17% tổng chi phí gia công; do đó việc loại bỏ hoàn toàn dung dịch có ý nghĩa kinh tế đáng kể. Bên cạnh đó, gia công khô còn giúp giảm ô nhiễm môi trường, giảm tiếp xúc của người lao động với sương dầu và nâng cao tính thân thiện môi trường của quá trình sản xuất (Hình 2.11) [108].



Hình 2.11. *Các lợi ích của công nghệ gia công khô đối với chi phí sản xuất, môi trường và điều kiện lao động [108]*

Bên cạnh đó, gia công khô không đơn thuần là việc ngừng cấp dung dịch trơn nguội mà đòi hỏi sự thay đổi đồng bộ về dụng cụ cắt, vật liệu phủ, chiến lược gia công và kết cấu máy công cụ nhằm bù đắp các chức năng vốn được thực hiện bởi dung dịch trơn nguội như bôi trơn, làm mát, vận chuyển phoi và ổn định nhiệt của hệ thống gia công [108]. Mặc dù gia công khô mang lại nhiều lợi ích về kinh tế, môi trường và điều kiện lao động, phương pháp này vẫn tồn tại nhiều hạn chế về mặt công nghệ. Do không sử dụng dung dịch trơn nguội, toàn bộ các chức năng như làm mát, bôi trơn, vận chuyển phoi và ổn định trường nhiệt của hệ thống gia công đều bị suy giảm hoặc mất đi. Kết quả là nhiệt độ vùng cắt tăng đáng kể, ma sát giữa dao và phoi trở nên nghiêm trọng hơn, từ đó làm gia tăng tốc độ mòn dụng cụ, đặc biệt đối với các vật liệu khó gia công hoặc các quá trình cắt ở tốc độ cao [108]. Do đó, phay khô hoàn toàn không phải là giải pháp tối ưu cho bài toán phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi trong luận án này.

2.2.2. Bôi trơn tưới tràn bằng dung dịch trơn nguội (Flood Cooling)

Gia công tưới tràn là phương pháp truyền thống trong đó dung dịch trơn nguội được cấp liên tục với lưu lượng lớn vào vùng cắt nhằm thực hiện đồng thời ba chức năng chính: làm mát, bôi trơn và vận chuyển phoi. Nhờ khả năng truyền nhiệt cao của nước và nhũ tương, phương pháp này giúp kiểm soát hiệu quả nhiệt độ vùng cắt, hạn chế quá nhiệt dụng cụ và cải thiện tuổi thọ dao [108].

Ưu điểm lớn nhất của gia công tưới tràn là khả năng làm mát mạnh và ổn định, đặc biệt trong các nguyên công có mật độ nhiệt cao hoặc yêu cầu bóc tách vật liệu lớn. Tuy nhiên, chi phí đầu tư, vận hành và xử lý dung dịch khá cao. Ngoài ra, trong phay cứng, sự thay đổi nhiệt độ tuần hoàn do dao liên tục ra khỏi vùng cắt rồi tiếp xúc với dung dịch làm mát có thể gây sốc nhiệt, dẫn đến nứt lớp phủ hoặc giảm tuổi thọ của các dụng cụ giòn như gốm và CBN [108].

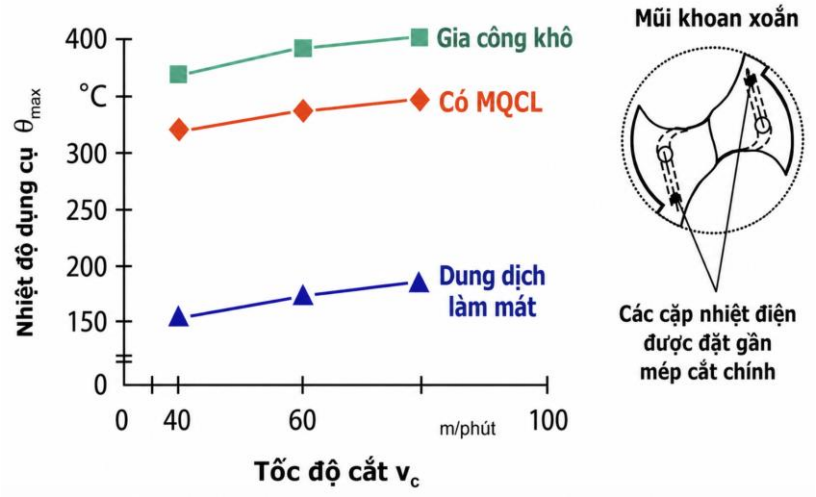
2.2.3. Bôi trơn tối thiểu (MQL)

MQL được xem là giải pháp trung gian giữa gia công khô và gia tưới tràn. Trong phương pháp này, dầu bôi trơn được cấp dưới dạng aerosol hoặc sương mù với lưu lượng rất nhỏ, thường chỉ từ 10-50 mL/h, thông qua dòng khí nén tới vùng cắt. Hệ thống MQL bao gồm môi chất bôi trơn, hệ thống cấp dầu-khí, dụng cụ cắt và các thông số vận hành được tối ưu hóa đồng thời (Hình 2.12) [108].



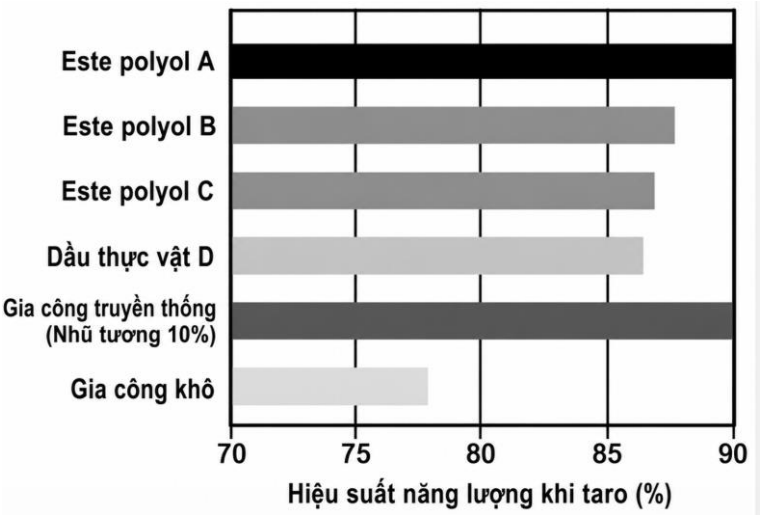
Hình 2.12. *Cấu trúc của hệ thống bôi trơn tối thiểu (MQL) [108]*

Khác với gia công ngập, tác dụng chủ yếu của MQL là giảm ma sát và hiện tượng dính bám tại giao diện dao-phoi thông qua việc hình thành một màng dầu mỏng. Nhờ đó, lượng nhiệt sinh ra do ma sát giảm đáng kể, dẫn đến giảm lực cắt, giảm nhiệt độ vùng cắt và kéo dài tuổi thọ dụng cụ. Kết quả thực nghiệm cho thấy nhiệt độ dụng cụ khi gia công bằng MQL luôn thấp hơn so với gia công khô, mặc dù vẫn cao hơn so với gia công ngập (Hình 2.13) [108].

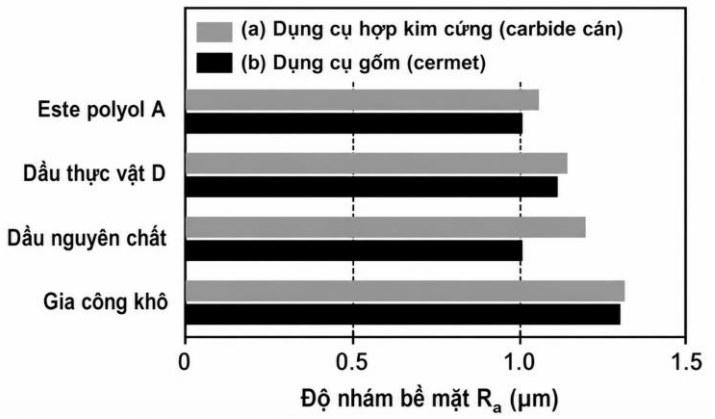


Hình 2.13. *So sánh nhiệt độ dụng cụ khi khoan dưới các điều kiện gia công khô, MQL và gia công tưới tràn [108]*

Ngoài khả năng giảm nhiệt độ, MQL còn cho hiệu quả bôi trơn rất cao. Kết quả thử nghiệm tarô trong Hình 2.14 cho thấy hiệu suất gia công khi sử dụng dầu ester tổng hợp trong MQL gần tương đương với gia công ngập truyền thống và vượt trội đáng kể so với gia công khô [109]. Tương tự, độ nhám bề mặt đạt được khi sử dụng MQL cũng thấp hơn đáng kể so với gia công khô (Hình 2.15), chứng tỏ hiệu quả giảm ma sát và dính bám tại vùng cắt [110].



Hình 2.14. *Biểu đồ so sánh hiệu suất tarô khi sử dụng các môi chất MQL khác nhau với gia công khô và gia công ngập [109]*



Hình 2.15. *Biểu đồ so sánh độ nhám bề mặt khi tiện dưới các điều kiện bôi trơn khác nhau [110]*

Đối với phay cứng thép 90CrSi bằng dao hợp kim cứng, MQL hiện được xem là một trong những giải pháp tối ưu vì vừa cải thiện đáng kể độ nhám bề mặt và tuổi thọ dao, vừa giảm lượng dung dịch sử dụng và tác động môi trường.

2.2.4. Các công nghệ bôi trơn-làm mát tiên tiến

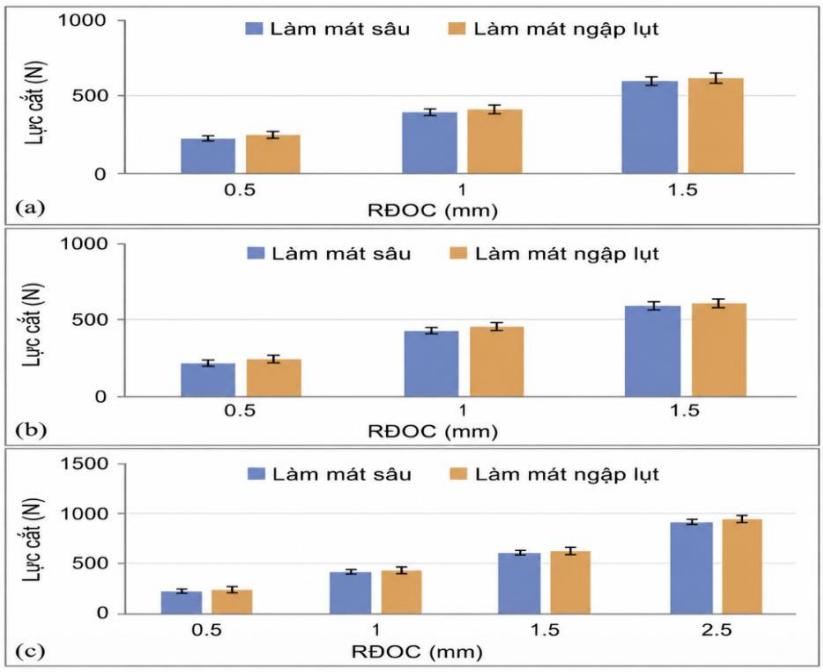
Bên cạnh các phương pháp truyền thống, nhiều công nghệ bôi trơn-làm mát tiên tiến đã được phát triển nhằm nâng cao hiệu quả gia công và đáp ứng yêu cầu sản xuất bền vững.

2.2.4.1. Gia công lạnh sâu (Cryogenic Machining)

Gia công lạnh sâu sử dụng các môi chất cực lạnh như nitơ lỏng (LN_2) hoặc CO_2 lỏng để làm mát trực tiếp vùng cắt. Phương pháp này cho khả năng giảm nhiệt độ rất mạnh, hạn chế mòn nhiệt và kéo dài tuổi thọ dụng cụ khi gia công các vật liệu khó cắt hoặc vật liệu chịu nhiệt cao. Nó đang được xem là một trong những công nghệ làm mát tiên tiến và thân thiện môi trường cho gia công các vật liệu khó cắt. Nghiên cứu sau có thể minh chứng cho điểm đó.

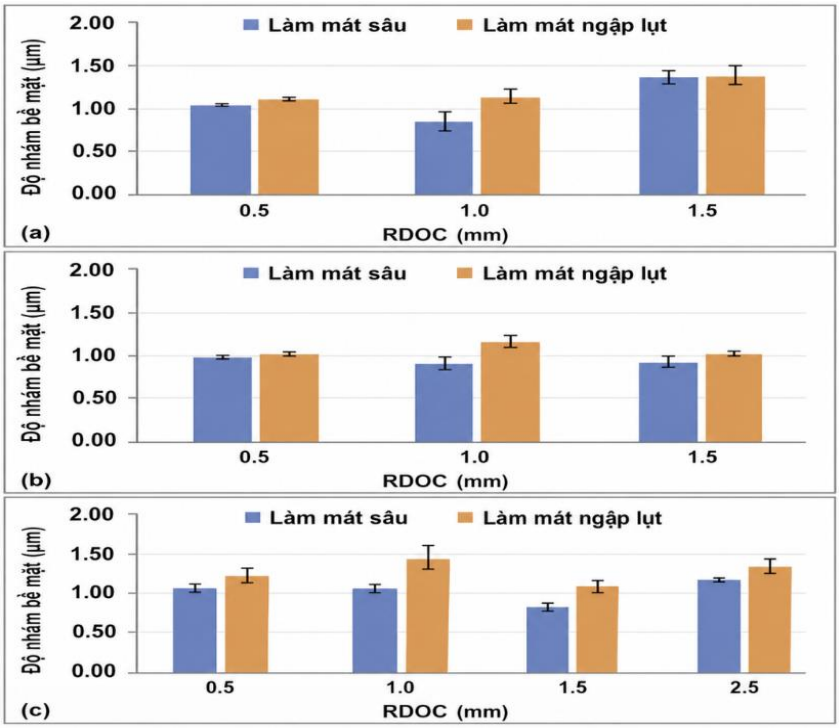
Damir và cộng sự [111] đã thực hiện nghiên cứu so sánh toàn diện giữa làm mát lạnh sâu và làm mát ngập truyền thống khi tiện và phay thép dụng cụ H13 tôi cứng. Kết quả cho thấy công nghệ cryogenic không chỉ cải thiện khả năng cắt gọt mà còn nâng cao chất lượng bề mặt, tuổi thọ dụng cụ và tính toàn vẹn bề mặt của chi tiết gia công. Trong nghiên cứu này, nitơ lỏng được cấp trực tiếp tới vùng cắt thông qua vòi phun được tối ưu hóa bằng mô phỏng CFD nhằm tăng hiệu quả truyền nhiệt và hạn chế hiện tượng bay hơi trước khi tới vùng cắt.

Kết quả thực nghiệm tiện cho thấy làm mát bằng LN_2 giúp giảm đáng kể lực cắt so với làm mát ngập. Như thể hiện trong Hình 2.16, lực cắt tổng hợp khi sử dụng cryogenic thấp hơn khoảng 12% ở hầu hết các chế độ cắt khảo sát. Sự suy giảm lực cắt được giải thích bởi khả năng làm mát hiệu quả của nitơ lỏng, giúp hạn chế hư hỏng nhiệt của dụng cụ và duy trì trạng thái làm việc ổn định của vùng cắt [111].

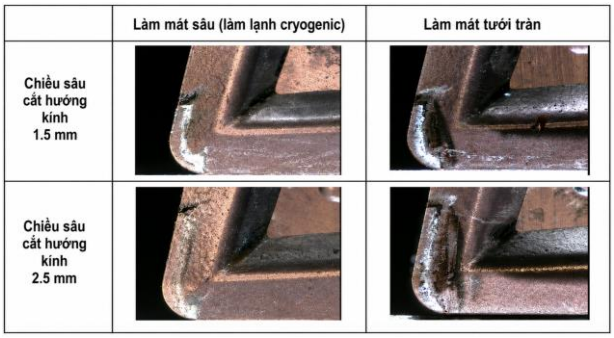


Hình 2.16. *Biểu đồ so sánh lực cắt tổng hợp khi tiện thép H13 dưới điều kiện làm mát bằng nitơ lỏng và làm mát ngập ở các tốc độ cắt và chiều sâu cắt khác nhau [111]*

Bên cạnh việc giảm lực cắt, công nghệ làm mát bằng khí lạnh còn cải thiện đáng kể chất lượng bề mặt gia công. Kết quả trong Hình 2.17 cho thấy độ nhám bề mặt khi sử dụng LN_2 thấp hơn khoảng 20% so với làm mát ngập truyền thống. Các tác giả cho rằng việc giảm nhiệt độ vùng cắt làm hạn chế mòn dao và duy trì độ sắc bén của lưỡi cắt trong suốt quá trình gia công, từ đó tạo ra bề mặt có chất lượng tốt hơn.

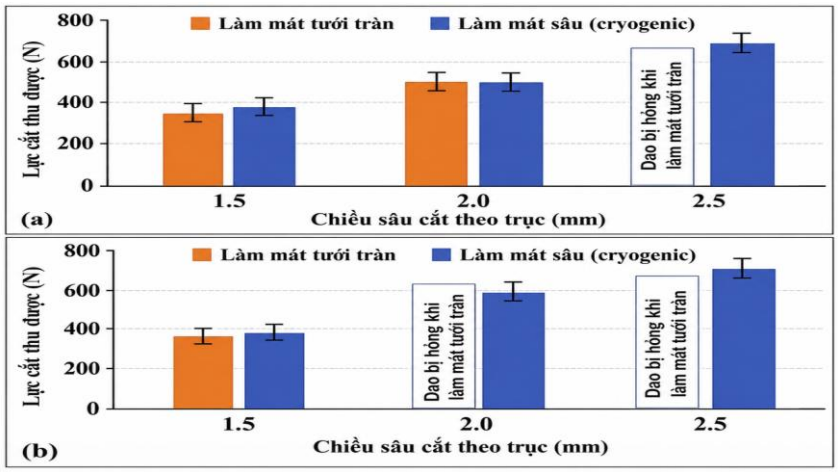


Hình 2.17. *Biểu đồ so sánh độ nhám bề mặt khi tiện thép H13 dưới các điều kiện làm mát bằng nitơ lỏng và làm mát ngập [111]*

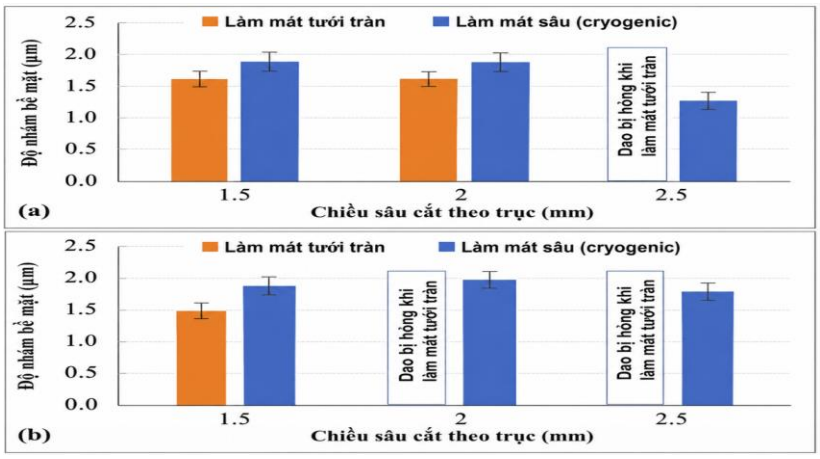


Hình 2.18. *Hình ảnh so sánh trạng thái mòn của dụng cụ khi tiện thép H13 bằng nitơ lỏng và làm mát ngập [111]*

Ảnh hưởng tích cực của cryogenic đối với tuổi thọ dụng cụ được thể hiện rõ qua hình ảnh dụng cụ sau gia công trong Hình 2.18. So với làm mát ngập, dụng cụ làm việc dưới điều kiện LN_2 xuất hiện ít dấu hiệu đổi màu nhiệt và mài mòn hơn. Trên bề mặt tiếp xúc dao-phoi của dụng cụ sử dụng làm mát ngập xuất hiện các vết mài mòn và biến màu rõ rệt, trong khi dụng cụ sử dụng LN_2 duy trì được trạng thái tốt hơn. Điều này chứng minh rằng nitơ lỏng có khả năng tản nhiệt hiệu quả hơn và làm giảm mức độ hư hỏng nhiệt của dụng cụ cắt [111].



Hình 2.19. *Biểu đồ so sánh lực cắt khi phay thép H13 dưới điều kiện làm mát bằng nitơ lỏng và làm mát ngập [111]*

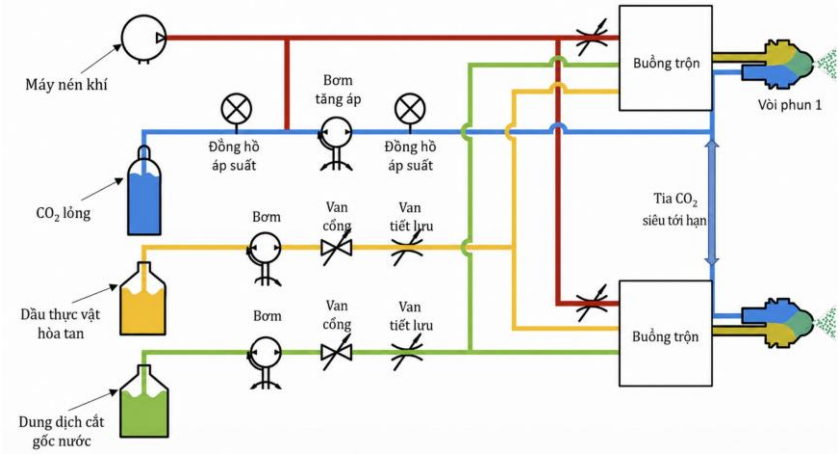


Hình 2.20. *Biểu đồ so sánh độ nhám bề mặt khi phay thép H13 dưới điều kiện làm mát bằng nitơ lỏng và làm mát ngập [111]*

Đối với quá trình phay, lợi ích của công nghệ cryogenic còn rõ rệt hơn. Kết quả trong Hình 2.19 và Hình 2.20 cho thấy ở các chế độ cắt thấp, sự khác biệt giữa hai phương pháp không lớn. Tuy nhiên, khi tăng tốc độ cắt và chiều sâu cắt, dụng cụ sử dụng làm mát ngập bị gãy ở điều kiện tốc độ 200 m/phút và chiều sâu cắt 1.5–2.0 mm, trong khi dụng cụ sử dụng LN_2 vẫn hoạt động ổn định ngay cả ở tốc độ 220 m/phút và chiều sâu cắt 2.5 mm. Nhờ đó, tốc độ bóc tách vật liệu (MRR) tăng khoảng 37.5% so với làm mát ngập truyền thống.

2.2.4.2. Gia công lạnh-MQL (Cryogenic-MQL)

Gia công lạnh-MQL là sự kết hợp giữa MQL và dòng khí lạnh hoặc môi chất lạnh sâu nhằm tận dụng đồng thời khả năng bôi trơn của MQL và khả năng làm mát mạnh của công nghệ cryogenic. Cấu trúc nguyên lý của hệ thống cryogenic MQL được trình bày trong Hình 2.21, trong đó dầu bôi trơn được nguyên tử hóa và vận chuyển cùng dòng khí lạnh tới vùng cắt [18].



Hình 2.21. *Sơ đồ nguyên lý của hệ thống Cryogenic MQL đa chức năng [18]*

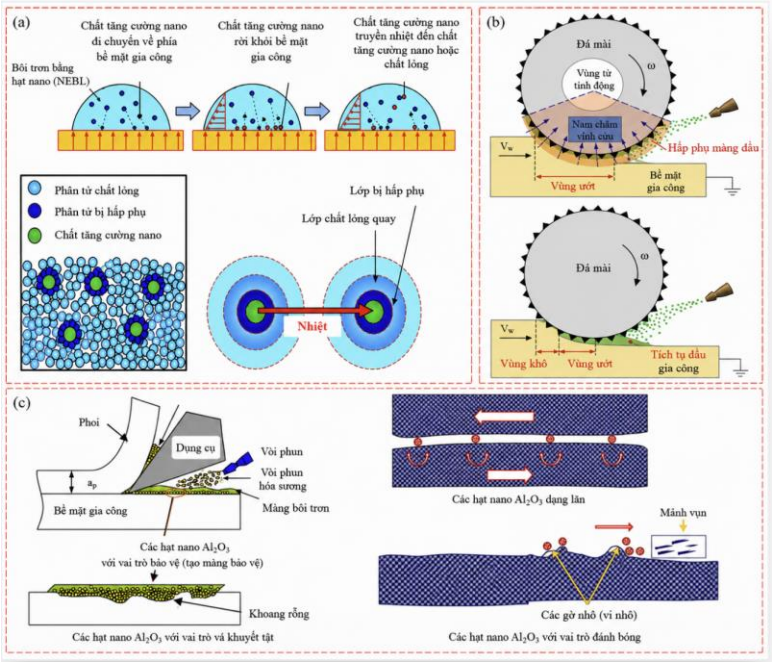
2.2.4.3. Nano-MQL

Nano-MQL là xu hướng phát triển mạnh nhất trong lĩnh vực bôi trơn tối thiểu hiện nay. Công nghệ này sử dụng các hạt nano như Al_2O_3, CuO, MoS_2, CNT, graphene hoặc hBN phân tán trong dầu MQL nhằm tăng khả năng dẫn nhiệt và cải thiện tính chất tribological của môi chất bôi trơn. Các cơ chế hoạt động chính của nano-MQL được minh họa trong Hình 2.22, bao gồm tăng cường truyền nhiệt, tăng khả năng thâm nhập vào vùng tiếp xúc và hình thành lớp tribofilm bảo vệ trên bề mặt ma sát [18].

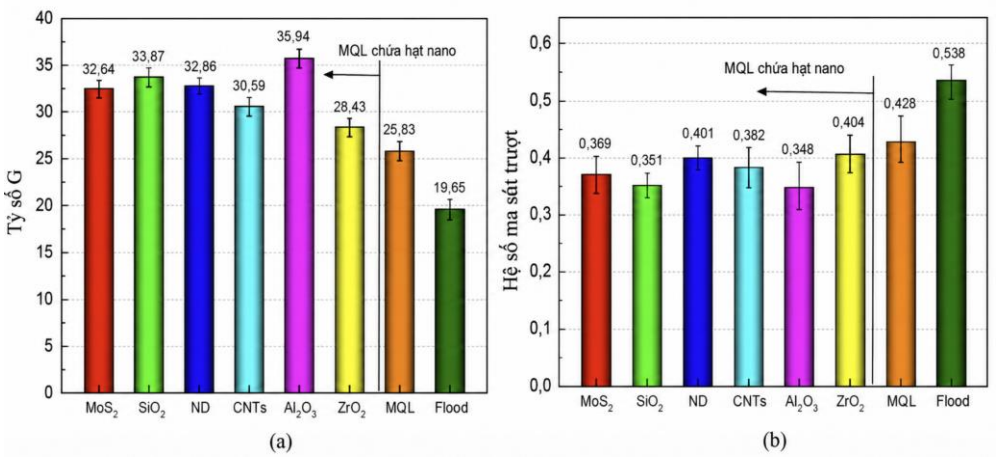
Kết quả tổng hợp từ nhiều nghiên cứu cho thấy Nano-MQL có khả năng giảm đáng kể hệ số ma sát, nhiệt độ vùng cắt, lực cắt và độ nhám bề mặt. Ví dụ, sử dụng Al_2O_3 nano-fluid giúp giảm hệ số ma sát xuống khoảng 0.348 và cải thiện đáng kể tỷ số mài (G-ratio) như thể hiện trong Hình 2.23 [18].

Bên cạnh đó, tổng hợp các nghiên cứu cho thấy Nano-MQL thường cho kết quả tốt hơn MQL truyền thống về lực cắt, độ nhám bề mặt, nhiệt độ vùng cắt và tuổi

thọ dụng cụ, đặc biệt khi gia công các vật liệu khó cắt như titan, Inconel và thép tôi cứng [18].



Hình 2.22. *Các cơ chế truyền nhiệt, thâm nhập và bôi trơn của công nghệ Nano-MQL* [18]



Hình 2.23. *Biểu đồ so sánh Ảnh hưởng của các loại nano-fluid đến tỷ số mài (G-ratio) và hệ số ma sát trong gia công [18].*

2.2.5. Lựa chọn công nghệ làm mát

Từ các phân tích trên, có thể nhận thấy xu hướng phát triển của các công nghệ bôi trơn-làm mát đang chuyển dịch từ các phương pháp truyền thống như gia công khô và làm mát ngập sang các công nghệ gia công bền vững dựa trên MQL và các biến thể lai của MQL. Gia công khô có ưu điểm về môi trường và chi phí vận hành nhưng thường gặp các vấn đề về nhiệt độ vùng cắt cao, mòn dụng cụ nhanh và chất lượng bề mặt thấp. Trong khi đó, làm mát ngập có khả năng kiểm soát nhiệt độ tốt nhưng tiêu tốn lượng lớn dung dịch trơn nguội, làm tăng chi phí vận hành, chi phí xử lý chất thải và tác động tiêu cực đến môi trường. MQL truyền thống đã khắc

phục đáng kể những hạn chế này nhờ khả năng giảm ma sát, giảm lượng dung dịch sử dụng và cải thiện tuổi thọ dụng cụ, đồng thời vẫn duy trì được chất lượng gia công ở mức cao. Tuy nhiên, khả năng làm mát của MQL vẫn còn hạn chế khi gia công các vật liệu khó cắt hoặc trong các điều kiện cắt có mật độ nhiệt cao.

Để nâng cao hơn nữa hiệu quả của MQL, nhiều công nghệ lai đã được phát triển như Cryogenic MQL, RHVT-MQL, Nano-MQL, Hybrid Nano-MQL và MQL hỗ trợ rung siêu âm. Kết quả tổng hợp trong Bảng 2.1 cho thấy các công nghệ lai này đều đạt hiệu quả làm mát, bôi trơn và chất lượng bề mặt cao hơn so với MQL truyền thống, trong đó Cryogenic MQL và Nano-MQL là hai hướng nghiên cứu nổi bật nhất hiện nay. Cryogenic MQL cho khả năng làm mát rất tốt nhờ sử dụng khí lạnh hoặc môi chất lạnh sâu, giúp giảm nhiệt độ vùng cắt, kéo dài tuổi thọ dụng cụ và nâng cao năng suất gia công. Tuy nhiên, hệ thống cryogenic thường có chi phí đầu tư và vận hành cao, yêu cầu thiết bị chuyên dụng và gặp khó khăn trong triển khai ở quy mô sản xuất phổ thông. Ngược lại, Nano-MQL có thể cải thiện đồng thời khả năng bôi trơn và truyền nhiệt thông qua việc bổ sung các hạt nano vào dầu bôi trơn mà không làm tăng đáng kể độ phức tạp của hệ thống gia công.

Bảng 2.1. Hiệu quả của các công nghệ bôi trơn-làm mát khác nhau [18]

Tiêu chí	**Gia công ngập (Flood)**	**Gia công khô (Dry)**	**MQL truyền thống**	**Cryogenic MQL**	**Nano-MQL**	**RHVT-MQL**	**MQL hỗ trợ rung siêu âm**
Khả năng làm mát	Tốt	Kém	Trung bình	Xuất sắc	Xuất sắc	Xuất sắc	Xuất sắc
Khả năng bôi trơn	Xuất sắc	Kém	Xuất sắc	Trung bình	Xuất sắc	Tốt	Xuất sắc
Tuổi thọ dụng cụ	Tốt	Kém	Trung bình	Tốt	Xuất sắc	Tốt	Tốt
Khả năng thoát phoi	Tốt	Tốt	Tốt	Tốt	Tốt	Tốt	Tốt
Tính toàn vẹn bề mặt	Tốt	Kém	Trung bình	Xuất sắc	Xuất sắc	Xuất sắc	Xuất sắc
Các vấn đề về tính bền vững	Cặn thải có hại, chi phí cao	Hư hỏng nhiệt, tiêu thụ năng lượng cao	Sương dầu có thể ảnh hưởng sức khỏe	Chi phí đầu tư ban đầu cao	Chi phí sản xuất và vấn đề ổn định nano-fluid	Chi phí và các vấn đề sức khỏe liên quan	Xử lý dầu thải, phát thải và lựa chọn chất bôi trơn

Các kết quả thực nghiệm cho thấy Nano-MQL có khả năng làm giảm đáng kể hệ số ma sát, nhiệt độ vùng cắt, lực cắt, độ nhám bề mặt và mòn dụng cụ so với MQL truyền thống. Cơ chế cải thiện hiệu quả gia công của Nano-MQL được giải

thích bởi sự kết hợp của nhiều hiệu ứng như tăng cường truyền nhiệt, hiệu ứng ổ bi vi mô (rolling effect), hình thành lớp màng tribofilm bảo vệ và khả năng lấp đầy các vi khuyết tật trên bề mặt tiếp xúc. Như thể hiện trong Hình 2.21, các hạt nano không chỉ tham gia vào quá trình truyền nhiệt mà còn đóng vai trò như các phần tử bôi trơn và bảo vệ bề mặt ma sát, từ đó làm giảm ma sát và hạn chế mài mòn dụng cụ. Ngoài ra, nhiều nghiên cứu còn cho thấy Nano-MQL giúp giảm đáng kể lực cắt, nhiệt độ và độ nhám bề mặt khi gia công các vật liệu khó cắt như hợp kim titan, hợp kim niken và thép tôi cứng.

Bên cạnh hiệu quả về mặt công nghệ, Nano-MQL còn đáp ứng tốt các yêu cầu của sản xuất bền vững nhờ giảm lượng dung dịch sử dụng, giảm tiêu thụ năng lượng và giảm phát thải môi trường. Đánh giá tổng hợp của Ali và cộng sự cho thấy Nano-MQL thuộc nhóm các công nghệ có tiềm năng cao nhất về cả khả năng gia công và tính bền vững. Đặc biệt, các nghiên cứu gần đây đều cho rằng việc kết hợp MQL với các phụ gia nano là một trong những hướng phát triển triển vọng nhất cho gia công các vật liệu có độ bền cao, độ cứng lớn và khả năng dẫn nhiệt thấp.

Đối với thép 90CrSi tôi cứng được sử dụng trong nghiên cứu này, các yêu cầu đồng thời về giảm lực cắt, hạn chế mòn dụng cụ, cải thiện độ nhám bề mặt và nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng là những yếu tố đặc biệt quan trọng. Trong khi Cryogenic MQL cho hiệu quả làm mát cao nhưng đòi hỏi hệ thống phức tạp và chi phí đầu tư lớn, Nano-MQL có khả năng cung cấp đồng thời hiệu quả bôi trơn và truyền nhiệt vượt trội với kết cấu hệ thống tương đối đơn giản và dễ triển khai trong điều kiện thực nghiệm cũng như sản xuất công nghiệp. Vì vậy, Nano-MQL được lựa chọn làm công nghệ bôi trơn-làm mát cho nghiên cứu này nhằm nâng cao hiệu quả phay cứng thép 90CrSi, đồng thời đáp ứng định hướng gia công xanh và phát triển bền vững.

2.3. Phương pháp thiết kế thí nghiệm và định hướng lựa chọn thiết kế

Thiết kế thí nghiệm (Design of Experiments - DOE) là một phương pháp thống kê có hệ thống nhằm xây dựng kế hoạch thực nghiệm, thu thập và phân tích dữ liệu để xác định mối quan hệ giữa các yếu tố đầu vào và các đại lượng đầu ra của quá trình. Theo [112], DOE đóng vai trò là một công cụ cốt lõi trong phương pháp khoa học, cho phép kiểm chứng giả thuyết, tối ưu hóa quá trình và nâng cao độ tin cậy của kết luận thông qua việc thiết kế thí nghiệm hợp lý và phân tích dữ liệu một cách có cấu trúc.

Một trong những vai trò quan trọng của DOE là cung cấp một khuôn khổ thực nghiệm giúp kiểm soát các yếu tố ảnh hưởng và giảm thiểu sai số. Như đã chỉ ra trong [112], việc áp dụng các nguyên lý cơ bản như ngẫu nhiên hóa (randomization), lặp lại

(replication) và phân khối (blocking) cho phép tách biệt ảnh hưởng của các yếu tố nghiên cứu khỏi các yếu tố nhiễu, đồng thời tránh hiện tượng nhiễu lẫn (confounding) giữa các biến. Nhờ đó, DOE giúp nâng cao độ chính xác của các ước lượng và tăng khả năng phát hiện các ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê.

Trong các phương pháp DOE, thiết kế bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology – RSM) được sử dụng rộng rãi để mô hình hóa các mối quan hệ phi tuyến giữa các biến đầu vào và đầu ra thông qua các mô hình hồi quy bậc hai. Theo [112], RSM cho phép không chỉ phân tích ảnh hưởng của các yếu tố mà còn xác định vùng tối ưu của quá trình trong không gian thiết kế. Các dạng thiết kế phổ biến trong RSM bao gồm Central Composite Design (CCD) và Box–Behnken Design (BBD), trong đó BBD có ưu điểm giảm số lượng thí nghiệm và tránh các điểm cực trị ở biên miền thiết kế, phù hợp với các bài toán gia công có giới hạn công nghệ.

Trong thực tế, các biến đầu vào của quá trình gia công thường có bản chất khác nhau, bao gồm các biến liên tục (như tốc độ cắt, lượng chạy dao, chiều sâu cắt) và các yếu tố rời rạc hoặc phân loại (như loại dụng cụ, kích thước dao hoặc điều kiện bôi trơn). Theo [112], trong những trường hợp này, việc áp dụng trực tiếp các thiết kế RSM truyền thống có thể không đảm bảo tính hợp lệ của mô hình nếu không xử lý phù hợp các yếu tố không liên tục.

Để giải quyết vấn đề này, phương pháp phân khối (blocking) được sử dụng nhằm nhóm các đơn vị thí nghiệm có điều kiện tương đồng vào cùng một khối, từ đó giảm biến thiên không mong muốn và cải thiện độ chính xác của mô hình. Theo [112], phân khối cho phép tách phần biến thiên do các yếu tố nền (background variability) ra khỏi sai số ngẫu nhiên, qua đó làm giảm phương sai sai số và tăng độ nhạy của các phép kiểm định thống kê. Trong các thiết kế hiện đại, đặc biệt là trong RSM, kỹ thuật phân khối có thể được tích hợp trực tiếp vào cấu trúc thiết kế để xử lý các yếu tố khó thay đổi (hard-to-change factors) hoặc các điều kiện thực nghiệm không đồng nhất.

Trong bối cảnh nghiên cứu gia công phay cứng, nơi tồn tại đồng thời các biến liên tục và các yếu tố phân loại, việc kết hợp giữa RSM và phân khối là một hướng tiếp cận phù hợp. Cách tiếp cận này cho phép xây dựng mô hình hồi quy chính xác đối với các biến liên tục, đồng thời kiểm soát ảnh hưởng của các yếu tố không liên tục thông qua cấu trúc phân khối. Theo [112], các thiết kế bề mặt đáp ứng có phân khối (blocked response surface designs) có khả năng duy trì tính trực giao và hiệu quả thống kê của thiết kế, đồng thời thích ứng với các điều kiện thực nghiệm phức tạp.

Xuất phát từ các phân tích trên, nghiên cứu này lựa chọn thiết kế bề mặt đáp ứng dạng Box-Behnken có phân khối nhằm đáp ứng các yêu cầu về số lượng thí

nghiệm, khả năng mô hình hóa phi tuyến và xử lý các yếu tố phân loại trong quá trình gia công. Thiết kế này cho phép xây dựng mô hình dự báo có độ tin cậy cao, đồng thời tạo cơ sở cho các bước tối ưu hóa trong các chương tiếp theo. Cấu trúc thiết kế thí nghiệm cụ thể, bao gồm các biến đầu vào, mức khảo sát và ma trận thí nghiệm, sẽ được trình bày chi tiết trong Chương 3 của luận án.

2.4. Phương pháp mô hình hóa

Trong nghiên cứu gia công cắt gọt, mô hình hóa đóng vai trò quan trọng trong việc thiết lập mối quan hệ định lượng giữa các thông số công nghệ và các đại lượng đầu ra như độ nhám bề mặt, lực cắt và tốc độ bóc tách vật liệu. Thông qua các mô hình này, có thể dự đoán hành vi của quá trình, phân tích ảnh hưởng của các yếu tố và làm cơ sở cho các bài toán tối ưu hóa. Các phương pháp mô hình hóa thường được sử dụng trong gia công bao gồm mô hình hồi quy truyền thống và các mô hình học máy hiện đại.

2.4.1. Mô hình hồi quy bề mặt đáp ứng (RSM)

Phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology – RSM) là một trong những kỹ thuật mô hình hóa phổ biến trong gia công, cho phép xây dựng các mô hình hồi quy bậc hai nhằm mô tả mối quan hệ giữa các biến đầu vào và đầu ra. Dạng tổng quát của mô hình RSM có thể được biểu diễn như sau:

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (2.1)$$

Trong đó $y$là đại lượng đầu ra, $x_i$là các biến đầu vào, βlà các hệ số hồi quy và εlà sai số ngẫu nhiên.

Ưu điểm của RSM là:

- Dễ xây dựng và diễn giải
- Cho phép phân tích ảnh hưởng riêng lẻ và tương tác giữa các yếu tố
- Phù hợp với dữ liệu có quy luật tương đối "trơn"

Tuy nhiên, RSM có hạn chế trong việc mô tả các quan hệ phi tuyến phức tạp hoặc dữ liệu có nhiễu cao, đặc biệt trong các quá trình gia công hiện đại như phay cứng hoặc gia công có hỗ trợ nano-MQL.

2.4.2. Mô hình học máy trong gia công

Để khắc phục các hạn chế của mô hình hồi quy truyền thống, các phương pháp học máy (machine learning) đã được ứng dụng rộng rãi trong mô hình hóa quá trình gia công. Các mô hình này có khả năng học từ dữ liệu thực nghiệm và biểu diễn các mối quan hệ phi tuyến phức tạp mà không cần giả thiết trước dạng hàm.

Một số phương pháp phổ biến bao gồm:

- Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN)
- Hệ suy luận mờ (ANFIS)

- Cây quyết định và các mô hình ensemble
- Gaussian Process Regression (GPR)

Trong số đó, GPR được đánh giá cao nhờ khả năng dự đoán chính xác với tập dữ liệu nhỏ và cung cấp thông tin về độ không chắc chắn của dự đoán.

2.4.3. Mô hình Gaussian Process Regression (GPR)

Gaussian Process Regression (GPR) là một phương pháp học máy phi tham số dựa trên lý thuyết xác suất, trong đó đầu ra của mô hình được giả định là một quá trình Gaussian. Thay vì xây dựng một hàm hồi quy cụ thể, GPR xác định phân phối xác suất của hàm cần dự đoán dựa trên dữ liệu huấn luyện.

Giả sử tập dữ liệu huấn luyện gồm các cặp (x_i, y_i), GPR mô hình hóa mối quan hệ giữa các điểm dữ liệu thông qua hàm hiệp phương sai (kernel function):

$$k(x_i, x_j) = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{(x_i - x_j)^2}{2l^2}\right) \quad (2.2)$$

trong đó, $k(x_i, x_j)$ là hàm kernel, σ_f là phương sai tín hiệu, và l là tham số chiều dài đặc trưng.

Các ưu điểm chính của GPR bao gồm khả năng mô hình hóa quan hệ phi tuyến mạnh, hoạt động tốt với số lượng dữ liệu hạn chế, cung cấp khoảng tin cậy cho dự đoán và linh hoạt thông qua lựa chọn kernel. Nhờ các đặc điểm này, GPR đặc biệt phù hợp với các bài toán gia công phức tạp như phay cứng dưới điều kiện nano-MQL, nơi các mối quan hệ giữa thông số công nghệ và đại lượng đầu ra có tính phi tuyến cao.

2.4.4. Đánh giá và lựa chọn mô hình

Để đánh giá độ chính xác của các mô hình, các chỉ tiêu thống kê thường được sử dụng bao gồm:

- Hệ số xác định R^2
- Sai số bình phương trung bình (RMSE)
- Sai số tuyệt đối trung bình (MAE)

Việc so sánh giữa các mô hình khác nhau (ví dụ RSM và GPR) cho phép lựa chọn phương pháp phù hợp nhất với dữ liệu thực nghiệm. Trong nhiều nghiên cứu, GPR cho thấy độ chính xác vượt trội so với RSM, đặc biệt trong các trường hợp dữ liệu có tính phi tuyến hoặc tương tác phức tạp.

2.4.5. Nhận xét và định hướng lựa chọn mô hình

Từ các phân tích trên có thể thấy rằng mỗi phương pháp mô hình hóa đều có những ưu điểm và hạn chế riêng. RSM phù hợp cho phân tích sơ bộ và diễn giải cơ chế, trong khi GPR có khả năng dự đoán chính xác hơn đối với các hệ thống phi tuyến.

Do đó, trong nghiên cứu này, cách tiếp cận kết hợp giữa RSM và GPR được lựa chọn nhằm tận dụng ưu điểm của cả hai phương pháp: RSM được sử dụng để phân tích ảnh hưởng của các yếu tố và xây dựng mô hình hồi quy ban đầu, trong khi GPR được áp dụng để nâng cao độ chính xác dự đoán và phục vụ cho bài toán tối ưu hóa trong các chương tiếp theo.

2.5. Phương pháp tối ưu hóa

2.5.1. Tối ưu hóa đơn mục tiêu

Tối ưu hóa đơn mục tiêu là quá trình xác định giá trị của các biến đầu vào sao cho một hàm mục tiêu đạt giá trị tối ưu (Bộ thông số phù hợp).Trong gia công phay cứng, các bài toán tối ưu đơn mục tiêu thường tập trung vào việc:

- Giảm độ nhám bề mặt (min Ra)
- Tăng tốc độ bóc tách vật liệu (max MRR)
- Giảm lực cắt (min F)

Các phương pháp tối ưu đơn mục tiêu thường được thực hiện dựa trên mô hình hồi quy (RSM) hoặc mô hình học máy, kết hợp với các thuật toán tìm kiếm như phương pháp đạo hàm, tìm kiếm lưới (grid search) hoặc các thuật toán tiến hóa. Tuy nhiên, do chỉ xét một mục tiêu tại một thời điểm, phương pháp này không phản ánh đầy đủ bản chất đánh đổi (trade-off) giữa các chỉ tiêu trong thực tế sản xuất.

2.5.2. Tối ưu hóa đa mục tiêu

Trong các quá trình gia công thực tế, các mục tiêu thường mâu thuẫn với nhau, ví dụ:

- Tăng MRR thường làm tăng độ nhám bề mặt
- Giảm lực cắt có thể làm giảm năng suất

Do đó, tối ưu hóa đa mục tiêu (Multi-objective Optimization) được sử dụng để tìm ra tập nghiệm tối ưu thỏa hiệp giữa các mục tiêu. Thay vì một nghiệm duy nhất, kết quả của bài toán đa mục tiêu là một tập nghiệm Pareto, trong đó không tồn tại nghiệm nào tốt hơn nghiệm khác ở tất cả các mục tiêu.

Khái niệm Pareto tối ưu được định nghĩa như sau: một nghiệm được gọi là tối ưu Pareto nếu không tồn tại nghiệm khác cải thiện một mục tiêu mà không làm xấu đi ít nhất một mục tiêu khác. Tập hợp các nghiệm Pareto tạo thành biên Pareto (Pareto front), phản ánh mối quan hệ đánh đổi giữa các mục tiêu.

2.5.3. Thuật toán NSGA-II

Trong các phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu, thuật toán di truyền không trội (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II - NSGA-II) được sử dụng rộng rãi nhờ hiệu quả cao và khả năng tìm kiếm toàn cục.

Thuật toán NSGA-II hoạt động dựa trên các bước chính:

- Khởi tạo quần thể ban đầu
- Đánh giá hàm mục tiêu
- Phân loại không trội (non-dominated sorting)
- Tính khoảng cách chen lấn (crowding distance)
- Lựa chọn, lai ghép và đột biến
- Cập nhật quần thể qua các thế hệ

Ưu điểm của NSGA-II:

- Khả năng tìm kiếm tập nghiệm Pareto phân bố đều
- Không yêu cầu chuyển đổi bài toán đa mục tiêu thành đơn mục tiêu
- Hiệu quả tính toán cao
- Dễ kết hợp với các mô hình dự đoán như RSM hoặc GPR

Nhờ các đặc điểm này, NSGA-II đặc biệt phù hợp với các bài toán tối ưu hóa trong gia công phức tạp, nơi các mối quan hệ giữa biến đầu vào và đầu ra có tính phi tuyến và đa mục tiêu.

2.5.4. Kết hợp mô hình hóa và tối ưu hóa

Trong các nghiên cứu hiện đại, tối ưu hóa thường được thực hiện trên cơ sở các mô hình dự đoán thay thế (surrogate models) nhằm giảm chi phí tính toán và số lượng thí nghiệm. Các mô hình như RSM hoặc GPR được sử dụng để biểu diễn mối quan hệ giữa các biến, sau đó các thuật toán tối ưu như NSGA-II được áp dụng để tìm kiếm nghiệm tối ưu.

Cách tiếp cận này cho phép:

- Giảm số lượng thí nghiệm thực
- Tăng tốc độ tính toán
- Dễ dàng khảo sát không gian thiết kế

2.5.5. Nhận xét và định hướng áp dụng

Từ các phân tích trên có thể thấy rằng tối ưu hóa đa mục tiêu là hướng tiếp cận phù hợp cho các bài toán gia công phay cứng, nơi tồn tại sự đánh đổi giữa chất lượng bề mặt, lực cắt và năng suất. Trong đó, việc kết hợp mô hình GPR với thuật toán NSGA-II cho phép xây dựng một khung tối ưu hóa hiệu quả, vừa đảm bảo độ chính xác dự đoán, vừa khai thác được khả năng tìm kiếm toàn cục của thuật toán tiến hóa.

Do đó, trong nghiên cứu này, phương pháp tối ưu hóa được lựa chọn là tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng thuật toán NSGA-II trên cơ sở mô hình GPR, nhằm xác

định tập nghiệm Pareto tối ưu và phục vụ lựa chọn chế độ gia công phù hợp trong các chương tiếp theo.

Kết luận chương 2

- Chương 2 đã trình bày một cách có hệ thống các cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu của luận án, các đặc điểm cơ bản của quá trình phay cứng đã được phân tích, bao gồm cơ chế tạo phoi, các hiện tượng nhiệt - cơ trong vùng cắt và các chỉ tiêu đánh giá quan trọng như độ nhám bề mặt, lực cắt và tốc độ bóc tách vật liệu.

- Từ phân tích các phương pháp bôi trơn - làm mát phổ biến trong phay cứng đã được hệ thống hóa từ gia công khô, làm mát tràn đến các công nghệ tiên tiến như MQL, MQCL và nano-MQL. Qua đó, nano-MQL được xác định là hướng tiếp cận phù hợp nhờ khả năng cải thiện đồng thời điều kiện ma sát và truyền nhiệt trong vùng cắt.

- Các phương pháp thiết kế thí nghiệm và định hướng lựa chọn thiết kế đã được trình bày, trong đó nhấn mạnh vai trò của thiết kế bề mặt đáp ứng kết hợp với kỹ thuật phân khối nhằm xử lý hiệu quả các biến liên tục và các yếu tố phân loại trong nghiên cứu là cơ sở quan trọng để xây dựng kế hoạch thực nghiệm hợp lý trong chương tiếp theo.

- Từ các phương pháp mô hình hóa, bao gồm RMS và GPR, đã được giới thiệu nhằm tạo cơ sở cho các phương pháp tối ưu hóa, đặc biệt là tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng thuật toán NSGA-II, đã được trình bày nhằm xác định tập nghiệm tối ưu thỏa hiệp giữa các chỉ tiêu công nghệ.

CHƯƠNG 3
XÂY DỰNG HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM

Mục tiêu chương 3: Xây dựng và mô tả hệ thống thí nghiệm nhằm khảo sát thực nghiệm quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi dưới điều kiện bôi trơn - làm mát nano-MQL sử dụng hạt CuO.

Nội dung chương 3 bao gồm:

3.1. Giới thiệu

Trong nghiên cứu này, hệ thống thí nghiệm được xây dựng nhằm khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi dưới điều kiện bôi trơn - làm mát nano-MQL sử dụng hạt CuO. Hệ thống thí nghiệm được thiết kế theo hướng tích hợp giữa thiết bị gia công, hệ thống bôi trơn - làm mát và hệ thống đo lường, đảm bảo khả năng thu thập dữ liệu chính xác và tái lập trong các điều kiện gia công khác nhau.

Trung tâm của hệ thống là máy phay CNC Mazak VCS 530C, đóng vai trò thực hiện quá trình gia công với độ cứng vững và độ chính xác cao, phù hợp cho phay cứng vật liệu đã qua nhiệt luyện. Hệ thống dụng cụ cắt bao gồm các dao phay ngón hợp kim cứng phủ nano-composite với các đường kính khác nhau, cho phép khảo sát ảnh hưởng của yếu tố hình học dụng cụ đến quá trình cắt.

Để nâng cao điều kiện gia công, hệ thống bôi trơn - làm mát nano-MQL được sử dụng nhằm cung cấp một lượng nhỏ dung dịch có chứa hạt nano CuO trực tiếp vào vùng cắt. Hệ thống này giúp giảm ma sát, cải thiện khả năng truyền nhiệt và hạn chế mài mòn dụng cụ, đặc biệt trong điều kiện phay cứng với nhiệt độ cao và tải trọng lớn.

Hệ thống đo lường được tích hợp nhằm thu thập các đại lượng đầu ra quan trọng của quá trình gia công. Cụ thể, lực cắt được đo bằng bàn đo lực Kistler 9257BA, cho phép ghi nhận các thành phần lực theo ba phương và xác định lực tổng hợp trong quá trình phay. Bên cạnh đó, cân điện tử WT3003NE được sử dụng để xác định khối lượng phôi trước và sau gia công, từ đó tính toán tốc độ bóc tách vật liệu (MRR). Độ nhám bề mặt được đo bằng thiết bị chuyên dụng (trình bày chi tiết ở các mục sau), đảm bảo đánh giá chính xác chất lượng bề mặt gia công.

Tổng thể, hệ thống thí nghiệm được thiết kế theo cấu trúc khép kín, bao gồm các thành phần chính: máy gia công, dụng cụ cắt, hệ thống nano-MQL và hệ thống đo lường. Các thành phần này được phối hợp đồng bộ nhằm đảm bảo quá trình thực nghiệm diễn ra ổn định, dữ liệu thu thập có độ tin cậy cao và đáp ứng yêu cầu của các bước mô hình hóa và tối ưu hóa trong các chương tiếp theo.

Quy trình thực nghiệm được thực hiện theo các bước chính: (i) thiết lập điều kiện gia công theo ma trận thiết kế thí nghiệm; (ii) tiến hành gia công trên máy CNC dưới điều kiện nano-MQL; (iii) thu thập dữ liệu lực cắt, khối lượng và độ nhám bề mặt; (iv) xử lý và lưu trữ dữ liệu phục vụ cho mô hình hóa và tối ưu hóa. Sơ đồ tổng thể của hệ thống thí nghiệm và quy trình thực hiện sẽ được trình bày chi tiết trong các mục tiếp theo của chương này.

3.2. Thiết bị gia công và hệ thống thí nghiệm

3.2.1. Trung tâm phay CNC

Trong nghiên cứu này, mô hình thí nghiệm là trung tâm phay đứng Mazak VCS 530C (Hình 3.1) được chọn để thực hiện các thí nghiệm về phay cứng. Trung tâm này là một máy công cụ CNC hiện đại, được thiết kế nhằm đáp ứng yêu cầu gia công chính xác cao và năng suất ổn định trong sản xuất cơ khí. Máy có kết cấu khung vững chắc, trục chính tốc độ cao và hệ thống dẫn hướng chính xác, cho phép thực hiện hiệu quả các nguyên công phay mặt, phay rãnh, khoan và taro trên nhiều loại vật liệu khác nhau. Với hành trình làm việc phù hợp cho chi tiết cỡ vừa, Mazak VCS 530C đáp ứng tốt cả mục đích đào tạo kỹ thuật lẫn sản xuất công nghiệp, đảm bảo độ chính xác hình học, độ lặp lại cao và khả năng vận hành tin cậy trong thời gian dài. Bảng 3.1 trình bày các thông số chính của máy.



Hình 3.1. *Trung tâm phay đứng Mazak VCS 530C*

Bảng 3.1. Thông số kỹ thuật chính của Trung tâm phay đứng Mazak VCS 530C

TT	Thông số	Giá trị
1.	Hãng sản xuất	Mazak (Nhật Bản)
2.	Model	VCS 530C
3.	Hành trình trục X	1.050 mm
4.	Hành trình trục Y	530 mm
5.	Hành trình trục Z	510 mm
6.	Kích thước bàn máy (D × R)	1.300 × 550 mm
7.	Tốc độ trục chính tối đa	12.000 vòng/phút

TT	Thông số	Giá trị
8.	Công suất trục chính	≈ 18,5 kW
9.	Tốc độ chạy dao nhanh (X/Y/Z)	42 m/phút
10.	Độ chính xác định vị	±0,005 mm
11.	Độ lặp lại	±0,003 mm
12.	Hệ điều khiển CNC	MAZATROL / Fanuc

3.2.2. Thiết bị đo lực Kistler 9257BA

Cảm biến lực Kistler 9257BA (Hình 3.2) là dynamometer thạch anh ba thành phần, được thiết kế chuyên dụng để đo lực cắt trong các quá trình phay, tiện và mài với độ chính xác cao. Thiết bị cho phép đo đồng thời ba thành phần lực trực giao F_x, F_y, F_zvới độ dịch chuyển gần như bằng không, nhờ cấu trúc gồm bốn cảm biến thạch anh được lắp dưới lực tiền ép cao giữa đế và tấm trên.



Hình 3.2*:Thiết bị đo lực KISTTLER 9257BA*

Theo tài liệu kỹ thuật của nhà sản xuất [113], dynamometer 9257BA có bốn dải đo có thể chuyển đổi, với dải lực tối đa lên tới ±5 kN đối với F_x, $F_y$và ±10 kN đối với F_z, đáp ứng tốt yêu cầu đo lực trong phay cứng. Độ nhạy đạt 10 mV/N cho F_x, $F_y$và 5 mV/N cho F_z, độ tuyến tính sai số nhỏ hơn ±1% toàn thang đo, và nhiễu xuyên kênh (cross-talk) không vượt quá ±3%.

Một ưu điểm quan trọng của Kistler 9257BA là bộ khuếch đại điện tích tích hợp, cho phép tín hiệu đầu ra có trở kháng thấp, giảm nhiễu và thuận lợi cho việc thu thập dữ liệu. Thiết bị đạt cấp bảo vệ IP67, chống xâm nhập của dung dịch trơn nguội và phoi cắt, đồng thời có lớp cách nhiệt giúp giảm ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường. Các đặc tính này đặc biệt phù hợp với thí nghiệm phay cứng dưới điều kiện nano-MQL, nơi tồn tại rung động và nhiệt độ vùng cắt cao.

Trong nghiên cứu này, dynamometer được lắp trực tiếp trên bàn máy phay CNC, phôi được gá trên bề mặt trên của cảm biến để đảm bảo truyền lực trực tiếp và chính xác. Dữ liệu lực theo thời gian được ghi nhận, lọc và xử lý để trích xuất giá trị đại diện cho mỗi điều kiện thí nghiệm.

3.2.3 Cân điện tử WT3003NE

Để xác định năng suất bóc tách vật liệu (MRR) trong quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi dưới điều kiện bôi trơn - làm mát nano-MQL sử dụng hạt CuO, việc đo chính xác khối lượng của phôi trước và sau khi gia công là yêu cầu bắt buộc. Trong nghiên cứu này, khối lượng được đo bằng cân điện tử chính xác cao model WT3003NE (Hình 3.3). Thiết bị có độ phân giải 0.001 g, đáp ứng yêu cầu về độ chính xác và độ lặp lại cần thiết cho việc tính toán định lượng MRR và tốc độ mòn điện cực (EWR). Các thông số kỹ thuật chi tiết của cân điện tử WT3003NE được trình bày trong Bảng 3.2.



Hình 3.3: *Cân điện tử WT3003NE*

Bảng 3.2 Thông số kỹ thuật của cân điện tử WT3003NE

TT	Model.	WT3003N
1.	Hãng sản xuất	Want Balance Instrument
2.	Khối lượng cân lớn nhất	300g
3.	Độ chính xác cân	0.001 g
4.	Kích thước đĩa cân	Φ80 mm
5.	Màn hình hiển thị	LCD với đèn nền trắng sáng
6.	Đơn vị cân (units)	g, ct, oz, lb, *, %, pcs

3.3. Điều kiện bôi trơn-làm mát và thông số thí nghiệm

Phương pháp nano-MQL được áp dụng để cải thiện điều kiện ma sát dao–phoi và tản nhiệt tại vùng cắt. Các thông số chính gồm:

- Dầu nền: dầu thực vật (canola oil).
- Hạt nano: oxit đồng (CuO) với nồng độ 2 wt.%.
- Tốc độ dòng dầu: 100 mL/giờ.
- Áp suất khí nén: 4 bar, đảm bảo phun sương mù ổn định và phân bố đều đến vùng cắt.

Bốn thông số đầu vào được lựa chọn làm biến độc lập trong quá trình thiết kế thí nghiệm gồm: Tốc độ cắt v_c(m/phút), lượng chạy dao răng f_z(mm/răng), chiều sâu cắt a_p(mm) và kích thước trung bình hạt nano D_{avg}(nm).

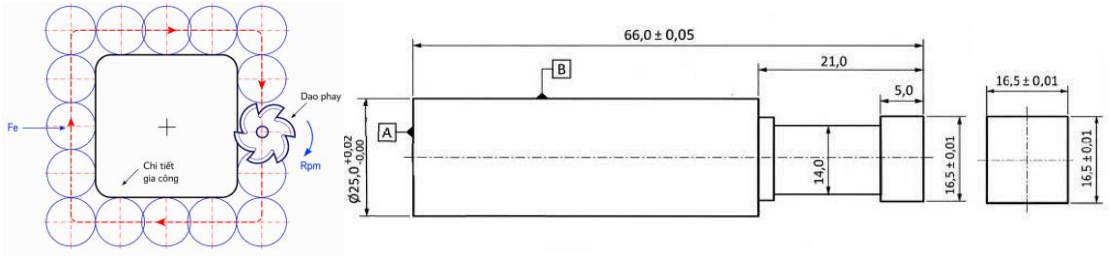
3.4. Mô tả trình tự thí nghiệm

Hình 3.4 mô tả thí nghiệm và các mẫu thép sau gia công. Tất cả các thí nghiệm được thực hiện trên máy phay CNC đứng trong điều kiện phay cứng bề mặt trụ ngoài (dạng vuông ngoài trụ) của thép dụng cụ 90CrSi. Vật liệu thí nghiêm là thép hợp kim dụng cụ 90CrSi qua tôi đạt độ cứng bề mặt 56-60 HRC, đại diện cho điều kiện phay cứng điển hình trong gia công khuôn và dụng cụ.

Cụ thể, Hình 3.4a trình bày setup thí nghiệm phay cứng dưới điều kiện bôi trơn-làm mát tối thiểu có bổ sung hạt nano CuO (nano-MQL). Hình 3.4b thể hiện các mẫu thép 90CrSi đã được gia công sau quá trình thí nghiệm. Hình 3.4c cho biết sơ đồ quá trình gia công – tạo hình bề mặt trụ ngoài của chi tiết gia công và Hình 3.4d thể hiện bản vẽ phôi dùng cho các thí nghiệm.



a) b)



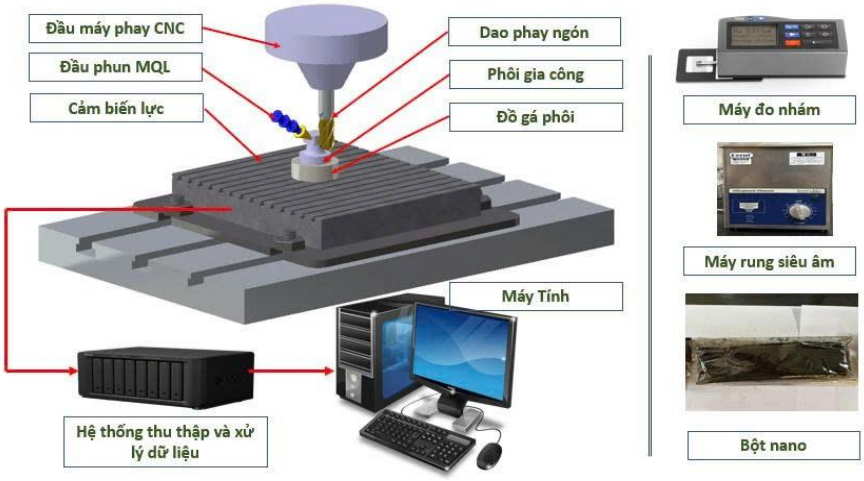
c) d)

Hình 3.4: *Mô tả thí nghiệm và mẫu thép gia công: (a) Hệ thống phay CNC cho quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài của thép 90CrSi dưới điều kiện bôi trơn-làm mát nano-MQL (CuO); (b) Các mẫu thép 90CrSi sau khi gia công thực nghiệm; c) Sơ đồ quá trình gia công-tạo hình bề mặt trụ ngoài; d) bản vẽ phôi*

Trong nghiên cứu này, các thí nghiệm phay cứng được thực hiện bằng dao phay ngón hợp kim cứng phủ lớp nano-composite thuộc dòng Epoch TH Hard (CEPR-TH) của hãng MOLDINO (Nhật Bản). Đây là dòng dao được thiết kế chuyên dụng cho gia công thép khuôn và thép tôi cứng có độ cứng từ 45 đến 65 HRC, với lớp phủ nano composite TH có khả năng chịu nhiệt và chống oxy hóa

cao, cho phép gia công ở tốc độ cắt lớn, tuổi bền dao cao và chất lượng bề mặt tốt. Ngoài ra, cấu trúc 6 me cắt cùng thiết kế độ cứng vững cao giúp dao duy trì độ ổn định trong quá trình phay cứng, đồng thời phù hợp với các điều kiện gia công khô hoặc bôi trơn tối thiểu (MQL). Theo nhà sản xuất, dòng dao CEPR-TH có thể được sử dụng hiệu quả cho các vật liệu như SKD11, SKD61, SKH, SUS420 và các loại thép khuôn đã tôi cứng khác.

Sơ đồ thể hiện kết nối dao, phôi, cảm biến lực để thu nhận dữ liệu



Để khảo sát ảnh hưởng của đường kính dao đến lực cắt, độ nhám bề mặt và năng suất gia công khi phay thép 90CrSi đã tôi cứng, ba loại dao có đường kính khác nhau đã được lựa chọn, bao gồm CEPR6060-TH, CEPR6090-TH và CEPR6120-TH. Các thông số hình học chính của dao được trình bày trong Bảng 3.3.

Bảng 3.3. Thông số hình học của các dao phay sử dụng trong thí nghiệm

Thông số	CEPR6060-TH	CEPR6090-TH	CEPR6120-TH
Đường kính dao D (mm)	6	9	12
Chiều dài me cắt (mm)	15	25	30
Chiều dài tổng (mm)	75	80	100
Đường kính chuôi (mm)	8	10	12
Số me cắt	6	6	6
Vật liệu dao	Carbide nguyên khối	Carbide nguyên khối	Carbide nguyên khối
Lớp phủ	TH Nano-composite	TH Nano-composite	TH Nano-composite

3.5. Thiết kế thí nghiệm

Thiết kế thí nghiệm được xây dựng nhằm nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến quá trình phay cứng, đồng thời xét đến tính không đồng nhất của các yếu tố đầu vào và điều kiện gia công. Trong nghiên cứu này, các yếu tố đầu vào được phân thành ba nhóm:

(i) nhóm biến công nghệ dạng liên tục tham gia trực tiếp vào thiết kế bề mặt đáp ứng;

(ii) nhóm biến rời rạc/phân loại được xử lý thông qua chiến lược phân khối hoặc khảo sát riêng;

(iii) nhóm điều kiện thực nghiệm được kiểm soát trong quá trình thí nghiệm.

3.5.1. Các biến công nghệ và yếu tố phân loại

Nhóm biến công nghệ chính bao gồm ba biến dạng liên tục, cụ thể là tốc độ cắt (V), lượng chạy dao trên răng (F) và chiều sâu cắt (D). Các biến này được khảo sát ở ba mức (thấp, trung tâm và cao); trong đó tốc độ cắt có ba mức chung cho cả ba đường kính dao (100, 125 và 150 m/phút), còn các mức của lượng chạy dao trên răng và chiều sâu cắt được lựa chọn riêng theo từng đường kính dao phay (Bảng 3.5). Bên cạnh đó, nghiên cứu xem xét một yếu tố phân loại, là kích thước hạt nano (Sn) trong hệ thống bôi trơn, với ba mức rời rạc tương ứng 20, 50 và 100 nm.

Do bản chất định tính và rời rạc, kích thước hạt nano Sn không được mô hình hóa như một biến liên tục trong mô hình bề mặt đáp ứng mà được xử lý thông qua chiến lược phân khối (blocking). Cách tiếp cận này phù hợp với khuyến nghị đối với các yếu tố phân loại hoặc khó thay đổi trong thiết kế thí nghiệm bề mặt đáp ứng [112].

3.5.2. Thiết kế bề mặt đáp ứng có phân khối

Để đáp ứng cấu trúc yếu tố hỗn hợp nêu trên, một thiết kế bề mặt đáp ứng có phân khối đã được áp dụng, trong đó mỗi mức kích thước hạt nano xác định một khối thí nghiệm độc lập. Trong từng khối, tất cả các thí nghiệm được tiến hành với Sn cố định, cho phép đánh giá ảnh hưởng của các biến công nghệ liên tục (V, F, D) không bị nhiễu bởi sự khác biệt hệ thống giữa các mức kích thước hạt nano. Cách bố trí phân khối này được Lawson trình bày như một chiến lược phù hợp khi các đơn vị thí nghiệm không đồng nhất hoặc khi tồn tại các yếu tố phân loại [112].

Trong mỗi khối Sn, bố trí thí nghiệm cho ba biến liên tục (V, F, D) được xây dựng dựa trên thiết kế Box-Behnken (BBD) ba yếu tố, ba mức. Theo [112], một thiết kế BBD ba yếu tố bao gồm mười hai điểm trung tâm cạnh, nằm tại trung điểm các cạnh của không gian thiết kế hình lập phương, cùng với các điểm tâm được lặp, cho phép xây dựng mô hình bề mặt đáp ứng bậc hai tổng quát đồng thời tránh các tổ hợp cực trị tại các đỉnh của miền thiết kế [112]. Theo đó, mỗi khối bao gồm 15 thí nghiệm, và toàn bộ thiết kế gồm 45 thí nghiệm tương ứng với ba mức kích thước hạt nano.

Nhằm tăng tính đại diện của miền thiết kế và cải thiện mức độ bao phủ vùng biên, một số điều chỉnh có chủ đích ở mức nhỏ đã được thực hiện trong một khối thí nghiệm ($Sn = 50$ nm) bằng cách dịch chuyển hai điểm trung tâm cạnh được lựa chọn về gần biên của không gian thông số. Các điểm này vẫn thuộc nhóm điểm cạnh và không làm thay đổi tổng số thí nghiệm cũng như cấu trúc phân khối tổng thể. Theo Lawson, các thiết kế bề mặt đáp ứng chuẩn có thể được điều chỉnh hoặc bổ

sung khi cần thiết do các ràng buộc thực nghiệm, miễn là khả năng ước lượng các hệ số của mô hình bậc hai vẫn được bảo toàn [112]. Do đó, kế hoạch thí nghiệm trong nghiên cứu này có thể được xem là thiết kế BBD có phân khối và có điều chỉnh.

3.5.3. Đường kính dao phay như một biến rời rạc và chiến lược thu thập dữ liệu

Đường kính dao phay được xem là một biến đầu vào rời rạc, chỉ nhận ba giá trị xác định là Ø6mm, Ø9mm và Ø12mm, tương ứng với các kích thước dao phay ngón sử dụng trong nghiên cứu. Dao được sử dụng là dao phay ngón hợp kim cứng phủ nano-composite, do hãng MOLDINO Tool Engineering, Ltd. (Nhật Bản) sản xuất.

Mặc dù là một biến đầu vào, đường kính dao không được tích hợp trực tiếp vào ma trận thiết kế thí nghiệm đa yếu tố cùng với các biến V, F, D, Sn. Việc này nhằm tránh làm gia tăng đáng kể số lượng thí nghiệm, đồng thời đơn giản hóa quá trình phân tích và so sánh dữ liệu. Thay vào đó, toàn bộ thiết kế thí nghiệm với bốn biến đầu vào (V, F, D, Sn) được thực hiện độc lập cho từng giá trị đường kính dao, với các mức lượng chạy dao trên răng và chiều sâu cắt được lựa chọn riêng cho từng đường kính dao nhằm phù hợp với khả năng chịu tải của dao (Bảng 3.5).

Theo cách tiếp cận này, mỗi đường kính dao phay tương ứng với một bộ dữ liệu thực nghiệm riêng biệt, trong đó 45 thí nghiệm (theo thiết kế BBD có phân khối đã nêu) được tiến hành cho mỗi bộ. Như vậy, tổng cộng thu được ba bộ dữ liệu độc lập, mỗi bộ gồm 45 cặp dữ liệu đầu vào-đầu ra. Cách bố trí này cho phép xây dựng mô hình và phân tích riêng cho từng đường kính dao, từ đó đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ trong điều kiện hình học dao cố định. Trên cơ sở đó, so sánh giữa các đường kính dao được thực hiện nhằm lựa chọn cấu hình dao và chế độ gia công tối ưu. Ngoài ra, trong các phân tích mở rộng, ba bộ dữ liệu có thể được gộp lại thành một tập dữ liệu chung gồm 135 cặp quan sát, cho phép xem xét ảnh hưởng của đường kính dao như một biến rời rạc hoặc biến phân nhóm trong các phương pháp phân tích và mô hình hóa nâng cao.

3.5.4. Lặp thí nghiệm và xử lý dữ liệu đầu ra

Trong mỗi khối kích thước hạt nano, điểm tâm của thiết kế đối với dao Ø6 mm ($V = 125$ m/phút, $F = 0.03$ mm/răng và $D = 0.1$ mm) được lặp lại ba lần, dẫn đến tổng cộng chín điểm tâm cho mỗi đường kính dao trong toàn bộ thiết kế. Các điểm tâm này cho phép ước lượng sai số thực nghiệm thuần và thực hiện kiểm định độ phù hợp (lack-of-fit) của mô hình bề mặt đáp ứng bậc hai, đúng theo khuyến nghị của phương pháp bề mặt đáp ứng [112].

Ngoài ra, mỗi thí nghiệm (run) trong ma trận DOE được tiến hành lặp lại ba lần dưới cùng điều kiện công nghệ. Các đại lượng đầu ra, bao gồm độ nhám bề mặt

(Ra), tốc độ bóc tách vật liệu (MRR) và lực cắt tổng hợp (F), được xác định bằng giá trị trung bình của ba lần đo tương ứng, nhằm giảm ảnh hưởng của nhiễu ngẫu nhiên và nâng cao độ tin cậy của dữ liệu thực nghiệm.

Ma trận thiết kế thí nghiệm thu được, bao gồm phân loại từng thí nghiệm theo dạng điểm trung tâm cạnh, điểm tâm hoặc điểm điều chỉnh, được trình bày trong Bảng 3.4.

Bảng 3.4. Ma trận thiết kế thí nghiệm (DOE) cho nghiên cứu phay cứng dựa trên BBD có phân khối, bao gồm các mức của yếu tố và phân loại điểm (biên-tâm, tâm và điểm điều chỉnh).

Run	Block	Sn_nm	RunInBlock	V	F	D	xV	xF	xD	PointType
1	1	20	8	150	0.03	0.12	1	0	1	edge
2	3	100	2	150	0.02	0.1	1	-1	0	edge
3	3	100	13	125	0.03	0.1	0	0	0	center
4	2	50	6	150	0.03	0.08	1	0	-1	edge
5	2	50	4	150	0.04	0.1	1	1	0	edge
6	1	20	7	100	0.03	0.12	-1	0	1	edge
7	3	100	14	125	0.03	0.1	0	0	0	center
8	3	100	1	100	0.02	0.1	-1	-1	0	edge
9	3	100	6	150	0.03	0.08	1	0	-1	edge
10	3	100	8	150	0.03	0.12	1	0	1	edge
11	2	50	13	125	0.03	0.1	0	0	0	center
12	1	20	5	100	0.03	0.08	-1	0	-1	edge
13	2	50	2	150	0.02	0.1	1	-1	0	edge
14	3	100	15	125	0.03	0.1	0	0	0	center
15	1	20	13	125	0.03	0.1	0	0	0	center
16	2	50	10	125	0.04	0.08	0	1	-1	edge
17	1	20	1	100	0.02	0.1	-1	-1	0	edge
18	1	20	6	150	0.03	0.08	1	0	-1	edge
19	3	100	12	125	0.04	0.12	0	1	1	edge
20	3	100	3	100	0.04	0.1	-1	1	0	edge
21	2	50	14	125	0.03	0.1	0	0	0	center
22	1	20	4	150	0.04	0.1	1	1	0	edge
23	1	20	12	125	0.04	0.12	0	1	1	edge
24	2	50	7	100	0.03	0.12	-1	0	1	edge
25	1	20	10	125	0.04	0.08	0	1	-1	edge
26	3	100	9	125	0.02	0.08	0	-1	-1	edge
27	3	100	11	125	0.02	0.12	0	-1	1	edge
28	2	50	1	100	0.02	0.1	-1	-1	0	edge

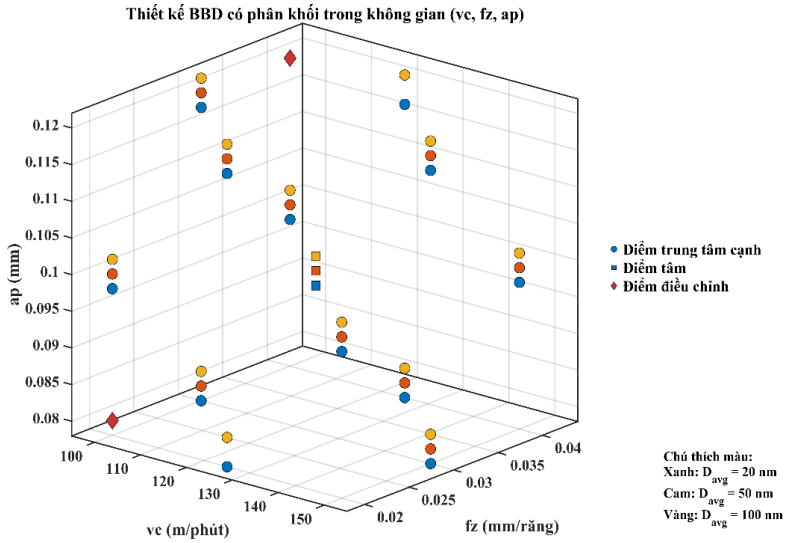
Run	Block	Sn_nm	RunInBlock	V	F	D	xV	xF	xD	PointType
29	1	20	9	125	0.02	0.08	0	-1	-1	edge
30	2	50	11	125	0.02	0.12	0	-1	1	edge
31	3	100	5	100	0.03	0.08	-1	0	-1	edge
32	3	100	7	100	0.03	0.12	-1	0	1	edge
33	2	50	8	150	0.03	0.12	1	0	1	edge
34	2	50	15	125	0.03	0.1	0	0	0	center
35	1	20	14	125	0.03	0.1	0	0	0	center
36	3	100	4	150	0.04	0.1	1	1	0	edge
37	3	100	10	125	0.04	0.08	0	1	-1	edge
38	2	50	5	100	0.03	0.08	-1	0	-1	edge
39	2	50	3	100	0.04	0.1	-1	1	0	edge
40	1	20	3	100	0.04	0.1	-1	1	0	edge
41	1	20	11	125	0.02	0.12	0	-1	1	edge
42	1	20	15	125	0.03	0.1	0	0	0	center
43	1	20	2	150	0.02	0.1	1	-1	0	edge
44	2	50	9	100	0.02	0.08	-1	-1	-1	modified
45	2	50	12	100	0.04	0.12	-1	1	1	modified

Ghi chú: *Trong thiết kế thí nghiệm và bảng 3, Sn là ký hiệu của D_{avg}; V là ký hiệu của v_c; F là ký hiệu của f_z* và D là ký hiệu của a_p. Các giá trị thực của F và D trong bảng ứng với dao Ø6 mm; với dao Ø9 mm và Ø12 mm, giá trị thực tương ứng với các mức mã hóa −1, 0, +1 được cho trong Bảng 3.5.

Hình 3.5 trình bày biểu diễn hình học của thiết kế Box-Behnken có phân khối trong không gian ba chiều (v_c, f_z, a_p). Các điểm thí nghiệm được phân bố theo cấu trúc đặc trưng của thiết kế BBD ba yếu tố, bao gồm các điểm trung tâm cạnh (ký hiệu hình tròn), nằm tại trung điểm các cạnh của khối lập phương thiết kế, và các điểm tâm (ký hiệu hình vuông) tại vị trí trung tâm của miền khảo sát. Hình 3.5 minh họa miền thiết kế của dao Ø6 mm ($0.02 \leq$ fz ≤ 0.04 mm/răng; $0.08 \leq$ ap ≤ 0.12 mm); với dao Ø9 mm và Ø12 mm, cấu trúc thiết kế tương tự được áp dụng với các mức fz, ap theo Bảng 3.5.

Các màu sắc khác nhau biểu thị các mức của yếu tố phân loại D_{avg}, cho thấy rõ cấu trúc phân khối của thiết kế khi mỗi mức kích thước hạt nano tương ứng với một tập hợp điểm thí nghiệm có cùng phân bố hình học trong không gian tham số. Ngoài ra, hai điểm điều chỉnh (modified points), được biểu diễn bằng ký hiệu hình thoi, phản ánh sự điều chỉnh cục bộ của thiết kế trong khối $D_{avg} = 50$ nm nhằm cải thiện khả năng bao phủ vùng biên mà vẫn bảo toàn cấu trúc tổng thể của thiết kế BBD.

Do các khối có cùng tọa độ hình học trong không gian (v_c, f_z, a_p), một độ lệch nhỏ theo trục a_p đã được áp dụng nhằm tách các điểm bị chồng lấn, giúp tăng tính trực quan của hình vẽ mà không làm thay đổi bản chất của thiết kế thí nghiệm.



Hình 3.5. *Biểu diễn hình học của thiết kế BBD có phân khối trong không gian (v_c, f_z, a_p); màu sắc biểu thị các mức D_{avg}, còn ký hiệu biểu thị loại điểm thí nghiệm (trung tâm cạnh, tâm và điều chỉnh) ; minh họa cho dao phay Ø6 mm.*

3.5.5. Ảnh hưởng theo đường kính dao:

Trong nghiên cứu này, đường kính dao phay được xem như một biến đầu vào rời rạc, chỉ nhận ba giá trị xác định là 6 mm, 9 mm và 12 mm. Để đơn giản hóa việc tổ chức thí nghiệm, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho việc phân tích, mô hình hóa và so sánh kết quả, toàn bộ thiết kế thí nghiệm đã xây dựng với bốn biến đầu vào(v_c, f_z, a_p, D_{avg}) được thực hiện riêng biệt cho từng đường kính dao, với các mức lượng chạy dao trên răng và chiều sâu cắt riêng cho từng đường kính dao (Bảng 3.5).

Theo cách tiếp cận này, ứng với mỗi đường kính dao (ϕ6, ϕ9 và ϕ12 mm) thu được một bộ dữ liệu thực nghiệm riêng, trong đó mỗi bộ gồm 45 thí nghiệm theo ma trận thiết kế Box-Behnken có phân khối đã xây dựng. Như vậy, với ba đường kính dao, nghiên cứu thu được ba bộ dữ liệu độc lập, tương ứng với tổng cộng 135 thí nghiệm.

Do khả năng chịu tải của dao phay tăng theo đường kính, các mức lượng chạy dao trên răng fz và chiều sâu cắt ap được lựa chọn riêng cho từng đường kính dao, trong khi tốc độ cắt vc được giữ chung ở ba mức 100, 125 và 150 m/phút. Các mức thông số công nghệ thực tế của ba bộ dữ liệu được trình bày trong Bảng 3.5. Như vậy, khi gộp ba bộ dữ liệu, toàn bộ 135 thí nghiệm có $0.02 \leq fz \leq 0.08$ mm/răng và $0.08 \leq ap \leq 0.25$ mm; tuy nhiên, miền thí nghiệm của mỗi đường kính dao chỉ giới

hạn trong các mức tương ứng ở Bảng 3.5. Các mức mã hóa −1, 0, +1 trong Bảng 3.4 được hiểu theo giá trị thực của từng đường kính dao.

Bảng 3.5. Các mức thông số công nghệ theo đường kính dao phay

Dt (mm)	vc (m/phút)	fz (mm/răng)	ap (mm)
6	100 – 125 – 150	0.02 – 0.03 – 0.04	0.08 – 0.10 – 0.12
9	100 – 125 – 150	0.04 – 0.05 – 0.06	0.10 – 0.15 – 0.20
12	100 – 125 – 150	0.04 – 0.06 – 0.08	0.15 – 0.20 – 0.25

Cách tổ chức này cho phép, trước hết, phân tích và xây dựng mô hình riêng cho từng đường kính dao, từ đó đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ trong điều kiện hình học dao cố định và xác định bộ thông số tối ưu tương ứng với từng đường kính. Trên cơ sở các kết quả tối ưu riêng rẽ, có thể so sánh giữa ba đường kính dao để lựa chọn cấu hình dao phù hợp nhất. Đồng thời, trong các phân tích mở rộng, ba bộ dữ liệu này cũng có thể được gộp lại thành một tập dữ liệu chung gồm 135 quan sát (sẽ làm trong chương 4), cho phép xem xét ảnh hưởng tổng hợp của đường kính dao như một biến rời rạc/phân nhóm trong các phương pháp mô hình hóa và tối ưu hóa nâng cao.

3.6. Phương pháp đo và xác định đại lượng đầu ra

Trong nghiên cứu này, các đại lượng đầu ra chính của quá trình phay cứng bao gồm độ nhám bề mặt (Ra), lực cắt (F) và tốc độ bóc tách vật liệu (MRR). Các đại lượng này được lựa chọn nhằm đánh giá toàn diện chất lượng bề mặt, trạng thái tải trọng cơ học và năng suất của quá trình gia công. Phương pháp đo và xác định các đại lượng được thực hiện như sau:

3.6.1. Đo độ nhám bề mặt (Ra)

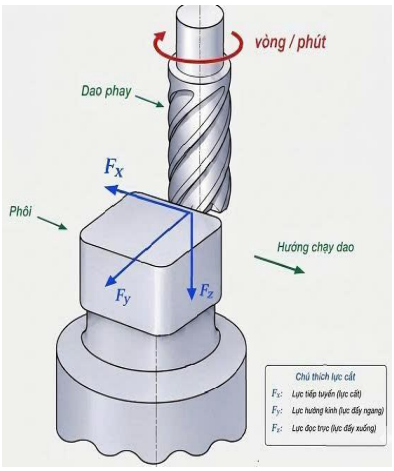
Độ nhám bề mặt (Ra) được đo bằng máy đo nhám dạng tiếp xúc Mitutoyo SJ-210. Phép đo được thực hiện theo phương dọc trục, tương ứng với đường sinh của bề mặt trụ gia công, nhằm phản ánh chính xác đặc trưng hình học của bề mặt sau khi phay.

Để đảm bảo độ tin cậy của kết quả, mỗi mẫu được đo tại ba vị trí khác nhau trên bề mặt gia công. Giá trị độ nhám Ra cuối cùng được xác định là giá trị trung bình của các lần đo này và được sử dụng làm đại diện cho mỗi điều kiện thí nghiệm.

3.6.2. Đo lực cắt (F)

Lực cắt được đo theo thời gian thực bằng cảm biến lực ba thành phần Kistler 9257BA, ghi nhận ba thành phần lực trực giao F_x, F_y, F_z. Hình 3.6 biểu diễn phương chiều các lực cắt thành phần để xác định lực cắt tổng hợp F - được tính theo công thức sau:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \qquad (3.1)$$



Hình 3.6: *Sơ đồ xác định lực cắt tổng hợp F từ các lực cắt thành phần*

3.6.3. Xác định tốc độ bóc tách vật liệu (MRR)

Tốc độ bóc tách vật liệu (MRR) được sử dụng để đánh giá năng suất của quá trình gia công. Trong nghiên cứu này, MRR được xác định theo phương pháp khối lượng, dựa trên sự chênh lệch khối lượng của phôi trước và sau gia công. Khối lượng phôi được đo bằng cân điện tử WT3003NE với độ chính xác cao. Giá trị MRR được tính theo công thức:

$$MRR = \frac{m_1 - m_2}{t} \quad (3.2)$$

Trong đó, $m_1$là khối lượng phôi trước gia công (g); m_2 là khối lượng phôi sau gia công (g) và t là thời gian gia công (phút).

Để giảm sai số các phôi được làm sạch và sấy khô trước khi cân và mỗi phép đo được thực hiện ba lần và lấy giá trị trung bình.

Kết luận chương 3

- Đã trình bày một cách hệ thống về hệ thống thí nghiệm và các điều kiện nghiên cứu được sử dụng trong luận án. Trước hết, tổng quan hệ thống thí nghiệm đã được giới thiệu nhằm làm rõ cấu trúc và nguyên lý vận hành của toàn bộ quá trình thực nghiệm. Các thiết bị gia công và hệ thống đo lường, bao gồm trung tâm phay CNC, hệ thống đo lực và thiết bị đo khối lượng, đã được mô tả chi tiết, đảm bảo khả năng thực hiện thí nghiệm với độ chính xác và độ tin cậy cao.

- Đã phân tịc và lựa chọn điều kiện bôi trơn - làm mát và các thông số thí nghiệm đã được xác định rõ, trong đó hệ thống nano-MQL sử dụng hạt CuO được lựa chọn nhằm cải thiện điều kiện cắt trong quá trình phay cứng. Vật liệu thí nghiệm là thép 90CrSi đã qua nhiệt luyện cũng được trình bày đầy đủ về đặc tính và điều kiện gia công, làm cơ sở cho việc phân tích kết quả thực nghiệm.

- Đã lựa chọn phương pháp thiết kế thí nghiệm dựa trên thiết kế bề mặt đáp ứng dạng Box-Behnken có phân khối đã được xây dựng nhằm khảo sát hiệu quả ảnh hưởng của các thông số công nghệ, đồng thời xử lý hợp lý sự tồn tại của các yếu tố

phân loại trong nghiên cứu. Cách tiếp cận này cho phép đảm bảo số lượng thí nghiệm hợp lý, đồng thời nâng cao độ tin cậy của mô hình thực nghiệm.

- Đã phân tích và lựa chọn các phương pháp đo và xác định các đại lượng đầu ra, bao gồm độ nhám bề mặt, lực cắt và tốc độ bóc tách vật liệu, đã được trình bày cụ thể với các thiết bị đo phù hợp và quy trình xử lý dữ liệu đảm bảo tính chính xác và khả năng tái lập.

- Các nội dung trong chương này đã xây dựng đầy đủ cơ sở thực nghiệm cho nghiên cứu, làm tiền đề cho việc phân tích kết quả, xây dựng mô hình dự đoán và thực hiện tối ưu hóa trong các chương tiếp theo của luận án.

CHƯƠNG 4
KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ MÔ HÌNH HÓA QUÁ TRÌNH PHAY CỨNG BỀ MẶT TRỤ NGOÀI THÉP 90CrSi DƯỚI ĐIỀU KIỆN NANO-MQL SỬ DỤNG HẠT CuO

Mục tiêu chương 4:

-Mục tiêu chính của chương là phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến các đại lượng đầu ra và phát triển các mô hình có khả năng dự đoán chính xác phục vụ cho bài toán tối ưu hóa ở chương tiếp theo.

- Nội dung chương trước hết trình bày kết quả thực nghiệm và phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến các chỉ tiêu đầu ra, bao gồm độ nhám bề mặt, lực cắt và tốc độ bóc tách vật liệu. Tiếp theo, phương pháp mô hình hóa RSM được áp dụng, nhằm thiết lập mối quan hệ giữa các biến đầu vào và đầu ra của quá trình. Độ chính xác của các mô hình được đánh giá thông qua các chỉ tiêu thống kê và so sánh giữa các phương pháp.

- Thảo luận các kết quả đạt được, làm rõ vai trò của công nghệ nano-MQL sử dụng hạt CuO đối với quá trình phay cứng, đồng thời xác định cơ sở dữ liệu và mô hình cần thiết cho bài toán tối ưu hóa trong Chương 5.

4.1. Kết quả thực nghiệm

Thí nghiệm phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi dưới điều kiện bôi trơn - làm mát nano-MQL sử dụng hạt CuO được thực hiện thí nghiệm với setup mô tả trong mục 3.4 và thiết kế nêu trong mục 3.5. Các thông số đầu vào gồm có tốc độ cắt v_c, lượng chạy dao trên răng f_z và chiều sâu cắt a_p và kích thước hạt nano D_{avg} và ba đại lượng đầu ra gồm độ nhám bề mặt Ra, tốc độ bóc tách MRR và lực cắt tổng hợp F.

Các thí nghiệm được thực hiện theo thiết kế bề mặt đáp ứng dạng Box-Behnken có phân khối, với các yếu tố đầu vào bao gồm các thông số chế độ cắt và kích thước hạt nano (xem mục 3.5). Quá trình thực nghiệm được tiến hành tương ứng với ba đường kính dao phay ngón khác nhau là ϕ6, ϕ9 và ϕ12 mm.

Để phục vụ cho các bước phân tích và mô hình hóa, dữ liệu thực nghiệm được tổ chức theo hai dạng. Thứ nhất, dữ liệu được phân tách theo từng đường kính dao nhằm phản ánh đầy đủ kết quả tương ứng với từng điều kiện hình học dụng cụ. Thứ hai, một bộ dữ liệu tổng hợp được xây dựng bằng cách gộp toàn bộ các thí nghiệm từ ba đường kính dao, tạo thành tập dữ liệu đầy đủ bao phủ miền thiết kế nghiên cứu.

Các kết quả thực nghiệm thu được thể hiện đầy đủ các tổ hợp của các yếu tố đầu vào theo ma trận thiết kế thí nghiệm, đảm bảo tính bao phủ của không gian khảo sát. Các giá trị của các đại lượng đầu ra được xác định thông qua các phương pháp đo đã trình bày ở mục 3.6, với quy trình đo lặp và xử lý số liệu nhằm đảm bảo độ tin cậy và khả năng tái lập của dữ liệu.

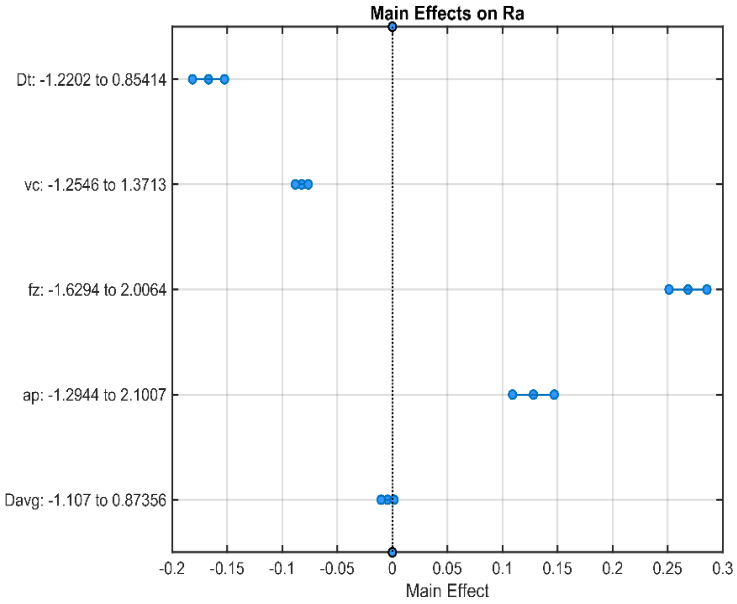
Sau khi tiến hành thí nghiệm, toàn bộ dữ liệu thí nghiệm, bao gồm các thông số đầu vào và các kết quả thu được của các đại lượng đầu ra (Ra, MRR và F) của thí nghiệm phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi dưới điều kiện bôi trơn - làm mát nano-MQL sử dụng hạt CuO đã được tổng hợp và cho trong Phụ lục 1 của luận án. Bộ dữ liệu thực nghiệm thu được là cơ sở quan trọng cho các bước phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ, xây dựng mô hình dự đoán và thực hiện tối ưu hóa trong các mục tiếp theo của chương này.

4.2. Phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ

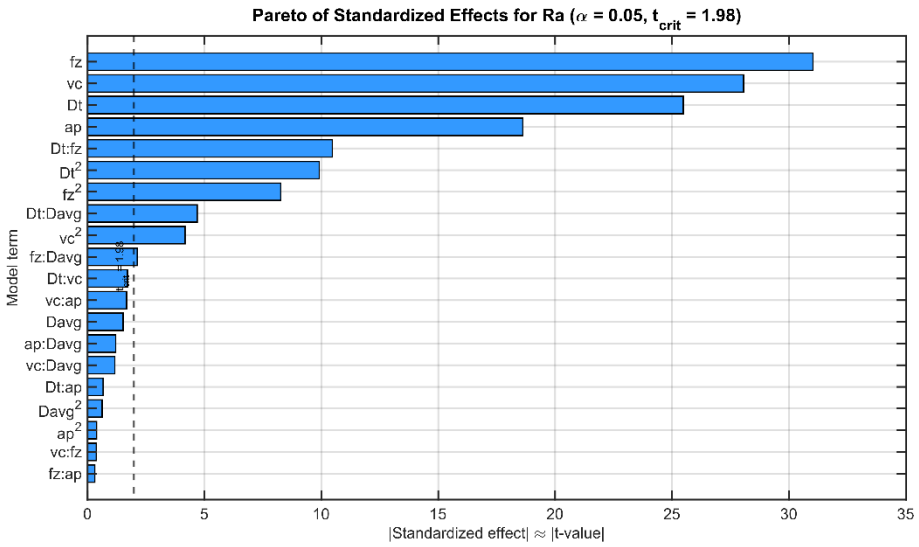
4.2.1. Ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt (Ra)

Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt (Ra) được phân tích thông qua các công cụ trực quan và định lượng bao gồm biểu đồ hiệu ứng chính, biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa, biểu đồ hệ số hồi quy chuẩn hóa và đồ thị đường đồng mức. Các kết quả này cho phép đánh giá toàn diện cả về xu hướng biến thiên, mức độ ảnh hưởng và ý nghĩa thống kê của các yếu tố trong miền khảo sát.

Trước hết, biểu đồ hiệu ứng chính (Hình 4.1) cho thấy độ nhám bề mặt chịu ảnh hưởng rõ rệt bởi các thông số chế độ cắt. Trong đó, lượng chạy dao trên răng f_z là yếu tố có ảnh hưởng mạnh nhất, thể hiện qua độ dốc lớn nhất của đường biểu diễn. Khi f_z tăng, Ra tăng đáng kể, phản ánh trực tiếp cơ chế hình thành nhấp nhô bề mặt khi lượng vật liệu cắt trên mỗi răng tăng lên. Chiều sâu cắt a_p cũng có ảnh hưởng đáng kể theo xu hướng làm tăng Ra khi tăng giá trị. Ngược lại, tốc độ cắt v_c có xu hướng làm giảm nhẹ độ nhám bề mặt, trong khi đường kính dao D_t thể hiện xu hướng cải thiện chất lượng bề mặt khi tăng kích thước. Ảnh hưởng của kích thước hạt nano D_{avg} là không đáng kể khi xét riêng lẻ.



Hình 4.1. *Biểu đồ hiệu ứng chính của các thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt (Ra)*



Hình 4.2. *Biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa (standardized effects) của mô hình RSM cho Ra*

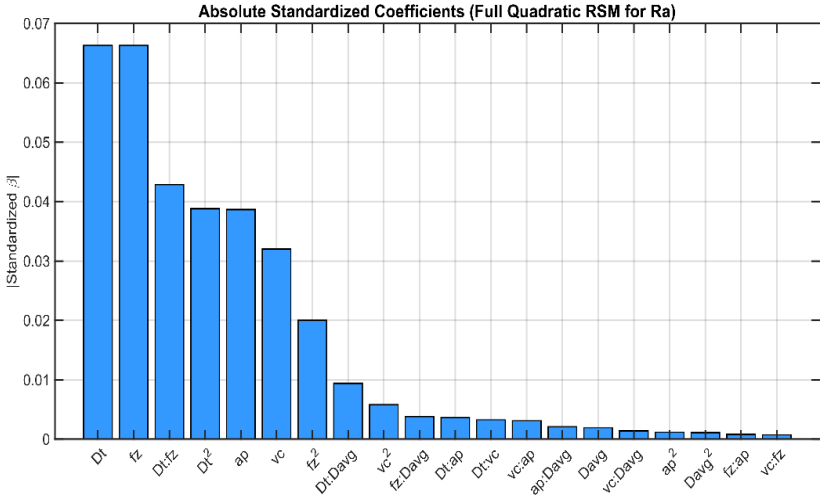
Để đánh giá ý nghĩa thống kê của các yếu tố, biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa (Hình 4.2) được sử dụng. Biểu đồ này được xây dựng dựa trên giá trị tuyệt đối của các hiệu ứng chuẩn hóa, tương đương với thống kê t, và được so sánh với ngưỡng ý nghĩa thống kê tại mức tin cậy 95% ($t_{crit} \approx 1.98$).

Kết quả cho thấy các yếu tố f_z, v_c, D_t và a_p đều vượt qua ngưỡng này, chứng tỏ chúng có ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê đến độ nhám bề mặt. Trong đó, f_z là yếu tố chi phối mạnh nhất. Ngoài ra, nhiều hạng tử tương tác và phi tuyến cũng vượt qua ngưỡng ý nghĩa thống kê, bao gồm $D_t \cdot f_z$, D_t^2, f_z^2, $D_t \cdot D_{avg}$ và $f_z \cdot D_{avg}$.

Sự xuất hiện đồng thời của các tương tác $D_t \cdot D_{avg}$và $f_z \cdot D_{avg}$ cho thấy ảnh hưởng của kích thước hạt nano đến độ nhám bề mặt không mang tính độc lập, mà phụ thuộc mạnh vào điều kiện gia công, đặc biệt là hình học dụng cụ và chế độ cắt. Cụ thể, tương tác $D_t \cdot D_{avg}$ phản ánh rằng hiệu quả của hạt nano thay đổi theo đường kính dao, trong khi $f_z \cdot D_{avg}$ cho thấy vai trò của nano bị chi phối bởi lượng chạy dao trên răng. Điều này chứng tỏ cơ chế tác động của nano-MQL đến chất lượng bề mặt là phức tạp và phụ thuộc vào sự kết hợp của nhiều yếu tố công nghệ.

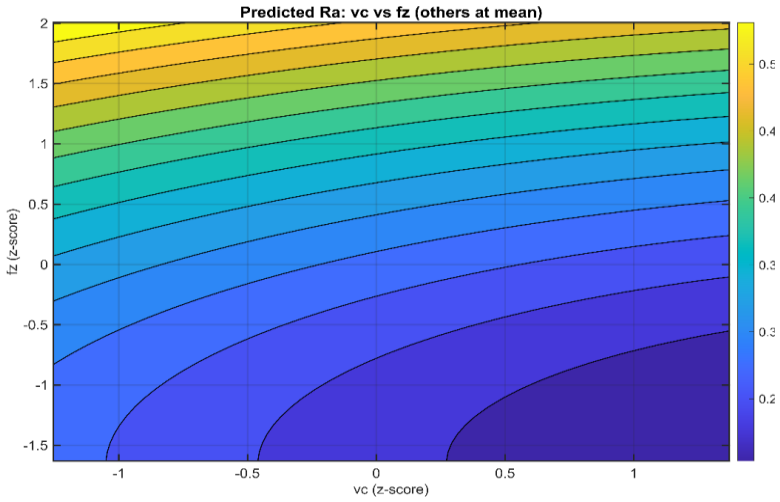
Song song với đó, để đánh giá mức độ ảnh hưởng tương đối giữa các yếu tố, biểu đồ giá trị tuyệt đối của các hệ số hồi quy chuẩn hóa (|β|) được trình bày trong Hình 4.3. Khác với biểu đồ Pareto, biểu đồ này không phản ánh ý nghĩa thống kê mà cho phép so sánh trực tiếp cường độ ảnh hưởng của các biến trên cùng một thang đo không thứ nguyên. Kết quả cho thấy D_t và f_z là hai yếu tố có giá trị |β| lớn nhất và gần tương đương nhau, tiếp theo là các hạng tử tương tác như $D_t \cdot f_z$và thành phần bậc hai D_t^2. Điều này cho thấy ngoài ảnh hưởng mạnh của f_z, yếu tố hình học dụng cụ D_tcũng đóng vai trò rất quan trọng trong việc quyết định độ nhám

bề mặt. Các yếu tố như v_c và a_p có ảnh hưởng ở mức trung bình, trong khi các hạng tử liên quan đến D_{avg} có giá trị |β| rất nhỏ, khẳng định vai trò hạn chế của yếu tố nano khi xét riêng lẻ.



Hình 4.3. *Biểu đồ mô tả giá trị tuyệt đối của các hệ số hồi quy chuẩn hóa (|β|) của mô hình RSM bậc hai cho Ra*

Ảnh hưởng kết hợp của các thông số công nghệ được thể hiện rõ hơn qua đồ thị đường đồng mức (Hình 4.4). Hình 4.4 cho thấy sự biến thiên của Ra theo $v_c$và f_z khi các yếu tố khác giữ ở giá trị trung bình. Các đường đồng mức gần như song song theo phương v_c, trong khi biến thiên mạnh theo phương f_z, cho thấy $f_z$là yếu tố chi phối chính trong cặp biến này. Sự cong nhẹ của các đường đồng mức phản ánh sự tồn tại của tương tác và phi tuyến giữa các biến.



Hình 4.4. *Đồ thị đường đồng mức của Ra theo v_c và f_z*

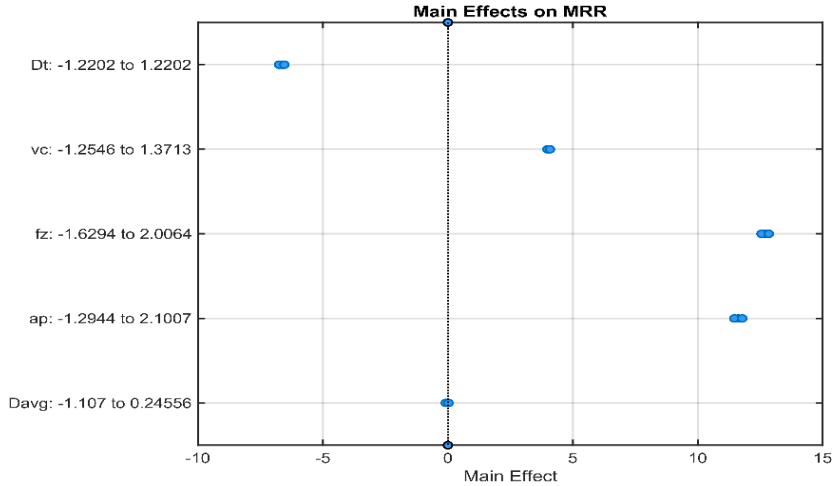
Tổng hợp các kết quả phân tích cho thấy độ nhám bề mặt trong quá trình phay cứng chịu ảnh hưởng chủ yếu bởi lượng chạy dao trên răng và đường kính dao, tiếp theo là chiều sâu cắt và tốc độ cắt. Sự tồn tại của các hạng tử tương tác và bậc hai với ý nghĩa thống kê cao khẳng định rằng mối quan hệ giữa các thông số công nghệ và Ra là phi tuyến và đa biến, do đó cần sử dụng mô hình hồi quy bậc hai

để mô tả chính xác hành vi của quá trình. Ngoài ra, ảnh hưởng hạn chế của kích thước hạt nano cho thấy yếu tố này chủ yếu đóng vai trò hỗ trợ thông qua cơ chế bôi trơn và không phải là yếu tố chi phối trực tiếp đến độ nhám bề mặt.

4.2.2. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến năng suất bóc tách (MRR)

Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến MRR được phân tích thông qua các công cụ trực quan và định lượng gồm biểu đồ hiệu ứng chính, biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa, biểu đồ giá trị tuyệt đối của các hệ số hồi quy chuẩn hóa và đồ thị đường đồng mức. Các kết quả này cho phép đánh giá đồng thời xu hướng biến thiên, mức độ ảnh hưởng tương đối và ý nghĩa thống kê của từng yếu tố trong miền khảo sát.

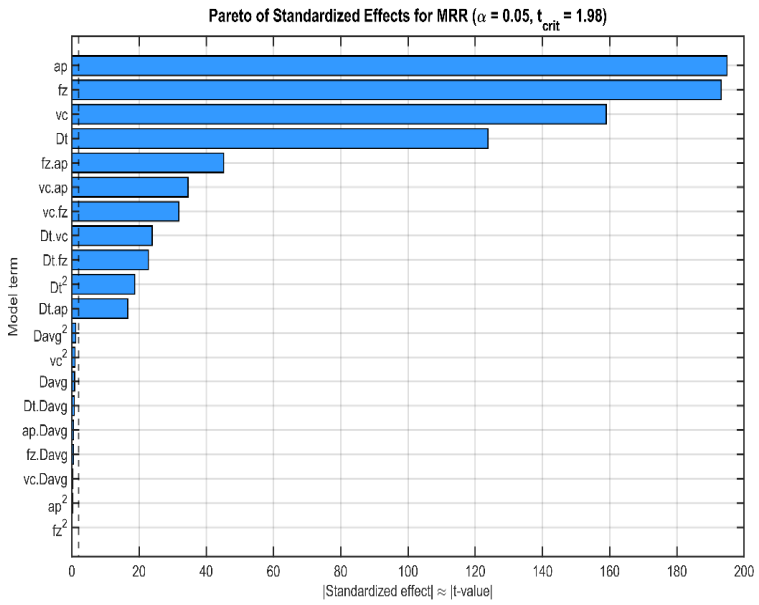
Trước hết, biểu đồ hiệu ứng chính trong Hình 4.5 cho thấy MRR chịu ảnh hưởng rất mạnh bởi các thông số chế độ cắt, đặc biệt là lượng chạy dao trên răng f_z và chiều sâu cắt a_p. Khi f_z tăng, MRR tăng rõ rệt với độ dốc lớn nhất trong số các yếu tố khảo sát, phản ánh trực tiếp bản chất vật lý của quá trình bóc tách: lượng vật liệu cắt bởi mỗi răng tăng sẽ làm tăng nhanh thể tích vật liệu được lấy đi trong một đơn vị thời gian. Tương tự, a_p cũng làm MRR tăng mạnh do chiều sâu lớp vật liệu tham gia cắt tăng lên, dẫn đến tiết diện lớp cắt lớn hơn. Tốc độ cắt v_c có ảnh hưởng dương rõ rệt nhưng thấp hơn f_z và a_p, trong khi đường kính dao D_t có xu hướng làm giảm MRR khi tăng giá trị. Xu hướng này cho thấy trong miền khảo sát, việc tăng đường kính dao không trực tiếp làm tăng khả năng bóc tách mà còn có thể làm thay đổi điều kiện tiếp xúc cắt theo hướng bất lợi đối với năng suất thực tế. Ngược lại, kích thước hạt nano D_{avg} gần như không tạo ra biến thiên đáng kể đối với MRR khi xét như một hiệu ứng độc lập.



Hình 4.5. *Biểu đồ hiệu ứng chính của các thông số công nghệ đến năng suất bóc tách vật liệu (MRR)*

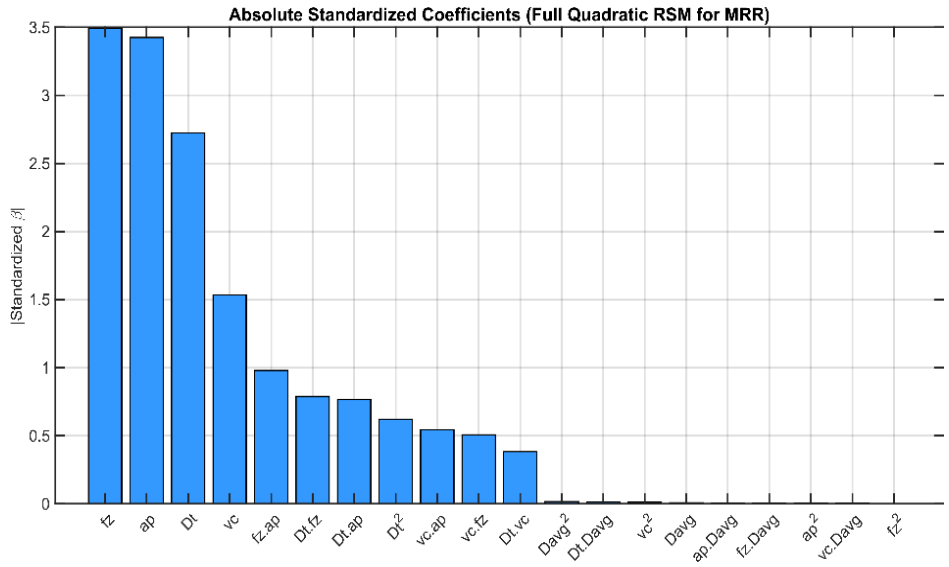
Để đánh giá ý nghĩa thống kê của các yếu tố, biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa được sử dụng như trong Hình 4.6. Biểu đồ này được xây dựng trên cơ sở giá trị tuyệt đối của các hiệu ứng chuẩn hóa, tương đương với thống kê t, và được so sánh với ngưỡng ý nghĩa thống kê ở mức tin cậy 95% ($t_{crit} \approx 1.98$). Kết quả cho thấy bốn hiệu ứng chính gồm a_p, f_z, $v_c$và D_t đều vượt xa ngưỡng ý nghĩa, trong đó a_p và f_z là hai yếu tố chi phối mạnh nhất, gần như tương đương nhau về cường độ tác động thống kê. Điều này cho thấy năng suất bóc tách trong quá trình phay cứng trước hết được quyết định bởi khả năng tăng lượng vật liệu bị cắt theo cả chiều dày phoi và chiều sâu cắt.

Một điểm đáng chú ý là các hạng tử tương tác $f_z.a_p$, $v_c.a_p$, $v_c.f_z$, $D_t.v_c$, $D_t.f_z$ và $D_t.a_p$ đều vượt ngưỡng ý nghĩa thống kê. Điều đó chứng tỏ MRR không chỉ phụ thuộc vào tác động riêng rẽ của từng thông số mà còn phụ thuộc mạnh vào sự kết hợp giữa chúng. Trong đó, tương tác $f_z.a_p$ có hiệu ứng lớn nhất trong nhóm tương tác, cho thấy khi đồng thời tăng lượng chạy dao trên răng và chiều sâu cắt, MRR tăng mạnh hơn đáng kể so với trường hợp chỉ tăng từng yếu tố riêng lẻ. Hai tương tác $v_c.a_p$ và $v_c.f_z$ cũng có ý nghĩa thống kê cao, chứng tỏ vai trò khuếch đại của tốc độ cắt đối với hiệu quả bóc tách khi kết hợp với các thông số tạo phoi chính. Ngoài ra, hạng tử bậc hai D_t^2 cũng vượt ngưỡng ý nghĩa, cho thấy ảnh hưởng của đường kính dao đến MRR là phi tuyến trong miền khảo sát. Trái lại, các hạng tử liên quan đến D_{avg} như $D_t.D_{avg}$, $f_z.D_{avg}$, $a_p.D_{avg}$, $v_c.D_{avg}$, cũng như các hạng tử f_z^2, a_p^2, v_c^2và D_{avg}^2, đều không vượt ngưỡng ý nghĩa. Kết quả này khẳng định rằng kích thước hạt nano không đóng vai trò chi phối đối với MRR trong phạm vi thí nghiệm, và tác động của nano-MQL đến năng suất bóc tách, nếu có, chỉ ở mức thứ yếu so với các thông số chế độ cắt.



Hình 4.6. *Biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa (standardized effects) của mô hình RSM cho MRR*

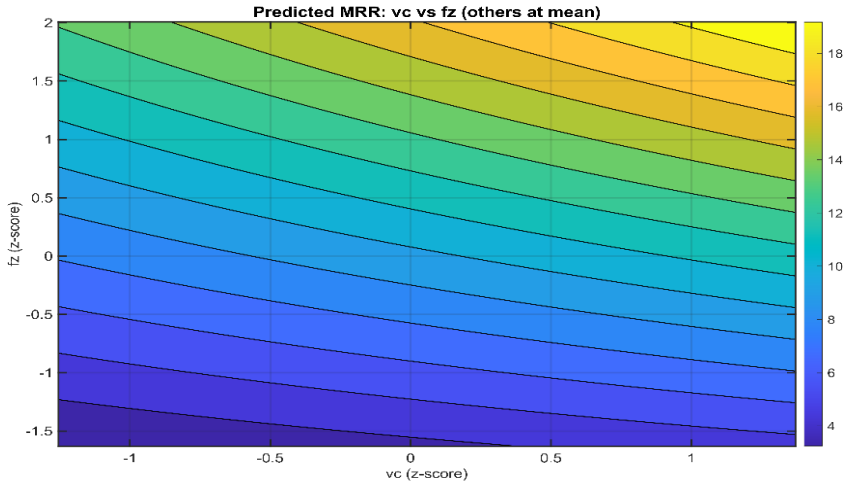
Để so sánh mức độ ảnh hưởng tương đối giữa các biến trên cùng một thang đo không thứ nguyên, biểu đồ giá trị tuyệt đối của các hệ số hồi quy chuẩn hóa ($|\beta|$)được trình bày trong Hình 4.7. Kết quả cho thấy f_z có giá trị $|\beta|$lớn nhất (3.4917), tiếp theo rất sát là a_p (3.4254), sau đó là D_t (2.7247)và v_c (1.5343). Thứ tự này phù hợp với xu hướng quan sát từ biểu đồ hiệu ứng chính và đồng thời khẳng định rằng trong miền khảo sát, MRR chịu chi phối chủ yếu bởi các thông số trực tiếp quyết định thể tích phoi hình thành. Trong nhóm tương tác, $f_z.a_p$ có $|\beta| = 0.9788$, lớn nhất trong các hạng tử bậc hai và tương tác, tiếp theo là $D_t.f_z$ (0.7877), $D_t.a_p$ (0.7661), D_t^2 (0.6201), $v_c.a_p$ (0.5446) và $v_c.f_z$ (0.5077). Các giá trị này cho thấy tính chất đa biến và tương tác mạnh của quá trình, đặc biệt khi các thông số tạo phoi chính tác động đồng thời. Ngược lại, tất cả các hạng tử liên quan đến D_{avg} đều có $|\beta|$ rất nhỏ, chẳng hạn $D_t.D_{avg} = 0.0122$, $D_{avg} = 0.0085$, $a_p.D_{avg} = 0.0073$, $f_z.D_{avg} = 0.0072$, cho thấy vai trò của kích thước hạt nano đối với MRR là không đáng kể nếu so với tác động của các biến chế độ cắt.



Hình 4.7. *Biểu đồ mô tả giá trị tuyệt đối của các hệ số hồi quy chuẩn hóa* ($|\beta|$) *của mô hình RSM bậc hai cho MRR*

Ảnh hưởng kết hợp của các thông số công nghệ đến MRR được thể hiện rõ hơn qua đồ thị đường đồng mức trong Hình 4.8. Khi các yếu tố khác được giữ tại giá trị trung bình, MRR tăng theo cả hai hướng tăng của $v_c$và f_z, trong đó sự biến thiên theo f_z mạnh hơn, thể hiện qua độ thay đổi màu sắc và khoảng cách giữa các đường đồng mức theo phương này. Vùng MRR thấp tập trung ở miền có f_z thấp và v_c thấp, trong khi vùng MRR cao xuất hiện khi đồng thời tăng cả hai thông số. Dạng gần như nghiêng đều của các đường đồng mức xác nhận xu hướng cộng

hưởng giữa v_c và f_z đối với MRR, hoàn toàn phù hợp với kết quả phân tích Pareto và $|\beta|$. Kết quả này cũng cho thấy nếu mục tiêu ưu tiên là nâng cao năng suất bóc tách, việc tăng f_z và v_c theo hướng phối hợp sẽ hiệu quả hơn so với thay đổi đơn lẻ từng tham số.



Hình 4.8. *Đồ thị đường đồng mức của MRR theo $v_c$và $f_z$khi các yếu tố khác giữ ở giá trị trung bình*

Tổng hợp các kết quả trên cho thấy năng suất bóc tách vật liệu trong quá trình phay cứng dưới điều kiện nano-MQL chịu chi phối chủ yếu bởi lượng chạy dao trên răng f_z, chiều sâu cắt a_p, tốc độ cắt v_c và đường kính dao D_t. Trong đó, f_z và a_p là hai yếu tố quyết định nhất, còn các tương tác giữa f_z, a_p, v_c và D_t giữ vai trò đặc biệt quan trọng trong việc khuếch đại hoặc điều chỉnh mức tăng MRR. Ngược lại, kích thước hạt nano không có ảnh hưởng đáng kể đến MRR trong miền khảo sát. Điều này hàm ý rằng, đối với mục tiêu nâng cao năng suất bóc tách, việc điều chỉnh tối ưu các thông số chế độ cắt có ý nghĩa quyết định hơn nhiều so với thay đổi kích thước hạt nano trong dung dịch nano-MQL.

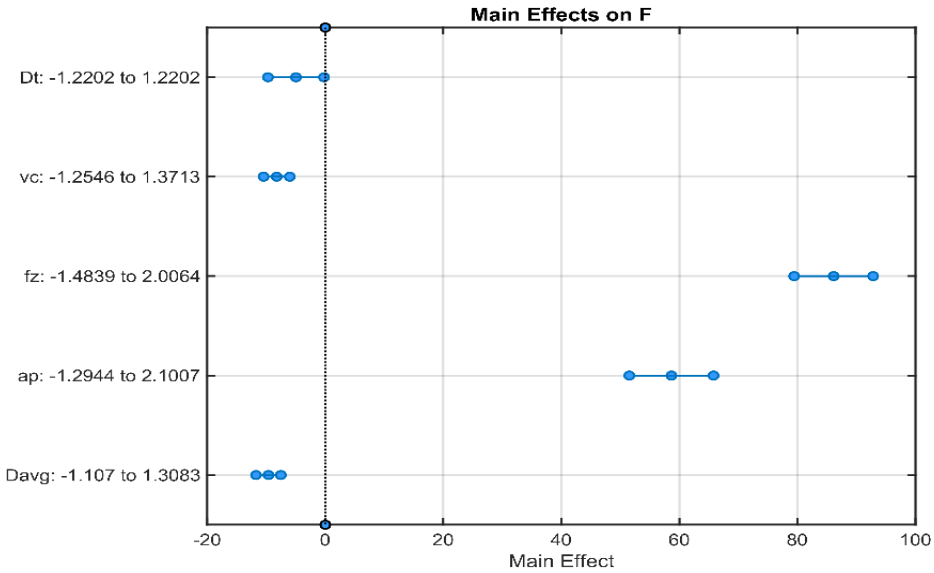
4.2.3. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến lực cắt (F)

Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến lực cắt F được phân tích thông qua các công cụ trực quan và định lượng gồm biểu đồ hiệu ứng chính, biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa, biểu đồ giá trị tuyệt đối của các hệ số hồi quy chuẩn hóa và đồ thị đường đồng mức. Cách tiếp cận này cho phép đánh giá đồng thời xu hướng biến thiên, mức độ ảnh hưởng tương đối và ý nghĩa thống kê của từng yếu tố trong miền khảo sát.

Trước hết, biểu đồ hiệu ứng chính trong Hình 4.9 cho thấy lực cắt chịu ảnh hưởng rất mạnh bởi lượng chạy dao trên răng f_z và chiều sâu cắt a_p. Khi f_z tăng, lực cắt tăng rõ rệt với độ dốc lớn nhất trong số các yếu tố khảo sát. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với cơ chế cắt gọt, bởi khi lượng chạy dao trên răng tăng, chiều dày phoi chưa cắt tăng lên, làm tăng đáng kể lực cần thiết để tách phoi khỏi bề mặt

gia công. Tương tự, khi a_p tăng, chiều sâu lớp vật liệu tham gia cắt tăng lên, dẫn đến tiết diện cắt lớn hơn và làm lực cắt tăng mạnh.

Ngược lại, tốc độ cắt v_c có xu hướng làm giảm lực cắt khi tăng giá trị. Đây là xu hướng thường gặp trong gia công cắt gọt, do ở tốc độ cắt cao hơn, vật liệu vùng cắt có thể bị suy giảm bền cục bộ bởi hiệu ứng nhiệt, đồng thời quá trình tạo phoi diễn ra thuận lợi hơn, từ đó làm giảm lực cắt trung bình. Đường kính dao D_t cũng cho thấy xu hướng làm giảm lực cắt khi tăng, mặc dù mức độ nhỏ hơn đáng kể so với f_z và a_p. Trong khi đó, kích thước hạt nano D_{avg} có xu hướng ảnh hưởng âm nhẹ đến lực cắt, phản ánh rằng việc tăng kích thước hạt nano trong miền khảo sát có thể góp phần cải thiện điều kiện bôi trơn - làm mát, qua đó làm giảm một phần lực cản trong vùng cắt. Tuy nhiên, mức độ biến thiên theo D_{avg} quan sát từ biểu đồ hiệu ứng chính vẫn nhỏ hơn nhiều so với hai thông số tạo phoi chính là f_z và a_p.

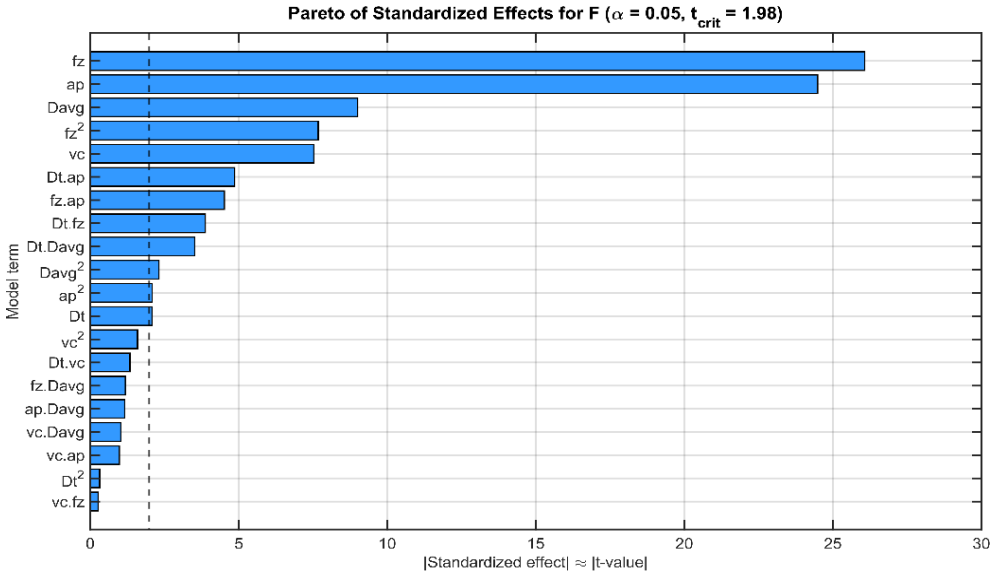


Hình 4.9. *Biểu đồ hiệu ứng chính của các thông số công nghệ đến lực cắt F*

Để đánh giá ý nghĩa thống kê của các yếu tố, biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa được trình bày trong Hình 4.10. Biểu đồ này được xây dựng trên cơ sở giá trị tuyệt đối của các hiệu ứng chuẩn hóa, tương đương với thống kê t, và được so sánh với ngưỡng ý nghĩa thống kê ở mức tin cậy 95% ($t_{crit} \approx 1.98$). Kết quả cho thấy các hiệu ứng chính $f_z$và a_pvượt xa ngưỡng ý nghĩa, khẳng định đây là hai yếu tố chi phối quyết định đến lực cắt. Sau đó là D_{avg}, $v_c$và D_t, đều có ý nghĩa thống kê nhưng với cường độ thấp hơn đáng kể.

Một kết quả đáng chú ý là thành phần phi tuyến f_z^2 có giá trị hiệu ứng chuẩn hóa lớn và vượt xa ngưỡng ý nghĩa. Điều này cho thấy mối quan hệ giữa f_z và lực cắt không đơn thuần tuyến tính mà mang tính phi tuyến rõ rệt; khi f_z tăng đến vùng cao, lực cắt tăng nhanh hơn, phản ánh sự gia tăng mạnh của tải trọng cơ học tác dụng lên lưỡi cắt. Bên cạnh đó, các tương tác $D_t.a_p$, $f_z.a_p$, $D_t.f_z$và $D_t.D_{avg}$ đều

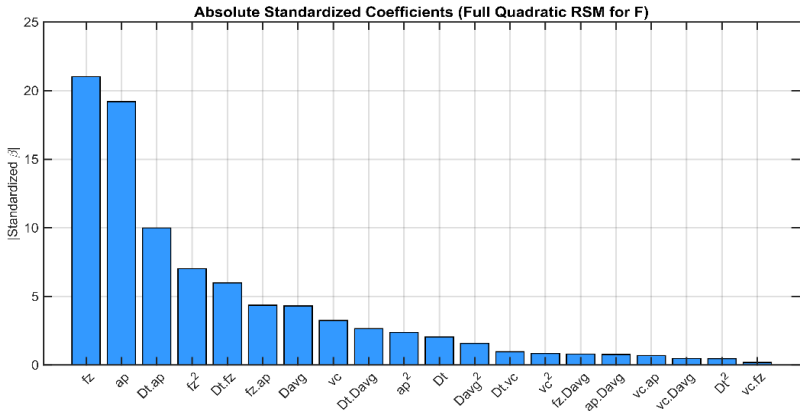
vượt ngưỡng ý nghĩa thống kê. Trong đó, $D_t.a_p$và $f_z.a_p$ có ảnh hưởng khá mạnh, cho thấy chiều sâu cắt không tác động độc lập mà còn khuếch đại hoặc điều chỉnh ảnh hưởng của hình học dao và lượng chạy dao trên răng lên lực cắt. Tương tác $D_t.D_{avg}$ cũng có ý nghĩa thống kê, hàm ý rằng ảnh hưởng của kích thước hạt nano đến lực cắt phụ thuộc vào đường kính dao, tức là hiệu quả của nano-MQL không hoàn toàn độc lập mà gắn với điều kiện tiếp xúc cắt do hình học dụng cụ quyết định. Ngoài ra, hai hạng tử bậc hai D_{avg}^2 và a_p^2 cũng vượt ngưỡng ý nghĩa thống kê, mặc dù cường độ nhỏ hơn nhóm yếu tố chính. Kết quả này cho thấy ảnh hưởng của kích thước hạt nano và chiều sâu cắt đến lực cắt cũng mang một mức độ phi tuyến nhất định. Trái lại, các tương tác $D_t.v_c$, $f_z.D_{avg}$, $a_p.D_{avg}$, $v_c.D_{avg}$, $v_c.a_p$, cùng các hạng tử v_c^2, D_t^2 và $v_c.f_z$ không vượt ngưỡng ý nghĩa, cho thấy trong miền khảo sát chúng chưa đủ mạnh để được xem là có ảnh hưởng thống kê rõ rệt.



Hình 4.10. *Biểu đồ Pareto các hiệu ứng chuẩn hóa (standardized effects) của mô hình RSM cho lực cắt F*

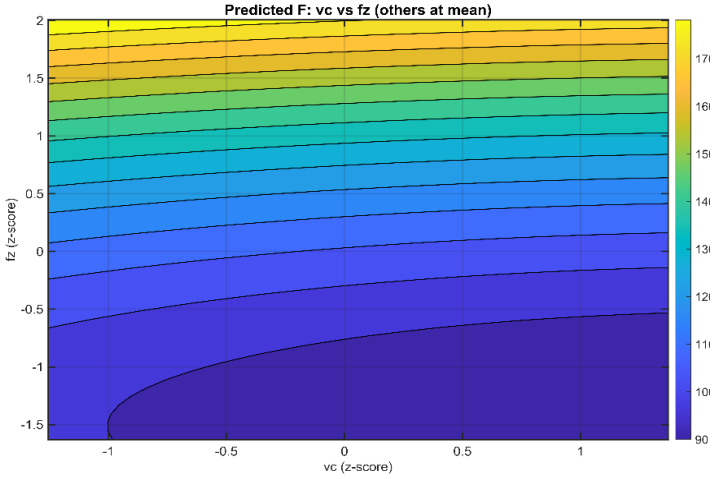
Để so sánh mức độ ảnh hưởng tương đối giữa các yếu tố trên cùng một thang đo không thứ nguyên, biểu đồ giá trị tuyệt đối của các hệ số hồi quy chuẩn hóa ($|\beta|$) được trình bày trong Hình 4.11. Kết quả cho thấy f_z có giá trị $|\beta|$ lớn nhất, tiếp theo là a_p, với chênh lệch không lớn. Điều này một lần nữa khẳng định lực cắt trong quá trình phay cứng chủ yếu bị chi phối bởi hai thông số trực tiếp quyết định tải trọng bóc tách vật liệu. Trong nhóm các hạng tử tương tác và phi tuyến, $D_t.a_p$, f_z^2, $D_t.f_z$ và $f_z.a_p$ có giá trị $|\beta|$ tương đối lớn, cho thấy vai trò đáng kể của sự kết hợp giữa hình học dụng cụ, lượng chạy dao và chiều sâu cắt. Đặc biệt, f_z^2 có $|\beta|$ lớn hơn nhiều hạng tử khác, nhấn mạnh tính phi tuyến mạnh của lực cắt theo lượng chạy dao trên răng.

Mặc dù D_{avg} không phải là yếu tố chi phối chính, nó vẫn có giá trị | β | ở mức đáng kể và lớn hơn v_c, D_t, D_{avg}^2 cũng như nhiều hạng tử tương tác khác. Điều này cho thấy kích thước hạt nano có vai trò nhất định đối với lực cắt, khác với trường hợp của MRR, nơi ảnh hưởng của D_{avg} gần như không đáng kể. Nói cách khác, nano-MQL trong nghiên cứu này có xu hướng tác động đến điều kiện ma sát và tiếp xúc cắt nhiều hơn là làm thay đổi năng suất bóc tách vật liệu.



Hình 4.11. *Biểu đồ mô tả giá trị tuyệt đối của các hệ số hồi quy chuẩn hóa* (| β |) *của mô hình RSM bậc hai cho lực cắt F*

Ảnh hưởng kết hợp của các thông số công nghệ đến lực cắt được thể hiện rõ hơn qua đồ thị đường đồng mức trong Hình 4.12. Khi các yếu tố khác được giữ ở giá trị trung bình, lực cắt tăng rất mạnh theo chiều tăng của f_z, trong khi giảm nhẹ theo chiều tăng của v_c. Các đường đồng mức gần như nằm ngang và nghiêng nhẹ theo phương v_c, chứng tỏ f_z là yếu tố chi phối nổi trội trong cặp biến này. Ở vùng f_z thấp kết hợp với v_c cao, lực cắt đạt giá trị nhỏ nhất; ngược lại, khi f_z tăng cao, lực cắt tăng mạnh ngay cả khi v_c cũng tăng. Điều này khẳng định rằng trong chiến lược giảm lực cắt, việc kiểm soát f_z đóng vai trò quan trọng hơn so với chỉ điều chỉnh tốc độ cắt.



Hình 4.12. *Đồ thị đường đồng mức của lực cắt F theo v_c và f_z khi các yếu tố khác giữ ở giá trị trung bình*

Tổng hợp các kết quả trên cho thấy lực cắt trong quá trình phay cứng dưới điều kiện nano-MQL chịu chi phối chủ yếu bởi lượng chạy dao trên răng f_z và chiều sâu cắt a_p, tiếp theo là kích thước hạt nano D_{avg}, tốc độ cắt v_c và đường kính dao D_t. Sự hiện diện của các hạng tử tương tác có ý nghĩa thống kê như $D_t.a_p$, $f_z.a_p$, $D_t.f_z$ và $D_t.D_{avg}$, cùng với các thành phần phi tuyến như f_z^2, D_{avg}^2 và a_p^2, khẳng định rằng lực cắt là một đáp ứng đa biến và phi tuyến rõ rệt. Vì vậy, để kiểm soát và giảm lực cắt hiệu quả, cần xem xét đồng thời các yếu tố chế độ cắt, hình học dao và điều kiện nano-MQL thay vì tối ưu từng yếu tố một cách tách biệt.

4.3. Phân tích phương sai (ANOVA) của các mô hình

Phân tích phương sai (ANOVA) được sử dụng nhằm đánh giá ý nghĩa thống kê và mức độ phù hợp của các mô hình hồi quy RSM bậc hai xây dựng cho ba đại lượng đầu ra gồm độ nhám bề mặt (Ra), năng suất bóc tách vật liệu (MRR) và lực cắt (F). Kết quả ANOVA tương ứng được trình bày trong Bảng 4.1, Bảng 4.2 và Bảng 4.3.

4.3.1. ANOVA cho mô hình độ nhám bề mặt (Ra)

Kết quả ANOVA của mô hình Ra được trình bày trong Bảng 4.1. Tổng phương sai của mô hình đạt giá trị SS = 0.5086, chiếm phần lớn tổng phương sai của hệ thống (SS_total = 0.5276), trong khi sai số chỉ chiếm một phần rất nhỏ (SS_error = 0.0190). Điều này cho thấy mô hình có khả năng giải thích tốt sự biến thiên của dữ liệu thực nghiệm.

Giá trị F của mô hình đạt 152.68 với p-value = 1.35×10^{-72} ($p < 0.001$), chứng tỏ mô hình có ý nghĩa thống kê rất cao. Khi phân tích chi tiết, các hiệu ứng tuyến tính (DF = 5) có giá trị F rất lớn (552.80, $p = 3.75\times10^{-78}$), cho thấy các yếu tố đầu vào đóng vai trò chi phối chính đối với độ nhám bề mặt. Các hạng tử tương tác và phi tuyến (DF = 15) cũng có ý nghĩa thống kê rõ rệt với F = 19.31 và $p = 1.28\times10^{-24}$, khẳng định sự tồn tại của quan hệ phi tuyến và tương tác giữa các biến.

Phần sai số có Mean Square rất nhỏ ($MS = 1.67\times10^{-4}$), cho thấy mức độ phân tán của phần dư thấp. Tuy nhiên, kết quả kiểm định lack-of-fit cho thấy p-value = 3.01×10^{-5} (< 0.05), cho thấy vẫn tồn tại sai khác có ý nghĩa thống kê giữa mô hình và dữ liệu thực nghiệm. Điều này hàm ý rằng quan hệ giữa các thông số công nghệ và độ nhám bề mặt còn chứa các thành phần phi tuyến phức tạp chưa được mô hình bậc hai mô tả đầy đủ.

Bảng 4.1. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho mô hình Ra

Nguồn biến thiên	SS	DF	MS	F-value	p-value
Mô hình	0.508606	20	0.025430	152.6802	1.35E-72
Hiệu ứng chính	0.460372	5	0.092074	552.8028	3.75E-78
Tương tác + bậc hai	0.048234	15	0.003216	19.3060	1.28E-24
Sai số (Error)	0.018988	114	0.000167	-	-

Nguồn biến thiên	SS	DF	MS	F-value	p-value
Lack-of-fit	0.018738	101	0.000186	9.6472	3.01E-05
Pure error	0.000250	13	0.000019	-	-
Tổng (Total)	0.527594	134	0.003937	-	-

Ghi chú: *p-value < 0.05 cho thấy yếu tố hoặc mô hình có ý nghĩa thống kê ở mức tin cậy 95%.*

Nhìn chung, kết quả ANOVA cho thấy mô hình Ra có ý nghĩa thống kê rất cao và có khả năng mô tả tốt xu hướng biến thiên của dữ liệu trong miền khảo sát, đồng thời có thể sử dụng làm cơ sở cho việc xây dựng và phân tích mô hình hồi quy ở các mục tiếp theo.

4.3.2. ANOVA cho mô hình năng suất bóc tách (MRR)

Kết quả ANOVA của mô hình MRR được thể hiện trong Bảng 4.2. Tổng bình phương của mô hình đạt SS = 2705.67 trên tổng SS_total = 2707.03, trong khi phần sai số chỉ là SS_error = 1.36. Điều này cho thấy mô hình gần như giải thích toàn bộ biến thiên của dữ liệu.

Giá trị F của mô hình đạt mức cực lớn (11345.62) với p-value = 3.26×10^{-178}, khẳng định ý nghĩa thống kê rất cao của mô hình. Các hiệu ứng tuyến tính có vai trò chi phối tuyệt đối với F = 43841.37 ($p \approx 10^{-185}$), trong khi các hạng tử tương tác và phi tuyến cũng có ý nghĩa rất mạnh với F = 513.71 ($p \approx 10^{-97}$).

Phần sai số của mô hình rất nhỏ (MS = 0.0119), chứng tỏ sai lệch giữa giá trị dự đoán và thực nghiệm gần như không đáng kể. Kết quả này phù hợp với hệ số xác định rất cao của mô hình đã trình bày trước đó, và khẳng định rằng mô hình MRR có độ chính xác rất cao trong miền khảo sát.

Bảng 4.2. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho mô hình MRR

Nguồn biến thiên	SS	DF	MS	F-value	p-value
Mô hình	2705.672773	20	135.283639	11345.6247	3.26E-178
Hiệu ứng chính	2613.791769	5	522.758354	43841.3701	2.12E-185
Tương tác + bậc hai	91.881004	15	6.125400	513.7095	4.08E-97
Sai số (Error)	1.359320	114	0.011924	-	-
Lack-of-fit	1.356195	101	0.013428	55.8634	5.68E-10
Pure error	0.003125	13	0.000240	-	-
Tổng (Total)	2707.032093	134	20.201732	-	-

Ghi chú: *p-value < 0.05 cho thấy yếu tố hoặc mô hình có ý nghĩa thống kê ở mức tin cậy 95%.*

Đáng chú ý, mặc dù mô hình có độ chính xác rất cao, các thành phần tương tác vẫn có ý nghĩa thống kê rõ rệt, cho thấy MRR không chỉ phụ thuộc tuyến tính vào các biến đầu vào mà còn chịu ảnh hưởng mạnh của sự kết hợp giữa các thông số công nghệ. Kết quả kiểm định lack-of-fit cho thấy p-value = 5.68×10^{-10} (< 0.05), chứng tỏ vẫn tồn tại sai khác có ý nghĩa thống kê giữa mô hình và dữ liệu thực nghiệm. Tuy nhiên, với giá trị F lớn và p-value rất nhỏ (p << 0.001), cho thấy mô hình có ý nghĩa thống kê rất cao.

4.3.3. ANOVA cho mô hình lực cắt (F)

Kết quả ANOVA của mô hình lực cắt được trình bày trong Bảng 4.3. Tổng phương sai của mô hình đạt $SS = 173580.33$ trên tổng $SS_{total} = 176284.07$, trong khi phần sai số là $SS_{error} = 2703.74$. So với hai mô hình trước, tỷ lệ sai số lớn hơn nhưng vẫn ở mức chấp nhận được.

Bảng 4.3. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho mô hình F

Nguồn biến thiên	SS	DF	MS	F-value	p-value
Mô hình	173580.333110	20	8679.016656	365.940657	1.249823E-93
Hiệu ứng chính	169136.519765	5	33827.303953	1426.288983	5.420185E-101
Tương tác + bậc hai	4443.813345	15	296.254223	12.491215	8.776146E-18
Sai số (Error)	2703.738652	114	23.717006	-	-
Lack-of-fit	2671.926518	101	26.454718	10.810697	1.538174E-05
Pure error	31.812134	13	2.447087	-	-
Tổng (Total)	176284.071762	134	1315.552774	-	-

Ghi chú: *p-value < 0.05 cho thấy yếu tố hoặc mô hình có ý nghĩa thống kê ở mức tin cậy 95%.*

Kết quả ANOVA của mô hình lực cắt được trình bày trong Bảng 4.3. Tổng phương sai của mô hình đạt SS = 173580.33 trên tổng SS_total = 176284.07, trong khi phần sai số là SS_error = 2703.74. So với hai mô hình trước, phần phương sai sai số chiếm tỷ lệ lớn hơn trong tổng phương sai, phản ánh mức độ biến thiên cao hơn của dữ liệu lực cắt, tuy nhiên vẫn nằm trong phạm vi chấp nhận được đối với các quá trình gia công thực tế.

Giá trị F của mô hình đạt 365.94 với p-value = 1.25×10^{-93}, chứng tỏ mô hình có ý nghĩa thống kê rất cao. Các hiệu ứng tuyến tính có vai trò chi phối với F = 1426.29 ($p \approx 10^{-101}$), trong khi các hạng tử tương tác và phi tuyến cũng có ý nghĩa rõ rệt với F = 12.49 ($p \approx 10^{-18}$).

So với mô hình MRR, mức độ ảnh hưởng của các hạng tử tương tác trong mô hình lực cắt thấp hơn, thể hiện qua giá trị F nhỏ hơn đáng kể. Tuy nhiên, các tương

tác này vẫn vượt ngưỡng ý nghĩa thống kê, cho thấy lực cắt vẫn là một đại lượng phụ thuộc đa biến và có tính phi tuyến rõ rệt.

Phần sai số có MS = 23.72, phản ánh mức độ biến thiên của lực cắt lớn hơn so với Ra và MRR, điều này hoàn toàn phù hợp với bản chất dao động của lực trong quá trình cắt gọt. Kết quả kiểm định lack-of-fit cho thấy p-value = 1.54×10^{-5} (< 0.05), cho thấy vẫn tồn tại sai khác có ý nghĩa thống kê giữa mô hình và dữ liệu thực nghiệm. Tuy nhiên, với các giá trị F lớn và p-value rất nhỏ, cho thấy mô hình có ý nghĩa thống kê cao.

4.3.1.4. Đánh giá tổng hợp

Tổng hợp kết quả ANOVA của ba mô hình cho thấy:

- Tất cả các mô hình đều có ý nghĩa thống kê rất cao với p-value << 0.001
- Các hiệu ứng tuyến tính đóng vai trò chi phối chính trong cả ba trường hợp
- Các hạng tử tương tác và phi tuyến đều có ý nghĩa thống kê, đặc biệt rõ rệt đối với Ra và MRR
- Mô hình MRR có độ phù hợp cao nhất, tiếp theo là Ra và sau đó là lực cắt F
- Sai số của mô hình F lớn hơn nhưng vẫn trong giới hạn chấp nhận được đối với các quá trình cắt gọt thực tế

Như vậy, các mô hình hồi quy RSM bậc hai được xây dựng là phù hợp, có ý nghĩa thống kê cao và đủ độ tin cậy để sử dụng trong phân tích tương tác và tối ưu hóa đa mục tiêu ở các phần tiếp theo.

4.4. Mô hình hóa ba hàm mục tiêu bằng RSM

4.4.1. Mục tiêu mô hình hóa

Trong nghiên cứu này, mục tiêu của việc mô hình hóa là xây dựng các mô hình toán học biểu diễn mối quan hệ giữa các thông số công nghệ và các đại lượng đầu ra đặc trưng của quá trình phay cứng, bao gồm độ nhám bề mặt (Ra), lực cắt (F) và tốc độ bóc tách vật liệu (MRR). Các mô hình này đóng vai trò là công cụ dự đoán, cho phép đánh giá ảnh hưởng của các biến đầu vào, đồng thời làm cơ sở cho các bước tối ưu hóa trong chương tiếp theo.

Việc mô hình hóa được thực hiện trên cơ sở dữ liệu thực nghiệm thu được từ thiết kế thí nghiệm dạng Box-Behnken có phân khối, đảm bảo tính bao phủ của không gian thiết kế và độ tin cậy của dữ liệu. Các biến đầu vào bao gồm các thông số chế độ cắt như tốc độ cắt (v_c), lượng chạy dao trên răng (f_z), chiều sâu cắt (a_p), cùng với các yếu tố liên quan đến dụng cụ và điều kiện bôi trơn – làm mát như đường kính dao (D_t) và kích thước hạt nano (D_{avg}).

Ba đại lượng đầu ra được lựa chọn có ý nghĩa đại diện cho ba khía cạnh quan trọng của quá trình gia công. Cụ thể, độ nhám bề mặt (Ra) phản ánh chất lượng bề

mặt sau gia công và được xác định là mục tiêu cần tối thiểu hóa. Lực cắt (F) đại diện cho tải trọng cơ học trong quá trình cắt, liên quan trực tiếp đến độ ổn định và tuổi thọ dụng cụ, cũng được định hướng tối thiểu hóa. Trong khi đó, MRR phản ánh năng suất gia công và được định hướng tối đa hóa. Như vậy, ba mục tiêu này có tính chất mâu thuẫn lẫn nhau, tạo nên một bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu trong các phần tiếp theo.

Trong phạm vi mục này, phương pháp mô hình hóa được lựa chọn là phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology - RSM) (xem mục 2.5.1), với mục tiêu xây dựng các mô hình hồi quy bậc hai cho từng đại lượng đầu ra. Việc sử dụng RSM cho phép mô tả đồng thời ảnh hưởng của các hiệu ứng chính, tương tác và thành phần phi tuyến của các biến đầu vào, từ đó phản ánh chính xác hơn hành vi của quá trình trong miền khảo sát.

Bên cạnh đó, việc xây dựng các mô hình riêng cho từng đại lượng đầu ra, cũng như xem xét đồng thời trên bộ dữ liệu gộp, cho phép đánh giá đầy đủ ảnh hưởng của các thông số công nghệ trong các điều kiện khác nhau. Các mô hình thu được không chỉ phục vụ cho việc phân tích cơ chế ảnh hưởng mà còn là cơ sở đầu vào cho các thuật toán tối ưu hóa đa mục tiêu trong Chương 5.

Như vậy, mục tiêu mô hình hóa trong nghiên cứu này không chỉ dừng lại ở việc xây dựng các phương trình hồi quy, mà còn hướng đến việc thiết lập một nền tảng mô hình hóa đáng tin cậy, có khả năng hỗ trợ phân tích, dự đoán và tối ưu hóa quá trình phay cứng dưới điều kiện nano-MQL sử dụng hạt CuO.

4.4.2. Mô hình hồi quy cho độ nhám bề mặt (Ra)

Trên cơ sở dữ liệu thực nghiệm của bộ dữ liệu gộp (Phụ lục 1), mô hình hồi quy bậc hai cho độ nhám bề mặt Ra theo đơn vị thực được xây dựng như sau:

$$\begin{aligned} Ra = {} & 0.848170 - 0.090865D_t - 0.005581v_c + 6.370997f_z + 1.461923a_p + 0.000633D_{avg} \\ & + 0.000070D_tv_c - 1.056083D_tf_z - 0.029585D_ta_p - 0.000115D_tD_{avg} \\ & - 0.002259v_cf_z - 0.003261v_ca_p - 0.000002v_cD_{avg} + 0.980891f_za_p \\ & + 0.006959f_zD_{avg} + 0.001262a_pD_{avg} + 0.006421D_t^2 + 0.000016v_c^2 \\ & + 73.515860f_z^2 - 0.472196a_p^2 + 0.000001D_{avg}^2 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Nhận xét: từ phương trình hồi quy thực nghiệm chỉ ra: Ảnh hưởng tương tác các tham số rất nhỏ nên loại bỏ tích các tham số có hệ số trên 3 chữ số "0" sau dấu phẩy trong phương trình (4.1).

Mô hình thu được có độ phù hợp cao với dữ liệu thực nghiệm, với hệ số xác định $R^2 = 0.9640$ và hệ số xác định hiệu chỉnh $R^2_{adj} = 0.9577$. Giá trị R^2 cho thấy khoảng 96.40% biến thiên của độ nhám bề mặt được giải thích bởi các biến đầu vào và các thành phần tương tác, bậc hai của mô hình. Trong khi đó, R^2_{adj} vẫn duy trì ở mức rất cao và chỉ thấp hơn nhẹ so với R^2, chứng tỏ mô hình không bị suy giảm

đáng kể do số lượng biến giải thích, đồng thời khẳng định tính hợp lý của việc sử dụng mô hình hồi quy bậc hai để mô tả quan hệ giữa các thông số công nghệ và độ nhám bề mặt.

Xét các hệ số tuyến tính của mô hình, có thể thấy f_z có hệ số dương rất lớn (+6.370997), cho thấy khi lượng chạy dao trên răng tăng thì độ nhám bề mặt có xu hướng tăng rõ rệt. Đây cũng là yếu tố có ảnh hưởng mạnh nhất trong nhóm các hiệu ứng chính, phù hợp với biểu đồ hiệu ứng chính và biểu đồ hệ số chuẩn hóa. Tương tự, a_p cũng có hệ số dương khá lớn (+1.461923), phản ánh xu hướng tăng độ nhám khi chiều sâu cắt tăng. Ngược lại, hệ số của D_t mang dấu âm (-0.090865), cho thấy khi đường kính dao tăng thì Ra có xu hướng giảm; nói cách khác, dao có đường kính lớn hơn có thể góp phần cải thiện chất lượng bề mặt trong phạm vi khảo sát. Đối với v_c, hệ số âm (-0.005581) cho thấy tốc độ cắt tăng có xu hướng làm giảm nhẹ độ nhám bề mặt. Hệ số của D_{avg}là dương nhưng rất nhỏ (+0.000633), cho thấy ảnh hưởng tuyến tính trực tiếp của kích thước hạt nano đến Ralà không lớn so với các biến công nghệ chính khác.

Xét về ý nghĩa thống kê của các hiệu ứng chính trong mô hình mã hóa, các biến D_t, v_c, f_z và a_p đều có giá trị p rất nhỏ ($p < 0.001$), chứng tỏ ảnh hưởng của chúng đến độ nhám bề mặt là có ý nghĩa thống kê cao. Trong khi đó, hiệu ứng chính của D_{avg} không thật sự nổi bật về mặt thống kê ($p \approx 0.131$), cho thấy tác động riêng lẻ của kích thước hạt nano đến Ra không mạnh khi xét độc lập. Tuy nhiên, điều này không có nghĩa là D_{avg} hoàn toàn không quan trọng, vì biến này vẫn có thể tham gia thông qua các thành phần tương tác với các yếu tố công nghệ khác.

Đối với các thành phần tương tác, hệ số âm của $D_t f_z$ (-1.056083) cho thấy ảnh hưởng làm tăng Ra của f_z có xu hướng được giảm bớt khi đường kính dao lớn hơn. Ngược lại, hệ số dương của $f_z a_p$ (+0.980891) chỉ ra rằng khi đồng thời tăng lượng chạy dao trên răng và chiều sâu cắt, độ nhám bề mặt có xu hướng tăng mạnh hơn so với ảnh hưởng riêng lẻ của từng yếu tố. Ngoài ra, tương tác $f_z D_{avg}$ có hệ số dương (+0.006959) và có ý nghĩa thống kê ở mức chấp nhận được, cho thấy kích thước hạt nano có thể làm thay đổi mức độ ảnh hưởng của lượng chạy dao đến độ nhám bề mặt. Một số tương tác khác như $D_t a_p$, $D_t D_{avg}$ hay $v_c a_p$ cũng góp phần mô tả chi tiết hơn hành vi của quá trình, dù mức độ ảnh hưởng không lớn bằng các thành phần nêu trên.

Các hệ số bậc hai cũng cho thấy bản chất phi tuyến của quá trình. Đặc biệt, hệ số f_z^2 rất lớn và dương (+73.515860), chứng tỏ quan hệ giữa f_z và Ra không chỉ là tuyến tính mà còn có độ cong rõ rệt; sự gia tăng f_z ở các mức cao làm Ra tăng nhanh hơn. Thành phần D_t^2 mang giá trị dương (+0.006421) và v_c^2 cũng dương

nhưng nhỏ (+0.000016), cho thấy tồn tại mức độ phi tuyến nhất định đối với hai biến này. Trong khi đó, hệ số a_p^2 âm (-0.472196) cho thấy ảnh hưởng của chiều sâu cắt đến Ra có xu hướng cong xuống trong miền khảo sát. Thành phần D_{avg}^2 rất nhỏ, phù hợp với nhận xét rằng ảnh hưởng độc lập của kích thước hạt nano đến độ nhám bề mặt không thật sự chi phối.

Như vậy, mô hình hồi quy bậc hai đã mô tả tốt mối quan hệ giữa các thông số công nghệ và độ nhám bề mặt. Kết quả cho thấy f_z là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến Ra, tiếp theo là a_p và D_t, trong khi ảnh hưởng của v_c ở mức thấp hơn và ảnh hưởng riêng lẻ của D_{avg} là tương đối hạn chế. Đồng thời, sự hiện diện của các thành phần tương tác và bậc hai khẳng định rằng độ nhám bề mặt trong quá trình phay cứng dưới điều kiện nano-MQL chịu chi phối bởi quan hệ đa biến và phi tuyến, do đó việc sử dụng mô hình hồi quy toàn phương là hoàn toàn cần thiết.

4.4.3. Mô hình hồi quy cho năng suất bóc tách vật liệu (MRR)

Trên cơ sở dữ liệu thực nghiệm của bộ dữ liệu gộp (Phụ lục 1), mô hình hồi quy bậc hai cho tốc độ bóc tách vật liệu MRR theo đơn vị thực được xác định như sau:

$$\begin{aligned} MRR = {} & 0.933929 - 0.133226D_t - 0.011102v_c + 15.629736f_z - 1.171029a_p - 0.001525D_{avg} \\ & - 0.008220D_t v_c - 19.414208D_t f_z - 6.222731D_t a_p + 0.000150D_t D_{avg} \\ & + 1.615845v_c f_z + 0.571220v_c a_p - 0.000005v_c D_{avg} + 1184.490829f_z a_p \\ & - 0.013207f_z D_{avg} - 0.004392a_p D_{avg} + 0.102578D_t^2 + 0.000030v_c^2 \\ & - 3.061537f_z^2 - 1.635751a_p^2 + 0.000016D_{avg}^2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Nhận xét: từ phương trình hồi quy thực nghiệm chỉ ra: Ảnh hưởng tương tác các tham số rất nhỏ nên loại bỏ tích các tham số có hệ số trên 3 chữ số "0" sau dấu phẩy trong phương trình (4.2).

Mô hình thu được có độ phù hợp rất cao với dữ liệu thực nghiệm, với hệ số xác định $R^2 = 0.999498$ và hệ số xác định hiệu chỉnh $R_{adj}^2 = 0.999410$. Điều này cho thấy khoảng 99.95% biến thiên của MRR được giải thích bởi các biến đầu vào cùng các thành phần tương tác và bậc hai của mô hình. Chênh lệch rất nhỏ giữa R^2 và R_{adj}^2 chứng tỏ mô hình không bị phức tạp hóa quá mức và các biến được đưa vào là phù hợp. Đồng thời, sai số quân phương trung bình gốc $RMSE = 0.100345$ g/min cho thấy độ lệch giữa giá trị dự đoán và thực nghiệm là rất nhỏ, khẳng định khả năng dự đoán rất tốt của mô hình.

Xét các hệ số tuyến tính của mô hình, f_z có hệ số dương rất lớn (+15.629736), cho thấy khi lượng chạy dao trên răng tăng thì MRR tăng mạnh. Đây là kết quả phù hợp với bản chất của quá trình cắt, vì khi f_z tăng, lượng vật liệu bị bóc tách trong một đơn vị thời gian cũng tăng đáng kể. Tương tự, xét trên biểu đồ hiệu ứng chính, a_p cũng là một yếu tố làm tăng mạnh MRR. Tuy nhiên, trong phương trình hồi quy

đầy đủ, hệ số tuyến tính của a_p mang dấu âm (-1.171029). Điều này cho thấy ảnh hưởng của a_p không thể được diễn giải chỉ dựa trên riêng thành phần tuyến tính, mà cần xem xét đồng thời với các thành phần tương tác và bậc hai, đặc biệt là tương tác $f_z a_p$ có hệ số rất lớn và dương. Nói cách khác, tác động thực của a_p đến MRR là phi tuyến và phụ thuộc mạnh vào tổ hợp với các biến khác.

Hệ số tuyến tính của D_t là âm (-0.133226), cho thấy khi xét riêng lẻ trong mô hình đầy đủ, việc tăng đường kính dao có xu hướng làm giảm giá trị cơ sở của MRR. Tuy nhiên, ảnh hưởng này đồng thời chịu chi phối mạnh bởi các tương tác $D_t f_z$, $D_t a_p$ và $D_t v_c$. Trên thực tế, biểu đồ hệ số chuẩn hóa và biểu đồ hiệu ứng chính đều cho thấy D_t là một trong những yếu tố ảnh hưởng mạnh đến MRR, chỉ đứng sau f_z và a_p. Đối với v_c, hệ số tuyến tính mang dấu âm (-0.011102), nhưng giá trị tuyệt đối nhỏ; điều này cho thấy ảnh hưởng trực tiếp của tốc độ cắt đến MRR là không lớn khi xét độc lập. Tuy nhiên, các tương tác chứa v_c, đặc biệt là $v_c f_z$ và $v_c a_p$, lại có ý nghĩa rõ rệt, cho thấy vai trò điều tiết của tốc độ cắt đối với năng suất bóc tách vật liệu. Hệ số của D_{avg} rất nhỏ và âm (-0.001525), chứng tỏ ảnh hưởng tuyến tính trực tiếp của kích thước hạt nano đến MRR là rất hạn chế.

Xét các hệ số chuẩn hóa trong mô hình mã hóa, f_z và a_p là hai yếu tố có ảnh hưởng mạnh nhất đến MRR, với hệ số chuẩn hóa tuyệt đối lần lượt xấp xỉ 3.49 và 3.43. Tiếp theo là D_t với giá trị khoảng 2.72, sau đó là v_c khoảng 1.53. Yếu tố D_{avg} có hệ số chuẩn hóa rất nhỏ, khoảng -0.0085, phù hợp với nhận xét rằng kích thước hạt nano không phải là biến chi phối chính đối với năng suất bóc tách vật liệu trong miền khảo sát. Kết quả này cũng hoàn toàn phù hợp với biểu đồ Pareto hệ số chuẩn hóa và biểu đồ hiệu ứng chính của MRR.

Đối với các thành phần tương tác, tương tác $f_z a_p$ có hệ số rất lớn và dương (+1184.490829), phản ánh rằng khi đồng thời tăng lượng chạy dao trên răng và chiều sâu cắt thì MRR tăng rất mạnh. Đây là kết quả hoàn toàn hợp lý về bản chất vật lý, vì hai đại lượng này cùng quyết định lượng vật liệu bị cắt đi trong một đơn vị thời gian. Các tương tác $v_c f_z$ (+1.615845) và $v_c a_p$ (+0.571220) cũng mang dấu dương, cho thấy tốc độ cắt có xu hướng làm tăng hiệu quả bóc tách vật liệu khi kết hợp với tăng f_z hoặc a_p. Ngược lại, các tương tác $D_t f_z$ (-19.414208) và $D_t a_p$ (-6.222731) mang dấu âm, cho thấy tác động tăng MRR của f_z và a_p bị điều tiết bởi đường kính dao; nói cách khác, hiệu quả tăng năng suất của các thông số này không đồng đều giữa các kích thước dao khác nhau. Các tương tác với D_{avg} đều có hệ số rất nhỏ, khẳng định vai trò hạn chế của kích thước hạt nano đối với MRR.

Các thành phần bậc hai cũng phản ánh rõ tính phi tuyến của quá trình. Thành phần D_t^2 có hệ số dương (+0.102578), cho thấy ảnh hưởng của đường kính dao đến MRR có độ cong rõ rệt trong miền khảo sát. Trong khi đó, f_z^2 và a_p^2 có hệ số âm, lần lượt là (-3.061537) và (-1.635751), cho thấy mặc dù MRR tăng khi tăng f_z và a_p, song mức tăng này có xu hướng chậm lại ở các miền cao hơn. Điều này phản ánh hiện tượng phi tuyến thường gặp trong quá trình gia công, khi hiệu quả nâng năng suất không còn tăng tuyến tính theo chế độ cắt. Thành phần v_c^2 và D_{avg}^2 có hệ số rất nhỏ, cho thấy ảnh hưởng phi tuyến của hai yếu tố này là không đáng kể.

4.4.4. Mô hình hồi quy cho lực cắt tổng hợp (F)

Trên cơ sở dữ liệu thực nghiệm của bộ dữ liệu gộp (Phụ lục 1), mô hình hồi quy bề mặt đáp ứng bậc hai cho lực cắt tổng hợp Ftheo đơn vị thực được xác định như sau:

$$\begin{aligned} F = {} & 111.9446 - 7.7521D_t - 0.7521v_c + 938.9999f_z + 237.8213a_p - 0.0414D_{avg} \\ & + 0.0205D_tv_c - 147.3338D_tf_z + 81.1601D_ta_p - 0.0325D_tD_{avg} \\ & - 0.5946v_cf_z - 0.7218v_ca_p - 0.0007v_cD_{avg} - 5278.5399f_za_p \\ & + 1.4562f_zD_{avg} + 0.4555a_pD_{avg} + 0.0769D_t^2 + 0.0023v_c^2 \\ & + 25762.3114f_z^2 - 945.8464a_p^2 + 0.0014D_{avg}^2 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Nhận xét: từ phương trình hồi quy thực nghiệm chỉ ra: Ảnh hưởng tương tác các tham số rất nhỏ nên loại bỏ tích các tham số có hệ số trên 3 chữ số "0" sau dấu phẩy trong phương trình (4.3).

Mô hình hồi quy thu được có độ phù hợp cao với dữ liệu thực nghiệm, với hệ số xác định $R^2 = 0.9848$ và hệ số xác định hiệu chỉnh $R_{adj}^2 = 0.9821$. Điều này cho thấy khoảng 98.48% biến thiên của lực cắt được giải thích bởi các biến đầu vào và các thành phần tương tác trong mô hình. Giá trị R_{adj}^2 chỉ thấp hơn nhẹ so với R^2, chứng tỏ mô hình không bị suy giảm đáng kể do số lượng biến, đồng thời khẳng định tính hợp lý của việc sử dụng mô hình hồi quy bậc hai. Sai số dự đoán trung bình (RMSE ≈ 4.21 N) ở mức thấp, cho thấy khả năng dự đoán của mô hình là đáng tin cậy.

Xét các hệ số tuyến tính, f_z có hệ số dương rất lớn (+938.9999), cho thấy lượng chạy dao trên răng là yếu tố chi phối mạnh nhất đến lực cắt. Khi f_z tăng, lượng vật liệu bị cắt trong mỗi chu kỳ tăng lên đáng kể, dẫn đến lực cắt tăng nhanh. Tiếp theo, a_p cũng có hệ số dương lớn (+237.8213), phản ánh ảnh hưởng trực tiếp của chiều sâu cắt đến diện tích tiết diện phoi và do đó làm tăng lực cắt. Đây là hai yếu tố cơ bản nhất quyết định tải trọng cơ học trong quá trình phay.

Đối với D_t, hệ số tuyến tính mang dấu âm (-7.7521), cho thấy khi xét riêng lẻ trong mô hình đầy đủ, việc tăng đường kính dao có xu hướng làm giảm lực cắt.

Điều này có thể được giải thích bởi sự thay đổi điều kiện tiếp xúc và độ cứng vững của hệ thống khi sử dụng dao có đường kính lớn hơn. Tuy nhiên, ảnh hưởng thực của D_t không chỉ nằm ở thành phần tuyến tính mà còn chịu chi phối mạnh bởi các tương tác với các yếu tố khác, đặc biệt là $D_t f_z$ và $D_t a_p$. Đối với v_c, hệ số tuyến tính âm (-0.7521) cho thấy khi tăng tốc độ cắt, lực cắt có xu hướng giảm nhẹ, có thể liên quan đến hiện tượng mềm hóa nhiệt của vật liệu trong vùng cắt. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng này nhỏ hơn nhiều so với f_z và a_p. Hệ số của D_{avg} rất nhỏ (-0.0414), cho thấy ảnh hưởng tuyến tính trực tiếp của kích thước hạt nano đến lực cắt là không đáng kể khi xét độc lập.

Xét các hệ số chuẩn hóa, f_z và a_p là hai yếu tố có ảnh hưởng mạnh nhất đến lực cắt, tiếp theo là D_t, trong khi v_c và D_{avg} có ảnh hưởng thấp hơn. Kết quả này phù hợp với biểu đồ hiệu ứng chính và biểu đồ Pareto hệ số chuẩn hóa, trong đó f_z luôn là yếu tố chi phối hàng đầu.

Các thành phần tương tác cho thấy rõ tính phức tạp của quá trình. Đáng chú ý nhất là tương tác $f_z a_p$ với hệ số âm rất lớn (-5278.5399), phản ánh rằng mặc dù cả f_z và a_p đều làm tăng lực cắt khi xét riêng lẻ, nhưng khi tăng đồng thời hai yếu tố này, mức tăng lực cắt không còn tuyến tính mà bị điều tiết mạnh. Điều này cho thấy tồn tại cơ chế tương tác phi tuyến giữa hai yếu tố quan trọng nhất của quá trình cắt. Tương tác $D_t f_z$ (-147.3338) cho thấy ảnh hưởng của lượng chạy dao phụ thuộc đáng kể vào đường kính dao, trong khi tương tác $D_t a_p$ (+81.1601) phản ánh sự thay đổi vai trò của chiều sâu cắt theo kích thước dụng cụ. Các tương tác $v_c f_z$ và $v_c a_p$ có hệ số âm, cho thấy tốc độ cắt có xu hướng làm giảm lực cắt khi kết hợp với các yếu tố tăng tải như f_z và a_p. Các tương tác với D_{avg} có giá trị rất nhỏ, một lần nữa khẳng định ảnh hưởng hạn chế của kích thước hạt nano đến lực cắt.

Các thành phần bậc hai phản ánh rõ bản chất phi tuyến của quá trình. Thành phần f_z^2 có hệ số dương rất lớn (+25762.3114), cho thấy lực cắt tăng rất nhanh khi f_z tăng ở các mức cao, phản ánh sự gia tăng mạnh của tải trọng cắt trong điều kiện gia công nặng. Ngược lại, a_p^2 có hệ số âm (-945.8464), cho thấy ảnh hưởng của chiều sâu cắt có xu hướng bão hòa trong miền khảo sát. Thành phần D_t^2 và v_c^2 có hệ số nhỏ hơn, cho thấy ảnh hưởng phi tuyến của hai yếu tố này tồn tại nhưng không chi phối. Thành phần D_{avg}^2 rất nhỏ và không có ý nghĩa thực tiễn rõ rệt.

Các đồ thị kiểm tra phần dư cũng cho thấy mô hình có độ tin cậy tốt. Biểu đồ xác suất chuẩn của phần dư cho thấy các điểm dữ liệu phân bố gần đường thẳng chuẩn, chứng tỏ giả thiết phân phối chuẩn của sai số là hợp lý. Biểu đồ phần dư theo giá trị dự đoán không cho thấy xu hướng rõ rệt, mặc dù độ phân tán tăng nhẹ ở vùng

lực cắt lớn, điều này phù hợp với bản chất của dữ liệu cơ học. Phân tích Cook's distance cho thấy một số điểm có ảnh hưởng cao, nhưng phần lớn các điểm nằm trong vùng an toàn, chứng tỏ mô hình không bị chi phối bởi các điểm ngoại lai. Ngoài ra, các giá trị VIF của các biến chính đều nhỏ hơn 5, cho thấy không tồn tại hiện tượng đa cộng tuyến nghiêm trọng.

Như vậy, mô hình hồi quy bậc hai đã mô tả tốt mối quan hệ giữa các thông số công nghệ và lực cắt trong quá trình phay cứng. Kết quả cho thấy lực cắt chịu ảnh hưởng chủ yếu bởi lượng chạy dao trên răng f_z và chiều sâu cắt a_p, trong khi tốc độ cắt và kích thước hạt nano có ảnh hưởng thấp hơn. Đồng thời, sự tồn tại của các thành phần tương tác và bậc hai khẳng định tính phi tuyến mạnh của quá trình, cho thấy cần sử dụng các phương pháp mô hình hóa nâng cao trong các phần tiếp theo để nâng cao độ chính xác dự đoán.

Kết luận chương 4

Chương này đã trình bày kết quả thực nghiệm, phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ và xây dựng các mô hình hồi quy bề mặt đáp ứng bậc hai cho ba đại lượng đầu ra đặc trưng của quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi dưới điều kiện nano-MQL sử dụng hạt CuO, gồm độ nhám bề mặt (Ra), năng suất bóc tách vật liệu (MRR) và lực cắt (F). Kết quả phân tích cho thấy lượng chạy dao trên răng và chiều sâu cắt là hai yếu tố chi phối mạnh nhất đến MRR và F, trong khi độ nhám bề mặt chịu ảnh hưởng nổi bật của lượng chạy dao trên răng và đường kính dao. Kích thước hạt nano CuO nhìn chung không phải là yếu tố chi phối trực tiếp đến Ra và MRR, nhưng có vai trò nhất định đối với lực cắt thông qua điều kiện ma sát và tiếp xúc cắt.

Các mô hình RSM bậc hai xây dựng cho Ra, MRR và F đều cho hệ số xác định cao và có ý nghĩa thống kê rõ rệt theo phân tích ANOVA. Đồng thời, sự xuất hiện của nhiều thành phần tương tác và bậc hai có ý nghĩa thống kê cho thấy bản chất phi tuyến và đa biến của quá trình. Trên cơ sở đó, các mô hình thu được hoàn toàn có thể sử dụng làm công cụ dự đoán và làm hàm mục tiêu cho bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu trong Chương 5.

CHƯƠNG 5
TỐI ƯU HÓA QUÁ TRÌNH PHAY CỨNG BỀ MẶT TRỤ NGOÀI THÉP 90CrSi DƯỚI ĐIỀU KIỆN NANO-MQL SỬ DỤNG HẠT CuO

Mục tiêu chương 5:

-Tập trung giải quyết bài toán tối ưu hóa quá trình gia công theo hai hướng: tối ưu hóa đơn mục tiêu và tối ưu hóa đa mục tiêu. Trong phần tối ưu hóa đơn mục tiêu, các bài toán riêng biệt được thiết lập nhằm xác định chế độ cắt tối ưu tương ứng với từng đại lượng Ra, MRR và F. Quá trình tối ưu được thực hiện bằng cách kết hợp tìm kiếm rời rạc đối với các biến hình học (đường kính dao D_t, kích thước hạt nano D_{avg}) và tối ưu liên tục các thông số chế độ cắt (v_c, f_z, a_p) thông qua thuật toán fmincon trong môi trường MATLAB. Cách tiếp cận này cho phép tận dụng đầy đủ thông tin thực nghiệm đồng thời đảm bảo nghiệm tối ưu nằm trong miền khảo sát thực tế.

-Trong phần này, các mô hình thay thế dựa trên Gaussian Process Regression (GPR) được sử dụng làm hàm mục tiêu nhằm nâng cao độ chính xác dự đoán, kết hợp với thuật toán NSGA-II để xác định biên Pareto giữa các mục tiêu. Trên cơ sở tập nghiệm Pareto thu được, phương pháp ra quyết định đa tiêu chí AHP được áp dụng để lựa chọn nghiệm tối ưu tổng thể, bảo đảm sự cân bằng hợp lý giữa chất lượng bề mặt và năng suất gia công.

- Các kết quả tối ưu sẽ được phân tích, đánh giá quá trình hội tụ, sự tiến hóa của biên Pareto và được kiểm chứng thực nghiệm, qua đó đề xuất chế độ gia công tối ưu cho quá trình phay cứng thép 90CrSi dưới điều kiện nano-MQL sử dụng hạt CuO.

5.1. Tối ưu hóa đơn mục tiêu

5.1.1. Mục tiêu và phương pháp tối ưu hóa

Dựa trên các mô hình hồi quy bề mặt đáp ứng (RSM) bậc hai đã xây dựng trong Chương 4, ba bài toán tối ưu hóa đơn mục tiêu được thiết lập nhằm xác định các chế độ cắt tối ưu tương ứng với từng đại lượng đầu ra đặc trưng của quá trình gia công. Cụ thể, các mục tiêu tối ưu bao gồm:

- Tối thiểu hóa độ nhám bề mặt Ra nhằm đạt chất lượng bề mặt cao nhất;
- Tối đa hóa năng suất bóc tách vật liệu MRR nhằm nâng cao hiệu quả gia công;
- Tối thiểu hóa lực cắt tổng hợp F nhằm giảm tải cơ học và tăng độ ổn định của quá trình.

Các hàm mục tiêu được biểu diễn dưới dạng hàm hồi quy RSM phụ thuộc vào các biến công nghệ đầu vào:

$$f = f(D_t, v_c, f_z, a_p, D_{avg}) \qquad (5.1)$$

Trong đó, các biến đầu vào được phân thành hai nhóm:

(i) nhóm biến rời rạc gồm đường kính dao D_t và kích thước hạt nano D_{avg}, được xét tại các mức giá trị thực nghiệm;

(ii) nhóm biến liên tục gồm tốc độ cắt v_c, lượng chạy dao trên răng f_z và chiều sâu cắt a_p.

Miền giá trị của các biến liên tục được lấy theo giá trị nhỏ nhất - lớn nhất của toàn bộ dữ liệu thực nghiệm (Phụ lục 1): 100 ≤ vc ≤ 150 m/phút; 0.02 ≤ fz ≤ 0.08 mm/răng; 0.08 ≤ ap ≤ 0.25 mm. Do các mức fz, ap được lựa chọn riêng cho từng đường kính dao (Bảng 3.5), miền này rộng hơn miền 0.02 ≤ fz ≤ 0.04 mm/răng, 0.08 ≤ ap ≤ 0.12 mm của dao Ø6 thể hiện trên Hình 3.5; vì vậy các nghiệm tối ưu trong Bảng 5.1 (chẳng hạn fz = 0.08 mm/răng, ap = 0.25 mm) vẫn nằm trong miền giá trị của dữ liệu thực nghiệm.

Quá trình tối ưu hóa được thực hiện theo phương pháp kết hợp giữa tìm kiếm rời rạc và tối ưu hóa liên tục. Cụ thể, các giá trị của D_t và D_{avg} được quét toàn bộ trong tập giá trị rời rạc thu được từ dữ liệu thực nghiệm. Với mỗi cặp giá trị (D_t, D_{avg}) cố định, bài toán tối ưu liên tục đối với các biến v_c, f_z và a_p được giải bằng thuật toán *fmincon* trong môi trường MATLAB, sử dụng phương pháp Sequential Quadratic Programming (SQP).

Để tăng khả năng tìm được nghiệm tối ưu toàn cục và tránh rơi vào cực tiểu cục bộ, kỹ thuật đa khởi tạo (multi-start) được áp dụng, trong đó nhiều điểm khởi tạo ban đầu được phân bố ngẫu nhiên trong miền khảo sát của các biến liên tục. Các nghiệm tối ưu cục bộ thu được từ mỗi lần khởi tạo được so sánh, và nghiệm tốt nhất tương ứng với giá trị hàm mục tiêu cực trị được lựa chọn làm nghiệm tối ưu toàn cục.

Cách tiếp cận này cho phép tận dụng đồng thời thông tin thực nghiệm (đối với các biến rời rạc) và khả năng tối ưu hóa liên tục của thuật toán số, đảm bảo nghiệm tối ưu nằm trong miền khảo sát và có ý nghĩa thực tiễn cao đối với quá trình gia công.

5.1.2. Tối ưu hóa độ nhám bề mặt (Ra)

Tối ưu hóa độ nhám bề mặt (Ra) min xác định theo công thức sau:

$$\boldsymbol{min\ Ra = f(D_t, v_c, f_z, a_p, D_{avg})} \qquad \textbf{(5.2)}$$

Các kết quả cho thấy, *Dt* và *fz* là hai yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến Ra; *vc* tăng làm giảm Ra nhẹ do cải thiện biến dạng trượt; *ap* tăng làm Ra tăng; D_{avg} có ảnh hưởng nhỏ.

Điều kiện tối ưu đạt được: $D_t = 9$ mm, $D_{avg} = 100$ mm, $v_c = 150$ m/phút, $f_z = 0.02$ mm/răng, $a_p = 0.08$ mm. Kết quả dự đoán: Ra ≈ 0.144 μm, tương ứng bề mặt phay tinh mịn và đồng đều

5.1.3. Tối ưu hóa năng suất bóc tách vật liệu (MRR)

Tối ưu hóa năng suất bóc tách vật liệu (MRR) thể hiện theo công thức sau:

$$\max\ MRR = f(D_t, v_c, f_z, a_p, D_{avg}) \qquad (5.3)$$

Kết quả phân tích cho thấy MRR tăng mạnh theo *v_c*, *f_z* và *a_p*, phù hợp với cơ sở lý thuyết khi $MRR \propto v_c \times f_z \times a_p$.

Giá trị tối ưu dự đoán đạt được tại: $D_t = 6$ mm, $D_{avg} = 20$ mm, $v_c = 150$ m/phút, $f_z = 0.08$ mm/răng, $a_p = 0.25$ mm. Với MRR ≈ 42.06 g/min, đại diện cho chế độ cắt năng suất cao.

5.1.4. Tối ưu hóa lực cắt tổng hợp (F)

Tối ưu hóa lực cắt tổng hợp (F) được biểu diễn bằng phương trình sau:

$$\min\ F = f(D_t, v_c, f_z, a_p, D_{avg}) \qquad (5.4)$$

Phân tích từ mô hình cho thấy: f_z và a_p làm tăng đáng kể F; v_c có tác động giảm nhẹ F nhờ hiện tượng mềm hóa vật liệu; D_t và D_{avg} giúp giảm F thông qua tăng độ cứng và cải thiện bôi trơn.

Điều kiện tối ưu xác định: $D_t = 12$ mm, $D_{avg} = 100$ mm, $v_c = 141.2$ m/phút, $f_z = 0.023$ mm/răng, $a_p = 0.08$ mm. Giá trị lực cắt tối thiểu đạt F ≈ 37.81 N, phù hợp với mục tiêu giảm tải và kéo dài tuổi thọ dao.

5.1.5. Kiểm chứng thực nghiệm

Trên cơ sở các phương trình hồi quy RSM đã xây dựng cho độ nhám bề mặt (Ra), năng suất bóc tách vật liệu (MRR) và lực cắt tổng hợp (F), chương trình tối ưu đơn mục tiêu đã được phát triển trong môi trường MATLAB bằng cách sử dụng hàm fmin. Ba bài toán tối ưu riêng biệt được thiết lập tương ứng với các mục tiêu: tối thiểu hóa Ra, tối đa hóa MRR và tối thiểu hóa F, có xét đến các ràng buộc thực tế của thông số công nghệ.

Từ quá trình tính toán, các chế độ cắt tối ưu đơn mục tiêu cho từng đại lượng Ra, MRR và F đã được xác định. Để đánh giá độ tin cậy và khả năng ứng dụng thực tế của các kết quả tối ưu này, các thí nghiệm kiểm chứng tương ứng đã được tiến hành tại các chế độ cắt tối ưu tìm được. Giá trị Ra, MRR và F thu được từ thực nghiệm được so sánh trực tiếp với các giá trị dự đoán từ mô hình RSM, đồng thời tính toán sai số tương đối (%).

Kết quả so sánh giữa giá trị tính toán và giá trị thực nghiệm được tổng hợp trong Bảng 5.1. Có thể thấy rằng sai số giữa mô hình và thực nghiệm đều nhỏ hơn 6% đối với cả ba mục tiêu, cho thấy mức độ phù hợp và độ chính xác cao của các mô hình hồi quy cũng như thuật toán tối ưu đã sử dụng. Điều này khẳng định rằng các mô hình RSM xây dựng không chỉ có giá trị về mặt lý thuyết mà còn đủ tin cậy để áp dụng cho việc lựa chọn chế độ cắt tối ưu trong thực tế.

Bảng 5.1. Kết quả kiểm chứng thực nghiệm các nghiệm tối ưu đơn mục tiêu

Mục tiêu	D_t (mm)	v_c (m/phút)	f_z (mm/răng)	a_p (mm)	D_{avg} (nm)	Tính toán	Thí nghiệm	Sai số (%)
Min Ra (μm)	9	150	0.02	0.08	100	0.144	0.153	5.88
Max MRR (g/phút)	6	150	0.08	0.25	20	42.06	40.32	4.14
Min F (N)	12	141.2	0.023	0.08	100	37.81	39.58	4.47

5.2. Cơ sở lý thuyết của tối ưu hóa đa mục tiêu và thuật toán NSGA-II

5.2.1. Bản chất của bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu

Trong các quá trình sản xuất và gia công cơ khí, nhiều chỉ tiêu đánh giá chất lượng thường mâu thuẫn lẫn nhau. Ví dụ, trong phay cứng thép 90CrSi:

- Giảm độ nhám bề mặt (Ra) cần lượng chạy dao nhỏ và chiều sâu cắt thấp;

- Tăng năng suất bóc tách vật liệu (MRR) lại yêu cầu lượng chạy dao và chiều sâu cắt lớn;

Các mục tiêu nói trên không thể tối ưu đồng thời tại cùng một điểm và đó chính là bản chất của bài toán tối ưu đa mục tiêu (Multi-Objective Optimization - MOO).

Mục tiêu của MOO không phải là tìm một nghiệm duy nhất, mà là xác định một tập hợp các nghiệm không trội hơn nhau (Pareto-optimal set). Mỗi nghiệm trong tập hợp này biểu diễn một phương án đánh đổi (trade-off) hợp lý giữa các mục tiêu.

Về mặt toán học, bài toán tối ưu đa mục tiêu được mô tả như sau:

Tìm $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ để tối ưu hóa $f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$ với $x \in \Omega$

Trong đó:

$-f_1, f_2, \dots, f_m$: là các hàm mục tiêu (ở đây gồm Ra, MRR, F).

$-\ \Omega$: là miền khả thi được xác định bởi các ràng buộc công nghệ (giới hạn thông số cắt, điều kiện bôi trơn…).

5.2.2. Khái niệm tập Pareto và biên Pareto

Một nghiệm x_A được gọi là trội hơn (dominates) nghiệm x_B nếu và chỉ nếu: $f_i(x_A) \leq f_i(x_B)$ với mọi $i \in \{1, \dots, m\}$ và tồn tại ít nhất một j sao cho $f_j(x_A) < f_j(x_B)$.

Tập hợp tất cả các nghiệm không bị trội bởi bất kỳ nghiệm nào khác được gọi là tập Pareto (Pareto-optimal set).

Tập giá trị tương ứng trong không gian mục tiêu được gọi là biên Pareto (Pareto front).

Biên Pareto thể hiện trực quan các mối quan hệ đánh đổi giữa các mục tiêu. Trong nghiên cứu này, biên Pareto tối ưu 3 chỉ tiêu là: Ra - MRR - F, Kết quả cho thấy xu hướng nghịch biến: khi Ra và F giảm, MRR thường tăng chậm hoặc giảm theo.

5.2.3. Các phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu

Có ba hướng tiếp cận phổ biến trong MOO:

1. **Phương pháp quy đổi (Scalarization Methods):** Biến bài toán đa mục tiêu thành bài toán đơn mục tiêu bằng cách gán trọng số cho từng mục tiêu (ví dụ: phương pháp trọng số - Weighted Sum). Phương pháp này có nhược điểm là khó xác định trọng số chính xác, nên dễ bỏ sót các nghiệm Pareto.

2. **Phương pháp tìm kiếm theo mục tiêu (Goal Programming):** Đặt ra các giá trị mục tiêu mong muốn cho từng hàm f_i, sau đó tìm nghiệm gần nhất với các giá trị này. Phương pháp này phù hợp với bài toán có thông tin ưu tiên rõ ràng.

3. **Các thuật toán tiến hóa đa mục tiêu (Evolutionary Multi-Objective Algorithms - EMOAs):** Dựa trên nguyên lý chọn lọc tự nhiên và di truyền (GA, PSO, DE…), nhóm này có khả năng tìm kiếm song song nhiều nghiệm, do đó phát hiện toàn bộ biên Pareto.

Trong nghiên cứu này, thuật toán NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) được lựa chọn vì ưu điểm vượt trội về hiệu quả, độ ổn định và khả năng duy trì đa dạng nghiệm trong không gian tìm kiếm.

5.2.4. Thuật toán NSGA-II

Thuật toán NSGA-II, được đề xuất bởi Kalyanmoy Deb [114], [123], là một phiên bản cải tiến của thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA) chuyên dụng cho bài toán đa mục tiêu. Cấu trúc cơ bản của NSGA-II gồm các bước sau:

1. **Khởi tạo quần thể (Initialization):** Sinh ngẫu nhiên N cá thể (nghiệm) trong không gian biến đầu vào.

2. **Đánh giá hàm mục tiêu (Fitness Evaluation):** Tính các giá trị Ra, F và MRR cho từng cá thể dựa trên các mô hình GPR đã huấn luyện từ dữ liệu thực nghiệm.

3. **Phân hạng không trội (Non-dominated Sorting):** Sắp xếp quần thể theo cấp độ trội (rank) dựa trên mối quan hệ Pareto - nghiệm không bị trội sẽ được xếp vào **Front 1**, các nghiệm bị trội chỉ bởi Front 1 được xếp vào **Front 2**, v.v.

4. **Tính khoảng cách chen lấn (Crowding Distance):** Đo độ "mật" của các nghiệm trong mỗi front để **duy trì đa dạng** của tập Pareto.

5. **Chọn lọc (Selection):** Lựa chọn các cá thể dựa trên **rank** (ưu tiên front thấp hơn) và **crowding distance** (ưu tiên các cá thể nằm rải rác hơn).

6. **Lai ghép và đột biến (Crossover & Mutation):** Tạo ra thế hệ mới bằng các toán tử di truyền; các tham số phổ biến là:

- Tỷ lệ lai (Crossover rate): 0.8-0.9

- Tỷ lệ đột biến (Mutation rate): 0.1-0.2

7. **Kết hợp và cắt tỉa quần thể (Elitism):** Kết hợp quần thể cha và con, sắp xếp lại theo rank và crowding distance, sau đó chọn N cá thể tốt nhất để duy trì kích thước quần thể ổn định.

8. **Dừng thuật toán:** Khi đạt số thế hệ quy định (thường 100-200) hoặc khi biên Pareto hội tụ (không cải thiện thêm).

5.3. Các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí

5.3.1. Phương pháp TOPSIS

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) là một trong những phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) được sử dụng rộng rãi để lựa chọn phương án tối ưu từ một tập các phương án khả thi. Nguyên lý cơ bản của TOPSIS là phương án tốt nhất phải có khoảng cách ngắn nhất đến nghiệm lý tưởng dương (Ideal Solution) và khoảng cách xa nhất đến nghiệm lý tưởng âm (Negative-Ideal Solution). Trong nghiên cứu này, phương pháp TOPSIS được sử dụng để lựa chọn nghiệm tối ưu từ tập nghiệm Pareto thu được bằng thuật toán NSGA-II.

Quy trình thực hiện phương pháp TOPSIS bao gồm các bước sau [124]:

Bước 1. Xây dựng ma trận quyết định

Ma trận quyết định được biểu diễn như sau:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{mn} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

trong đó x_{mn} là giá trị của tiêu chí thứ n đối với phương án thứ m.

Bước 2. Chuẩn hóa ma trận quyết định

Các phần tử của ma trận quyết định được chuẩn hóa theo công thức:

$$k_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \quad (5.6)$$

Bước 3. Xây dựng ma trận quyết định chuẩn hóa có trọng số

Ma trận chuẩn hóa có trọng số được xác định theo:

$$l_{ij} = w_j \times k_{ij} \quad (5.7)$$

trong đó w_j là trọng số của tiêu chí thứ j.

Bước 4. Xác định nghiệm lý tưởng dương và nghiệm lý tưởng âm

Nghiệm lý tưởng dương được xác định bởi:

$$A^+ = \{l_1^+, l_2^+, \dots, l_j^+, \dots, l_n^+\} \quad (5.8)$$

Nghiệm lý tưởng âm được xác định bởi:

$$A^- = \{l_1^-, l_2^-, \dots, l_j^-, \dots, l_n^-\} \quad (5.9)$$

trong đó l_j^+ và l_j^- lần lượt là giá trị tốt nhất và giá trị xấu nhất của tiêu chí thứ $j(j = 1,2, \dots, n)$.

Bước 5. Tính khoảng cách đến nghiệm lý tưởng dương và nghiệm lý tưởng âm

Khoảng cách từ phương án thứ iđến nghiệm lý tưởng dương được xác định theo:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (l_{ij} - l_j^+)^2} \qquad (5.10)$$

Khoảng cách từ phương án thứ iđến nghiệm lý tưởng âm được xác định theo:

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (l_{ij} - l_j^-)^2} \qquad (5.11)$$

với $i = 1,2, \dots, m$.

Bước 6. Tính hệ số gần đúng đối với nghiệm lý tưởng

Giá trị đánh giá của mỗi phương án được xác định theo:

$$R_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \qquad (5.12)$$

trong đó i=1, 2, …, m; $0 \leq R_i \leq 1$.

Bước 7. Xếp hạng các phương án

Các phương án được xếp hạng theo giá trị R_i. Phương án có giá trị R_ilớn nhất được xem là phương án tốt nhất vì có khoảng cách gần nhất đến nghiệm lý tưởng dương và xa nhất đến nghiệm lý tưởng âm.

Trong nghiên cứu này, phương pháp TOPSIS được áp dụng để đánh giá và lựa chọn nghiệm tối ưu từ tập nghiệm Pareto thu được bởi thuật toán NSGA-II dựa trên ba tiêu chí gồm năng suất bóc tách vật liệu (MRR), độ nhám bề mặt (Ra) và lực cắt tổng hợp (F). So với các phương pháp MCDM khác, TOPSIS có ưu điểm là đơn giản, dễ triển khai và phản ánh đồng thời mức độ gần với nghiệm lý tưởng cũng như mức độ xa khỏi nghiệm không mong muốn, nhờ đó hỗ trợ hiệu quả quá trình lựa chọn nghiệm tối ưu trong bài toán đa mục tiêu.

5.3.2. Phương pháp MARCOS

MARCOS (Measurement Alternatives and Ranking according to Compromise Solution) là một phương pháp MCDM được phát triển nhằm đánh giá và xếp hạng các phương án dựa trên mức độ hữu ích tương đối của chúng so với nghiệm lý tưởng (Ideal Solution) và nghiệm phản lý tưởng (Anti-Ideal Solution). Ưu điểm của phương pháp MARCOS là xem xét đồng thời mối quan hệ giữa tất cả các phương án với cả hai nghiệm tham chiếu, từ đó nâng cao độ tin cậy của quá trình ra quyết định. Trong nghiên cứu này, phương pháp MARCOS được sử dụng để lựa chọn nghiệm tối ưu từ tập nghiệm Pareto thu được bằng thuật toán NSGA-II.

Quy trình thực hiện phương pháp MARCOS bao gồm các bước sau [115]:

Bước 1. Xây dựng ma trận quyết định ban đầu

Ma trận quyết định được biểu diễn dưới dạng:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{mn} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

trong đó m và n lần lượt là số phương án và số tiêu chí đánh giá.

Bước 2. Mở rộng ma trận quyết định

Ma trận quyết định được mở rộng bằng cách bổ sung nghiệm lý tưởng (AI) và nghiệm phản lý tưởng (AAI):

$$\begin{matrix} AAI \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \\ AI \end{matrix} = \begin{bmatrix} x_{aa1} & \cdots & x_{aan} \\ x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \\ x_{ai1} & \cdots & x_{ain} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Trong đó, $AAI = \min(x_{ij})$ và $AI = \max(x_{ij})$ đối với tiêu chí cần tối đa hóa; $AAI = \max(x_{ij})$ và $AI = \min(x_{ij})$ đối với tiêu chí cần tối thiểu hóa.

với $i = 1,2,\dots,m$ và $j = 1,2,\dots,n$.

Trong nghiên cứu này, MRR là tiêu chí cần tối đa hóa, trong khi Ra và F là các tiêu chí cần tối thiểu hóa.

Bước 3. Chuẩn hóa ma trận mở rộng

Ma trận mở rộng được chuẩn hóa để thu được ma trận: $N = [n_{ij}]_{m\times n}$ Đối với tiêu chí cần tối thiểu hóa:

$$u_{ij} = \frac{x_{AI}}{x_{ij}} \quad (5.15)$$

Đối với tiêu chí cần tối đa hóa:

$$u_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{AI}} \quad (5.16)$$

Trong nghiên cứu này, công thức (5.15) được áp dụng cho Ra và F, còn công thức (5.16) được sử dụng cho MRR.

Bước 4. Xây dựng ma trận chuẩn hóa có trọng số

Ma trận chuẩn hóa có trọng số được xác định như sau: $C = [c_{ij}]_{m\times n}$ với:

$$c_{ij} = u_{ij} \cdot w_j \quad (5.17)$$

trong đó w_j là trọng số của tiêu chí thứ j.

Bước 5. Tính độ hữu ích của các phương án

Các chỉ số độ hữu ích tương đối được xác định theo:

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{AAI}} \quad (5.18)$$

$$K_i^+ = \frac{S_i}{S_{AI}} \quad (5.19)$$

Trong đó:

$$S_i = \sum_{i=1}^{m} c_{ij} \quad (5.20)$$

là tổng các phần tử của phương án thứ i trong ma trận chuẩn hóa có trọng số.

Bước 6. Tính hàm hữu ích của các phương án

Hàm hữu ích tổng hợp của phương án thứ i được xác định theo:

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1-f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1-f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (5.21)$$

Trong đó:

$$f(K_i^-) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \quad (5.22)$$

$$f(K_i^+) = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \quad (5.23)$$

Ở đây, $f(K_i^-)$ là hàm hữu ích liên quan đến nghiệm phản lý tưởng, còn $f(K_i^+)$ là hàm hữu ích liên quan đến nghiệm lý tưởng.

Bước 7. Xếp hạng các phương án

Các phương án được xếp hạng theo giá trị $f(K_i)$. Phương án có giá trị $f(K_i)$ lớn nhất được xem là phương án tối ưu vì có mức độ hữu ích cao nhất so với nghiệm lý tưởng và nghiệm phản lý tưởng.

Trong nghiên cứu này, phương pháp MARCOS được sử dụng để đánh giá và lựa chọn nghiệm tối ưu từ tập nghiệm Pareto dựa trên ba tiêu chí gồm năng suất bóc tách vật liệu (MRR), độ nhám bề mặt (Ra) và lực cắt tổng hợp (F). So với một số phương pháp MCDM truyền thống, MARCOS có ưu điểm là đánh giá đồng thời mối quan hệ của các phương án với cả nghiệm lý tưởng và phản lý tưởng, qua đó nâng cao tính ổn định và độ tin cậy của kết quả xếp hạng.

5.3.3. Phương pháp EAMR

EAMR (Evaluation by an Area-based Method of Ranking) là một phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) được sử dụng để đánh giá và xếp hạng các phương án dựa trên giá trị đánh giá tổng hợp của các tiêu chí. Phương pháp này có ưu điểm là quy trình tính toán đơn giản, dễ triển khai và cho phép xem xét đồng thời nhiều tiêu chí có bản chất khác nhau. Trong nghiên cứu này, EAMR được sử dụng để lựa chọn nghiệm tối ưu từ tập nghiệm Pareto thu được bằng thuật toán NSGA-II.

Để áp dụng hiệu quả phương pháp EAMR, cần thực hiện tuần tự các bước sau [117]:

Bước 1. Xây dựng ma trận quyết định

Ma trận quyết định được xác định bởi:

$$X_d = \begin{bmatrix} x_{11}^d & \cdots & x_{1n}^d \\ x_{21}^d & \cdots & x_{21}^d \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1}^d & \cdots & x_{mn}^d \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

trong đó $1 \leq d \leq k$ với d là chỉ số của người ra quyết định (decision maker).

Bước 2. Tính giá trị trung bình của từng phương án

Giá trị trung bình của tiêu chí thứ j đối với phương án thứ iđược xác định theo:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{k}\left(x_{ij}^1 + x_{ij}^2 + \cdots + x_{ij}^k\right) \quad (5.25)$$

Bước 3. Xác định trọng số của các tiêu chí

Trọng số của từng tiêu chí được xác định theo phương pháp đã lựa chọn trong nghiên cứu.

Bước 4. Tính giá trị trung bình của trọng số

Trọng số trung bình của tiêu chí thứ jđược xác định bởi:

$$\bar{w}_j = \frac{1}{k}\left(w_j^1 + w_j^2 + \cdots + w_j^k\right) \quad (5.26)$$

Bước 5. Chuẩn hóa ma trận quyết định

Các phần tử chuẩn hóa được tính theo:

$$n_{ij} = \frac{\bar{x}_{ij}}{e_j} \quad (5.27)$$

Trong đó:

$$e_j = \max_{i \in \{1,\ldots,m\}} (\bar{x}_{ij}) \quad (5.28)$$

Bước 6. Xác định ma trận chuẩn hóa có trọng số

Các phần tử của ma trận chuẩn hóa có trọng số được xác định theo:

$$v_{ij} = n_{ij} \cdot \bar{w}_j \quad (5.29)$$

Bước 7. Tính điểm chuẩn hóa của các tiêu chí

Đối với các tiêu chí cần tối đa hóa:

$$G_i^+ = v_{i1}^+ + v_{i2}^+ + \cdots + v_{im}^+ \quad (5.30)$$

Đối với các tiêu chí cần tối thiểu hóa:

$$G_i^- = v_{i1}^- + v_{i2}^- + \cdots + v_{im}^- \quad (5.31)$$

Trong nghiên cứu này, năng suất bóc tách vật liệu (MRR) là tiêu chí cần tối đa hóa, trong khi độ nhám bề mặt (Ra) và lực cắt tổng hợp (F) là các tiêu chí cần tối thiểu hóa.

Bước 8. Xác định giá trị xếp hạng

Từ các giá trị G_i^+ và G_i^-, xác định giá trị xếp hạng (Ranking Value - RV) của từng phương án.

Bước 9. Tính điểm đánh giá của các phương án

Điểm đánh giá tổng hợp của phương án thứ iđược xác định theo:

$$S_i = \frac{RV(G_i^+)}{RV(G_i^-)} \quad (5.32)$$

Phương án có giá trị S_ilớn nhất được xem là phương án tối ưu.

Trong nghiên cứu này, phương pháp EAMR được sử dụng để đánh giá và lựa chọn nghiệm tối ưu từ tập nghiệm Pareto thu được bằng thuật toán NSGA-II dựa trên ba tiêu chí gồm năng suất bóc tách vật liệu (MRR), độ nhám bề mặt (Ra) và lực cắt tổng hợp (F). So với các phương pháp MCDM truyền thống, EAMR có ưu điểm là quy trình tính toán tương đối đơn giản, khả năng xử lý đồng thời các tiêu chí lợi ích và chi phí tốt, đồng thời cung cấp kết quả xếp hạng trực quan, thuận lợi cho việc lựa chọn phương án công nghệ phù hợp trong thực tế sản xuất.

5.4. Thiết lập bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu bằng NSGA-II

5.4.1 Biến đầu vào và các hàm mục tiêu

Thuật toán NSGA-II được triển khai trong môi trường MATLAB với các tham số được lựa chọn dựa trên kinh nghiệm và kiểm thử hội tụ ban đầu. Bảng 5.2 trình bày các biến đầu vào chính và miền khảo sát tương ứng được sử dụng trong bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình phay cứng thép dụng cụ 90CrSi dưới điều kiện nano-MQL (CuO).

Ba hàm mục tiêu được xét đồng thời gồm:

1. Độ nhám bề mặt (Ra) - cần tối thiểu hóa nhằm nâng cao chất lượng bề mặt gia công và đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của chi tiết.
2. Lực cắt tổng hợp (F) - cần tối thiểu hóa để giảm tải trọng tác dụng lên dụng cụ cắt, đồ gá và máy công cụ, từ đó nâng cao độ ổn định của quá trình gia công và kéo dài tuổi thọ dụng cụ..
3. Năng suất bóc tách vật liệu (MRR) - cần tối đa hóa tối đa hóa nhằm nâng cao năng suất gia công và hiệu quả kinh tế của quá trình sản xuất.

Bảng 5.2. Các biến đầu vào và miền khảo sát sử dụng trong bài toán tối ưu đa mục tiêu.

Ký hiệu	Thông số công nghệ	Đơn vị	Miền khảo sát
Dt	Đường kính dao	mm	{6, 9, 12}
vc	Tốc độ cắt	m/phút	100 – 150
fz	Lượng chạy dao răng	mm/răng	0.02 – 0.04 (Ø6); 0.04 – 0.06 (Ø9); 0.04 – 0.08 (Ø12)
ap	Chiều sâu cắt	mm	0.08 – 0.12 (Ø6); 0.10 – 0.20 (Ø9); 0.15 – 0.25 (Ø12)
Davg	Kích thước hạt nano CuO	nm	{20, 50, 100}

Do đó, bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu được mô tả như sau:

$$Minimize\ f_1(x) = R_a(D_t, v_c, f_z, a_p, D_{avg}) \quad (5.5)$$

$$Minimize\ f_2(x) = F(D_t, v_c, f_z, a_p, D_{avg}) \quad (5.6)$$

$$Maximize\ f_3(x) = MRR(D_t, v_c, f_z, a_p, D_{avg}) \quad (5.7)$$

Với

$$x = [D_t, v_c, f_z, a_p, D_{avg}] \quad (5.8)$$

5.4.2. Các ràng buộc công nghệ

Để đảm bảo kết quả tối ưu hóa có ý nghĩa thực tiễn và nằm trong phạm vi an toàn của thiết bị và dao cắt, các ràng buộc công nghệ được xác lập có dạng phương trình sau:

$$\begin{cases} 100 \le v_c \le 150 \\ 0{,}02 \le f_z \le 0{,}04\ với\ D_t = 6; 0{,}04 \le f_z \le 0{,}06\ với\ D_t = 9;\ 0.04 \le f_z \le 0.08\ với\ D_t = 12; \\ 0{,}08 \le a_p \le 0{,}12\ với\ D_t = 6; 0{,}10 \le a_p \le 0{,}20\ với\ D_t = 9; 0{,}15 \le a_p \le 0{,}25\ với\ D_t = 12; \end{cases} \quad (5.9)$$

Miền giá trị của fz và ap được giới hạn theo miền thí nghiệm của từng đường kính dao (Bảng 3.5) nhằm bảo đảm các nghiệm Pareto không nằm ngoài vùng dữ liệu thực nghiệm dùng để huấn luyện mô hình GPR

Bên cạnh đó, D_t và D_{avg} là luôn lấy các giá trị nguyên và mỗi biến chỉ có 3 giá trị. Cụ thể (5.8):

$$D_t \in \{6, 9, 12\} \text{ và } D_{avg} \in \{20, 50, 100\} \quad (5.10)$$

5.4.3. Chuyển đổi và thống nhất hướng tối ưu hóa các hàm mục tiêu

Trong nghiên cứu này, bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu bao gồm ba hàm mục tiêu với các hướng tối ưu khác nhau, cụ thể là tối thiểu hóa độ nhám bề mặt (Ra), tối thiểu hóa lực cắt tổng hợp (F) và tối đa hóa năng suất bóc tách vật liệu (MRR). Để thuận tiện cho quá trình xử lý và đánh giá nghiệm trong thuật toán NSGA-II, các hàm mục tiêu được chuyển đổi về cùng một hướng tối ưu hóa.

Do MRR là đại lượng cần tối đa hóa, trong khi Ra và F cần tối thiểu hóa, mục tiêu MRR được chuyển đổi sang dạng cực tiểu bằng cách lấy giá trị đối dấu:

$$f_3^*(x) = -MRR(x) \quad (5.11)$$

Khi đó, bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu được biểu diễn dưới dạng:

$$\text{Minimize}[Ra(x),\ F(x),\ -MRR(x)] \quad (5.12)$$

Việc chuyển đổi này không làm thay đổi bản chất của bài toán tối ưu cũng như vị trí của các nghiệm Pareto trong không gian mục tiêu, mà chỉ giúp thống nhất hướng tối ưu hóa giữa các hàm mục tiêu. Nhờ đó, các phép đánh giá nghiệm, phân hạng không trội (Non-dominated Sorting), tính toán chỉ số Hypervolume và xây dựng tập Pareto trong thuật toán NSGA-II được thực hiện một cách nhất quán và hiệu quả.

Sau khi hoàn thành quá trình tối ưu hóa, các giá trị MRR được chuyển trở lại dạng ban đầu để phục vụ việc phân tích, so sánh và đánh giá ý nghĩa công nghệ của các nghiệm Pareto thu được.

5.4.4. Thiết lập tham số của thuật toán NSGA-II

Thuật toán NSGA-II được thực hiện trong môi trường MATLAB với bộ tham số được lựa chọn nhằm bảo đảm sự cân bằng giữa khả năng hội tụ và tính đa dạng của tập nghiệm Pareto. Các tham số cài đặt chính được trình bày trong Bảng 5.3.

Bảng 5.3. Các tham số của thuật toán NSGA-II và mô hình GPR

Tham số	**Giá trị**	**Ghi chú**
MaxIt	120	Số thế hệ tiến hóa
nPop	60	Kích thước quần thể
pCrossover	0.90	Xác suất lai
nCrossover	54	Số cá thể lai = 2×round(pCrossover×nPop/2)
pMutation	0.25	Tỷ lệ tạo cá thể đột biến
nMutation	15	Số cá thể đột biến = round(pMutation×nPop)
mu	0.03	Xác suất đột biến trên từng biến thiết kế
Bước đột biến	0.1×(VarMax−VarMin)	Bước đột biến Gauss
logEvery	10	Ghi tập Pareto mỗi 10 thế hệ
nSnapshots	4	Số thế hệ dùng để biểu diễn quá trình tiến hóa Pareto
hvMC_Samples	2×10^5	Số mẫu Monte Carlo để ước lượng Hypervolume 3D
rng seed	2025 (twister)	Thiết lập bộ sinh số ngẫu nhiên
Số biến thiết kế	5	Dt, vc, fz, ap, Davg
Biến rời rạc	Dt, Davg	Được làm tròn về các giá trị có trong dữ liệu thực nghiệm
Miền tìm kiếm	Theo ràng buộc (5.9)	Miền fz, ap phụ thuộc đường kính dao (Bảng 3.5)
Hàm mục tiêu	MRR, Ra, F	Tối đa hóa MRR; tối thiểu hóa Ra và F
Surrogate model	GPR-MRR, GPR-Ra, GPR-F	Mô hình GPR dùng làm hàm mục tiêu thay thế
Kernel function	Squared exponential	Hàm nhân của mô hình GPR
Chuẩn hóa dữ liệu	Có	Standardize = true
Tối ưu siêu tham số GPR	Auto	OptimizeHyperparameters = auto
Cross-validation	5-fold	Đánh giá mô hình GPR
Chọn lọc	Tournament selection	Dựa trên rank và crowding distance
Sắp hạng Pareto	Non-dominated sorting	Phân hạng nghiệm không trội
Duy trì đa dạng	Crowding distance	Ưu tiên nghiệm có khoảng cách chen lấn lớn
Elitism	Có	Quần thể mới được chọn từ pop + offspring + mutant
Lai	Linear blend crossover	Lai tuyến tính với hệ số alpha ngẫu nhiên
Đột biến	Gaussian mutation	Đột biến Gauss có chặn trong miền tìm kiếm

5.4.5. Quy trình tối ưu hóa bằng NSGA-II

Hình 5.1 trình bày sơ đồ khối tổng quát của thuật toán NSGA-II kết hợp với các mô hình GPR được sử dụng trong nghiên cứu này. Quá trình tối ưu được thực hiện theo các bước sau:

- Khởi tạo quần thể ban đầu gồm N nghiệm ngẫu nhiên trong miền tìm kiếm xác định từ dữ liệu thực nghiệm.

- Đánh giá các hàm mục tiêu của từng nghiệm bằng các mô hình GPR đã được huấn luyện từ dữ liệu thực nghiệm, bao gồm tối đa hóa năng suất bóc tách vật liệu (MRR), tối thiểu hóa độ nhám bề mặt (Ra) và tối thiểu hóa lực cắt tổng hợp (F).

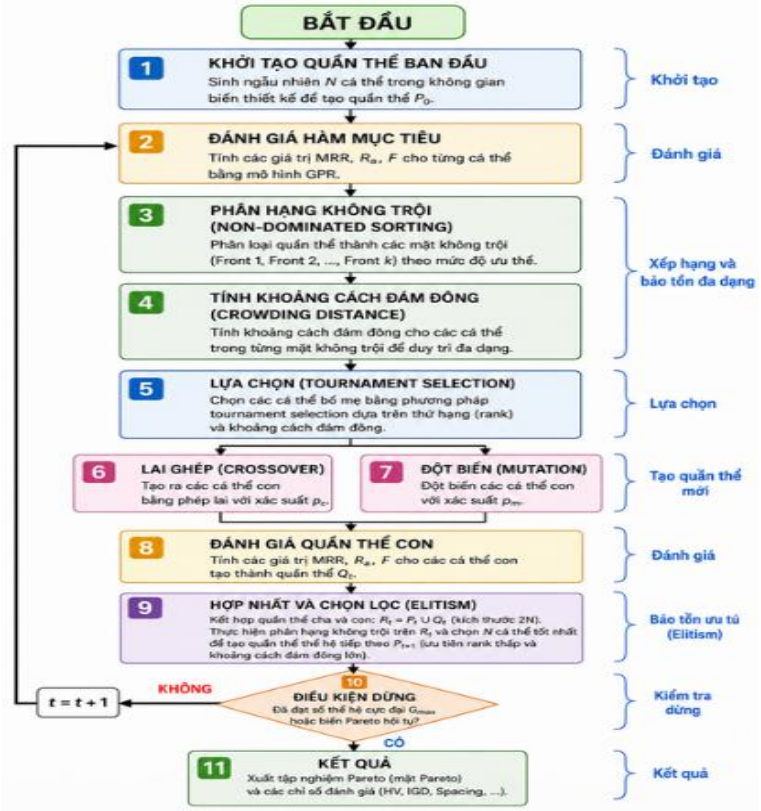
- Thực hiện phân hạng không trội (Non-dominated Sorting) để phân chia các nghiệm thành các mặt trận Pareto theo mức độ ưu tiên.

- Tính khoảng cách chen lấn (Crowding Distance) nhằm duy trì tính đa dạng của các nghiệm trên từng mặt trận Pareto.

- Thực hiện chọn lọc theo giải đấu (Tournament Selection), sau đó áp dụng các toán tử lai ghép (Crossover) và đột biến (Mutation) để tạo ra quần thể con.

- Kết hợp quần thể cha và quần thể con theo cơ chế ưu tú (Elitism), sau đó thực hiện lại quá trình phân hạng không trội và tính khoảng cách chen lấn để lựa chọn N nghiệm tốt nhất cho thế hệ tiếp theo.

- Lặp lại quá trình trên cho đến khi đạt số thế hệ cực đại Gmax. Kết quả cuối cùng là tập nghiệm Pareto tối ưu biểu diễn sự đánh đổi giữa MRR, Ra và F.



Hình 5.1: Sơ đồ khối thuật toán NSGA-II áp dụng cho bài toán tối ưu đa mục tiêu

5.4.6. Xác định nghiệm Knee trên biên Pareto

Sau khi thu được tập nghiệm Pareto bằng thuật toán NSGA-II, cần lựa chọn một nghiệm đại diện để phục vụ quá trình phân tích và so sánh với các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí. Trong tối ưu hóa đa mục tiêu, nghiệm Knee (Knee Point) thường được xem là nghiệm có mức độ đánh đổi cân bằng nhất giữa các mục tiêu. Theo Das [116], nghiệm Knee nằm tại vùng có độ lồi lớn nhất (maximum convex bulge) trên biên Pareto, nơi mà một sự cải thiện nhỏ của một mục tiêu sẽ dẫn đến sự suy giảm đáng kể của ít nhất một mục tiêu khác. Nói cách khác, đây là vùng thể hiện rõ nhất bản chất đánh đổi giữa các mục tiêu xung đột.

Das [116] chỉ ra rằng nghiệm Knee tương ứng với điểm có độ lồi lớn nhất trên biên Pareto và có thể được xác định bằng cách cực đại hóa tham số t_β:

$$\max t_\beta \tag{5.13}$$

Trong đó t_β biểu diễn khoảng cách từ nghiệm Pareto đến mặt bao các nghiệm cực trị (Convex Hull of Individual Minima - CHIM) theo hướng pháp tuyến của phương pháp NBI (Normal-Boundary Intersection). Giá trị $t_\beta$càng lớn thì mức độ lồi của biên Pareto tại điểm đó càng lớn và nghiệm tương ứng càng thể hiện rõ đặc tính Knee.

Đối với tập nghiệm Pareto rời rạc thu được từ NSGA-II trong nghiên cứu này, trước hết các hàm mục tiêu được chuyển về cùng hướng cực tiểu dưới dạng:

$$\mathrm{f}(x) = [-MRR(x),\ Ra(x),\ F(x)] \tag{5.14}$$

Tiếp theo, các mục tiêu được chuẩn hóa về miền $[0, 1]$ nhằm loại bỏ ảnh hưởng của đơn vị đo và độ lớn khác nhau giữa các mục tiêu:

$$f_{ij}^{norm} = \frac{f_{ij} - f_j^{min}}{f_j^{max} - f_j^{min}} \tag{5.15}$$

trong đó f_j^{min} và f_j^{max} lần lượt là giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của mục tiêu thứ j trong tập nghiệm Pareto.

Sau khi chuẩn hóa, ba nghiệm cực trị tương ứng với giá trị tốt nhất của từng mục tiêu được xác định để xây dựng mặt phẳng tham chiếu CHIM trong không gian mục tiêu. Khoảng cách vuông góc từ mỗi nghiệm Pareto đến mặt phẳng này được tính toán. Theo quan điểm của Das [116], nghiệm Knee là nghiệm có độ lồi lớn nhất trên biên Pareto; do đó, trong nghiên cứu này nghiệm Knee được xác định là nghiệm có khoảng cách vuông góc lớn nhất đến mặt phẳng CHIM:

$$x_{Knee} = \arg\max_i (d_i) \tag{5.16}$$

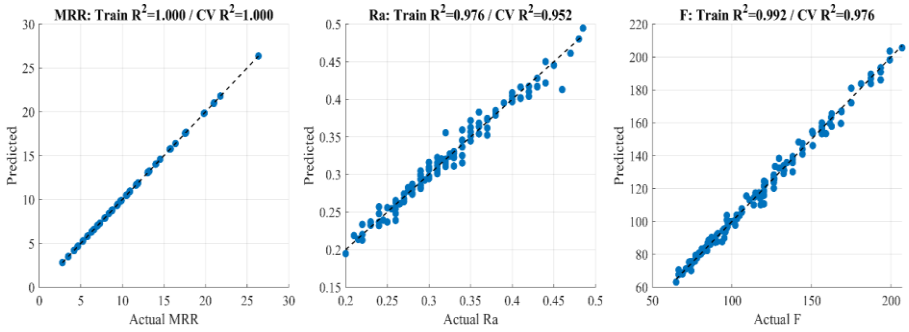
trong đó d_i là khoảng cách vuông góc từ nghiệm Pareto thứ i đến mặt phẳng CHIM trong không gian mục tiêu đã chuẩn hóa.

Cách tiếp cận này cho phép xác định nghiệm có mức độ đánh đổi nổi bật nhất giữa năng suất bóc tách vật liệu (MRR), độ nhám bề mặt (Ra) và lực cắt tổng hợp (F), đồng thời phù hợp với khái niệm nghiệm Knee được đề xuất bởi Das [116]. Nghiệm Knee thu được sẽ được sử dụng như một nghiệm tham chiếu để so sánh với các nghiệm được lựa chọn bởi các phương pháp TOPSIS, MARCOS và EAMR trong phần kết quả và thảo luận.

5.5. Kết quả và thảo luận

5.5.1. Đánh giá độ chính xác của các mô hình GPR

Độ chính xác của các mô hình GPR được đánh giá thông qua việc so sánh giá trị dự đoán với giá trị thực nghiệm của ba đáp ứng gồm năng suất bóc tách vật liệu (MRR), độ nhám bề mặt (Ra) và lực cắt tổng hợp (F). Kết quả được trình bày trong Hình 5.2.



Hình 5.2. So sánh giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm của các mô hình GPR cho MRR, Ra và F.

Kết quả cho thấy mô hình GPR dự đoán MRR đạt độ chính xác rất cao với hệ số xác định trên tập huấn luyện và tập kiểm định chéo đều đạt $R^2 = 1.000$. Đối với Ra, mô hình đạt $R^2 = 0.976$ trên tập huấn luyện và $R^2 = 0.952$ trên tập kiểm định chéo. Trong khi đó, mô hình dự đoán lực cắt F đạt $R^2 = 0.992$ trên tập huấn luyện và $R^2 = 0.976$ trên tập kiểm định chéo.

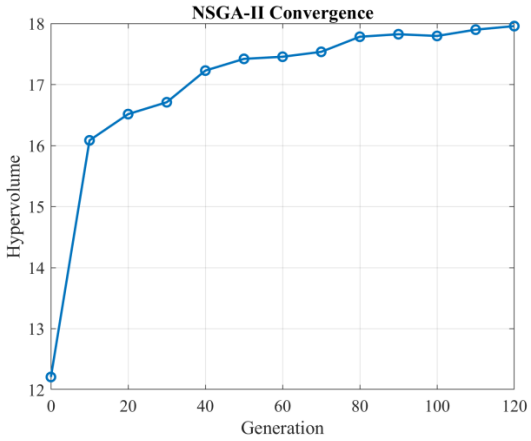
Các điểm dữ liệu trong Hình 5.2 phân bố rất gần đường lý tưởng 45°, chứng tỏ sai số dự đoán nhỏ và khả năng tổng quát hóa tốt của các mô hình GPR. Do đó, các mô hình GPR được xem là đủ tin cậy để sử dụng làm mô hình thay thế trong quá trình tối ưu hóa đa mục tiêu bằng NSGA-II.

5.5.2. Phân tích sự hội tụ của thuật toán NSGA-II

Sự hội tụ của thuật toán NSGA-II được đánh giá thông qua chỉ số Hypervolume (HV), như trình bày trong Hình 5.3.

Từ Hình 5.3 có thể thấy giá trị Hypervolume tăng rất nhanh trong giai đoạn đầu của quá trình tối ưu hóa. Giá trị HV tăng từ khoảng 12.2 ở thế hệ ban đầu lên trên 16 sau 10 thế hệ và tiếp tục tăng đến khoảng 17.2 ở thế hệ 40. Sau đó tốc độ cải thiện giảm dần và HV gần như ổn định từ khoảng thế hệ 80 trở đi.

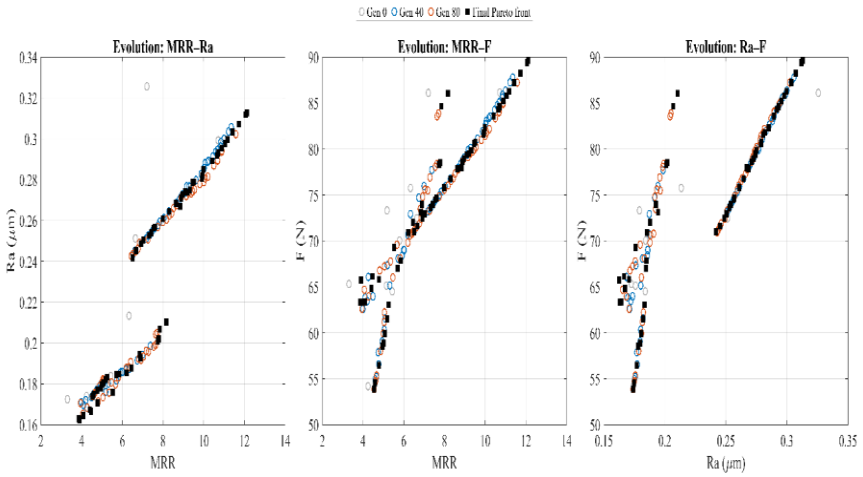
Giá trị Hypervolume cuối cùng đạt xấp xỉ 18 tại thế hệ 120. Sự thay đổi rất nhỏ của HV trong khoảng từ thế hệ 80 đến 120 cho thấy thuật toán đã đạt trạng thái hội tụ ổn định. Do đó, việc lựa chọn số thế hệ tiến hóa MaxIt = 120 được xem là phù hợp cho bài toán nghiên cứu.



Hình 5.3. Đồ thị sự thay đổi của chỉ số Hypervolume theo số thế hệ tiến hóa của thuật toán NSGA-II.

5.5.3. Sự tiến hóa của tập nghiệm Pareto

Quá trình tiến hóa của tập nghiệm Pareto được trình bày trong Hình 5.4.



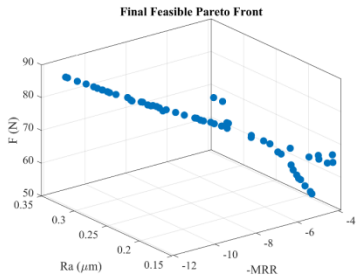
Hình 5.4. *Sự tiến hóa của tập nghiệm Pareto tại các thế hệ khác nhau của thuật toán NSGA-II.*

Ở thế hệ ban đầu, các nghiệm Pareto còn phân bố phân tán và chưa hình thành rõ ràng biên đánh đổi giữa các mục tiêu. Khi số thế hệ tăng lên, các nghiệm dần dịch chuyển về vùng tối ưu và tập trung quanh biên Pareto cuối cùng. Đặc biệt, từ khoảng thế hệ 80 trở đi, sự khác biệt giữa các tập nghiệm liên tiếp trở nên rất nhỏ.

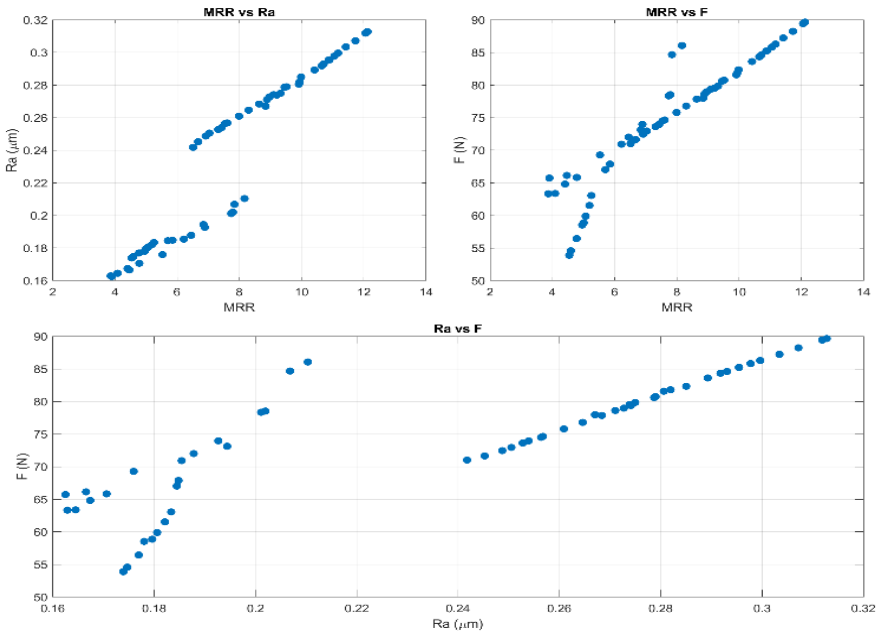
Quan sát Hình 5.4 cho thấy biên Pareto cuối cùng gần như trùng với các nghiệm thu được ở giai đoạn cuối của quá trình tiến hóa. Kết quả này phù hợp với xu hướng hội tụ của chỉ số Hypervolume trong Hình 5.3 và khẳng định rằng thuật toán NSGA-II đã hội tụ ổn định trước khi kết thúc quá trình tối ưu hóa.

5.5.4. Phân tích tập nghiệm Pareto cuối cùng

Tập nghiệm Pareto cuối cùng thu được từ thuật toán NSGA-II được thể hiện trong không gian mục tiêu ba chiều ở Hình 5.5 và trên các mặt phẳng hai chiều ở Hình 5.6.



Hình 5.5. Tập nghiệm Pareto cuối cùng trong không gian mục tiêu MRR-Ra-F.



Hình 5.6. Các quan hệ hai chiều giữa MRR, Ra và F trên biên Pareto.

Kết quả cho thấy tồn tại mối quan hệ đánh đổi rõ rệt giữa năng suất bóc tách vật liệu (MRR), độ nhám bề mặt (Ra) và lực cắt tổng hợp (F). Khi MRR tăng, cả Ra và F đều có xu hướng tăng theo. Điều này phản ánh bản chất vật lý của quá trình phay cứng, trong đó việc gia tăng lượng vật liệu bóc tách thường kéo theo sự gia tăng tải trọng cắt và ảnh hưởng bất lợi đến chất lượng bề mặt.

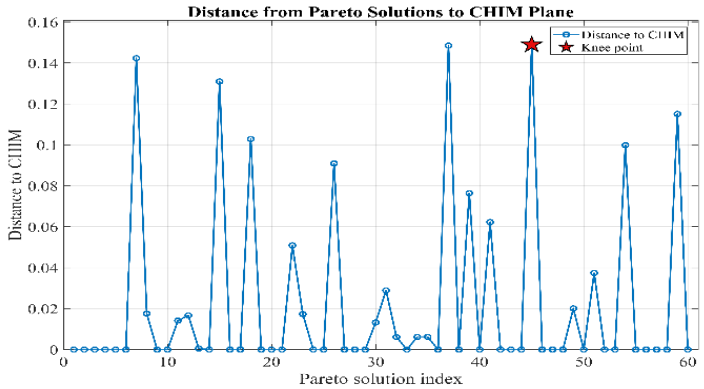
Trong tập nghiệm Pareto cuối cùng, MRR biến thiên từ khoảng 3,8 đến 12,1 g/phút. Tương ứng với sự gia tăng này, Ra tăng từ khoảng 0,16 µm lên trên 0,31 µm, trong khi F tăng từ khoảng 54 N lên gần 90 N. Các quan hệ hai chiều trong Hình 5.6 cho thấy xu hướng đánh đổi gần như đơn điệu giữa các mục tiêu, chứng tỏ không tồn tại một nghiệm tối ưu tuyệt đối đồng thời cho cả ba mục tiêu. Thay vào đó, người sử dụng cần lựa chọn một nghiệm phù hợp tùy theo mức độ ưu tiên giữa năng suất gia công, chất lượng bề mặt và lực cắt.

5.5.5. Phân tích nghiệm Knee trên biên Pareto

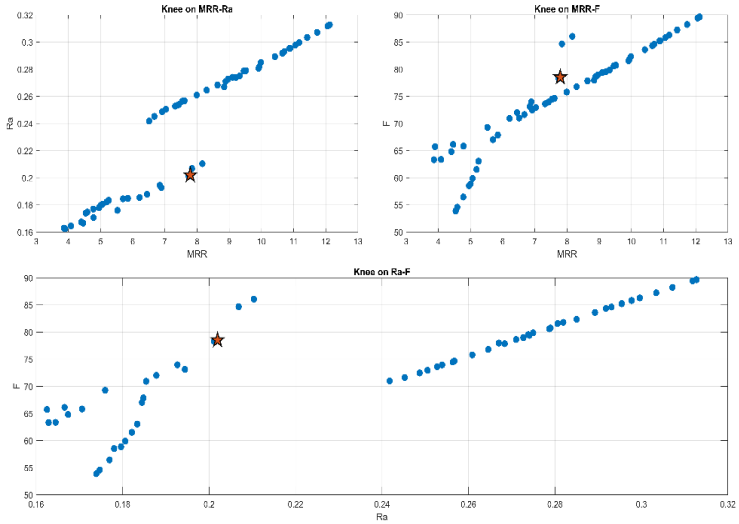
Nghiệm Knee được xác định là nghiệm Pareto có khoảng cách vuông góc lớn nhất đến mặt phẳng CHIM trong không gian mục tiêu chuẩn hóa. Kết quả được trình bày trong Hình 5.7 và Hình 5.8.

Hình 5.7 biểu diễn sự thay đổi khoảng cách từ các nghiệm Pareto đến mặt phẳng CHIM. Có thể thấy giá trị khoảng cách phân bố không đồng đều trên toàn bộ tập nghiệm Pareto. Nhiều nghiệm có khoảng cách bằng hoặc rất gần bằng 0, cho thấy chúng nằm gần mặt phẳng CHIM và không thể hiện rõ đặc tính đánh đổi giữa các mục tiêu. Ngược lại, một số nghiệm có khoảng cách lớn hơn đáng kể, phản ánh vai trò của chúng như các nghiệm đại diện cho sự cân bằng giữa các mục tiêu mâu thuẫn.

Trong số các nghiệm được khảo sát, nghiệm tại vị trí thứ 45 đạt giá trị khoảng cách lớn nhất đến mặt phẳng CHIM, xấp xỉ 0,149. Theo nguyên lý của phương pháp CHIM, đây chính là nghiệm Knee của tập Pareto, tức nghiệm thể hiện mức độ đánh đổi tốt nhất giữa ba mục tiêu gồm năng suất bóc tách vật liệu (MRR), độ nhám bề mặt (Ra) và lực cắt tổng hợp (F).



Hình 5.7. *Khoảng cách từ các nghiệm Pareto đến mặt phẳng CHIM*



Hình 5.8. Vị trí nghiệm Knee trên các mặt phẳng MRR-Ra, MRR-F và Ra-F.

Vị trí của nghiệm Knee trên các mặt phẳng mục tiêu được thể hiện trong Hình 5.8. Kết quả cho thấy nghiệm Knee có các thông số công nghệ tương ứng: Dt = 9 mm, vc = 149.51 m/phút, fz = 0.039 mm/răng, ap = 0.11 mm và Davg = 100 nm. Các đáp ứng dự đoán tương ứng đạt MRR = 7.79 g/phút, Ra = 0.202 µm và F = 78.52 N.

Có thể nhận thấy nghiệm Knee nằm ở vùng chuyển tiếp giữa nhóm nghiệm ưu tiên chất lượng bề mặt và nhóm nghiệm ưu tiên năng suất gia công. So với các nghiệm có Ra nhỏ nhất, nghiệm Knee cho giá trị MRR cao hơn đáng kể nhưng đồng thời kéo theo sự gia tăng của lực cắt. Ngược lại, so với các nghiệm có MRR lớn nhất, nghiệm Knee giúp duy trì độ nhám bề mặt và lực cắt ở mức thấp hơn. Điều này cho thấy nghiệm Knee thực sự đại diện cho vùng đánh đổi cân bằng của biên Pareto.

Tuy nhiên, trong nghiên cứu này doanh nghiệp yêu cầu độ nhám bề mặt sau gia công phải thỏa mãn điều kiện Ra ≤ 0.20 µm. Giá trị độ nhám bề mặt của nghiệm Knee đạt Ra = 0.202 µm, lớn hơn giới hạn cho phép. Mặc dù mức sai khác là rất nhỏ (khoảng 1%), nghiệm Knee vẫn không đáp ứng hoàn toàn yêu cầu công nghệ đặt ra. Vì vậy, nghiệm Knee chỉ được sử dụng như một nghiệm tham chiếu nhằm đánh giá đặc điểm hình học của biên Pareto và không được xem là nghiệm khả thi cho điều kiện sản xuất thực tế. Các nghiệm thỏa mãn điều kiện Ra ≤ 0.20 µm sẽ được tiếp tục phân tích bằng các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí trong mục tiếp theo để lựa chọn chế độ công nghệ tối ưu.

5.5.6. Lựa chọn nghiệm tối ưu bằng các phương pháp MCDM

Trong thực tế sản xuất, doanh nghiệp yêu cầu độ nhám bề mặt sau gia công không vượt quá 0.20 µm nhằm bảo đảm chất lượng bề mặt và độ chính xác của chi tiết (số liệu của Doanh nghiệp Tư nhân Cơ khí Chính xác Thái Hà, đóng tại Thái Nguyên). Do đó, sau khi thu được tập nghiệm Pareto bằng thuật toán NSGA-II (Phụ lục 2), các nghiệm có giá trị Ra > 0.20 µm được loại bỏ khỏi quá trình ra quyết định (Phụ lục 3). Tập nghiệm Pareto còn lại được sử dụng làm tập phương án đầu vào cho các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí.

Trong nghiên cứu này, ba phương pháp MCDM gồm TOPSIS, MARCOS và EAMR được áp dụng để lựa chọn nghiệm tối ưu từ tập nghiệm Pareto khả thi. Các cơ sở lý thuyết và quy trình tính toán của ba phương pháp đã được trình bày trong Mục 5.3.

Kết quả tính toán bằng phương pháp TOPSIS được trình bày trong Bảng 5.4. Phương án số 21 đạt giá trị Ri = 0,7019 lớn nhất và được xếp hạng thứ nhất. Các phương án số 22 và số 20 lần lượt được xếp hạng thứ hai và thứ ba.

Tương tự, kết quả áp dụng phương pháp MARCOS được trình bày trong Bảng 5.5. Phương án số 21 đạt giá trị f(Ki) = 0,0084 lớn nhất và được xếp hạng thứ nhất, trong khi các phương án số 22 và số 20 lần lượt được xếp hạng thứ hai và thứ ba.

Kết quả tính toán theo phương pháp EAMR được trình bày trong Bảng 5.6. Phương án số 21 đạt giá trị Si = 0,6828 lớn nhất và được xếp hạng thứ nhất. Các phương án số 22 và số 20 lần lượt được xếp hạng thứ hai và thứ ba.

Bảng 5.4. Một số kết quả tính toán và xếp hạng các phương án bằng phương pháp TOPSIS.

Trial.	kij			lij			Si+	Si-	Ri	Rank
	Ra	F	MRR	Ra	F	MRR				
1	0.1949	0.2183	0.1595	0.0648	0.0574	0.0645	0.0506	0.0146	0.2244	22
2	0.1953	0.2103	0.1581	0.0649	0.0553	0.0639	0.0507	0.0156	0.2355	21
3	0.1973	0.2104	0.1670	0.0656	0.0554	0.0676	0.0472	0.0155	0.2476	20
…										
20	0.2252	0.2391	0.2637	0.0749	0.0629	0.1067	0.0201	0.0429	0.6802	3
21	0.2311	0.2456	0.2818	0.0768	0.0646	0.1140	0.0213	0.0501	0.7019	1
22	0.2331	0.2428	0.2799	0.0775	0.0639	0.1132	0.0211	0.0493	0.7004	2

Bảng 5.5. Một số kết quả tính toán và xếp hạng các phương án bằng phương pháp MARCOS.

Trial.	K-	K+	f(K-)	f(K+)	f(Ki)	Rank
1	0.0128	0.0100	0.4385	0.5615	0.0074	22
2	0.0128	0.0100	0.4385	0.5615	0.0075	21
3	0.0130	0.0101	0.4385	0.5615	0.0076	20
…						
20	0.0142	0.0111	0.4385	0.5615	0.0082	3
21	0.0144	0.0112	0.4385	0.5615	0.0084	1
22	0.0143	0.0112	0.4385	0.5615	0.0083	2

Bảng 5.6. Một số kết quả tính toán và xếp hạng các phương án bằng phương pháp EAMR.

Trial.	nij			Vij			Gi+	Gi-	Si	Rank
	Ra	F	MRR	Ra	F	MRR				
1	0.8359	0.8886	0.5660	0.2778	0.2338	0.2290	0.5116	0.2290	0.4476	22
2	0.8378	0.8561	0.5609	0.2785	0.2252	0.2269	0.5037	0.2269	0.4505	21
3	0.8462	0.8567	0.5927	0.2812	0.2254	0.2398	0.5066	0.2398	0.4733	20
20	0.9660	0.9734	0.9358	0.3211	0.2561	0.3786	0.5772	0.3786	0.6559	3
21	0.9911	1.0000	1.0000	0.3294	0.2631	0.4046	0.5925	0.4046	0.6828	1
22	1.0000	0.9886	0.9932	0.3324	0.2601	0.4018	0.5924	0.4018	0.6782	2

Điểm đáng chú ý là cả ba phương pháp MCDM đều lựa chọn cùng một phương án tối ưu (Phương án 21). Sự đồng thuận tuyệt đối giữa TOPSIS, MARCOS và EAMR cho thấy nghiệm được lựa chọn có tính ổn định cao, đồng thời nằm rất gần nghiệm lý tưởng trong không gian đa mục tiêu. Kết quả này cũng phản ánh tính

nhất quán của quá trình ra quyết định khi áp dụng các phương pháp MCDM khác nhau trên cùng một tập nghiệm Pareto khả thi.

5.5.7. Lựa chọn nghiệm tối ưu cho điều kiện sản xuất thực tế

Kết quả phân tích trong Mục 5.5.6 cho thấy cả ba phương pháp TOPSIS, MARCOS và EAMR đều lựa chọn cùng một nghiệm tối ưu. Bảng 5.7 trình bày kết quả so sánh giữa nghiệm được lựa chọn bởi các phương pháp MCDM và nghiệm Knee.

Bảng 5.7. So sánh các nghiệm được lựa chọn bởi các phương pháp MCDM và nghiệm Knee.

Phương pháp	D_t (mm)	v_c (m/phút)	f_z (mm/răng)	a_p (mm)	D_{avg} (nm)	MRR (g/phút)	Ra (µm)	F (N)
TOPSIS	9	148.11	0.04	0.11	100	6.89	0.19	73.97
EAMR	9	148.11	0.04	0.11	100	6.89	0.19	73.97
MARCOS	9	148.11	0.04	0.11	100	6.89	0.19	73.97
Knee	9	149.51	0.039	0.11	100	7.79	0.202	78.52

Nghiệm được lựa chọn bởi cả ba phương pháp MCDM có các thông số công nghệ tương ứng gồm Dt = 9 mm, vc = 148.11 m/phút, fz = 0.038 mm/răng, ap = 0.11 mm và Davg = 100 nm. Các đáp ứng dự đoán đạt MRR = 6.89 g/phút, Ra = 0.19 µm và F = 73.97 N.

So với nghiệm Knee, nghiệm được lựa chọn bởi các phương pháp MCDM cho giá trị MRR thấp hơn khoảng 11,6%, nhưng độ nhám bề mặt giảm khoảng 5,9% và lực cắt giảm khoảng 5,8%. Quan trọng hơn, nghiệm này hoàn toàn thỏa mãn yêu cầu công nghệ Ra ≤ 0.20 µm, trong khi nghiệm Knee không đáp ứng điều kiện này.

Việc cả ba phương pháp TOPSIS, MARCOS và EAMR đều lựa chọn cùng một nghiệm tối ưu cho thấy tính nhất quán rất cao của quá trình ra quyết định. Điều này chứng minh rằng nghiệm được lựa chọn không phụ thuộc vào phương pháp MCDM cụ thể mà phản ánh đúng vùng tối ưu thực sự của tập nghiệm Pareto khả thi.

Vì vậy, nghiệm được lựa chọn cuối cùng cho điều kiện sản xuất thực tế là nghiệm đồng thời được đề xuất bởi TOPSIS, MARCOS và EAMR. Với bộ thông số công nghệ này, quá trình gia công đạt được sự cân bằng hợp lý giữa năng suất bóc tách vật liệu, chất lượng bề mặt và lực cắt, đồng thời đáp ứng đầy đủ các yêu cầu công nghệ của doanh nghiệp. Nghiệm này sẽ được sử dụng trong mục tiếp theo để tiến hành kiểm chứng thực nghiệm.

5.5.8. Kiểm chứng thực nghiệm

Để đánh giá độ tin cậy của kết quả tối ưu hóa, thí nghiệm kiểm chứng được thực hiện tại chế độ công nghệ tương ứng với nghiệm tối ưu được lựa chọn đồng thời bởi ba phương pháp MCDM gồm TOPSIS, MARCOS và EAMR. Đây là nghiệm được xác định là phù hợp nhất cho điều kiện sản xuất thực tế, đồng thời thỏa mãn yêu cầu về độ nhám bề mặt của doanh nghiệp (Ra ≤ 0.20 µm).

Các thông số công nghệ sử dụng trong thí nghiệm kiểm chứng gồm $D_t = 9\,mm$, $v_c = 148.11\,m/phút$, $f_z = 0.038\,mm/răng$, $a_p = 0.11\,mm$ và $D_{avg} = 100\,nm$. Giá trị dự đoán của các đáp ứng MRR, Ra và F được xác định từ các mô hình GPR, sau đó được đối chiếu với kết quả đo thực nghiệm. Kết quả so sánh được trình bày trong Bảng 5.8.

Bảng 5.8. So sánh giữa giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm tại chế độ công nghệ tối ưu được lựa chọn bởi phương pháp EAMR.

Mục tiêu	**Giá trị tính toán**	**Giá trị thực nghiệm**	**Sai số (%)**
MRR (g/phút)	6.89	6.78	1.60
Ra (μm)	0.19	0.18	5.26
F (N)	73.97	71.24	3.68

Kết quả trong Bảng 5.8 cho thấy giá trị thực nghiệm thu được có sự phù hợp tốt với các giá trị dự đoán từ mô hình GPR. Sai số tương đối của năng suất bóc tách vật liệu chỉ đạt 1,60%, trong khi sai số của lực cắt tổng hợp đạt 3,68%. Đối với độ nhám bề mặt, sai số lớn nhất cũng chỉ ở mức 5,26%. Tất cả các sai số đều nhỏ hơn 6%, cho thấy độ chính xác cao của các mô hình dự đoán được xây dựng.

Đáng chú ý, giá trị độ nhám bề mặt thực nghiệm đạt 0.18 μm, thấp hơn giá trị dự đoán và đồng thời thấp hơn giới hạn yêu cầu Ra ≤ 0.20 μm của doanh nghiệp. Bên cạnh đó, lực cắt thực nghiệm cũng thấp hơn khoảng 3,7% so với giá trị dự đoán. Điều này cho thấy nghiệm tối ưu được lựa chọn không chỉ đáp ứng yêu cầu về chất lượng bề mặt mà còn góp phần giảm tải trọng cắt trong quá trình gia công.

Nhìn chung, kết quả kiểm chứng thực nghiệm đã xác nhận tính chính xác của các mô hình GPR, hiệu quả của thuật toán NSGA-II trong việc xây dựng tập nghiệm Pareto và độ tin cậy của các phương pháp MCDM trong quá trình lựa chọn chế độ công nghệ tối ưu. Nghiệm được lựa chọn cho phép đạt được sự cân bằng hợp lý giữa năng suất bóc tách vật liệu, chất lượng bề mặt và lực cắt, đồng thời đáp ứng đầy đủ các yêu cầu công nghệ trong điều kiện sản xuất thực tế.

Kết luận chương 5

1. Đã thực hiện tối ưu hóa đa mục tiêu quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi dưới điều kiện nano-MQL sử dụng hạt CuO trên cơ sở các mô hình dự đoán được xây dựng từ phương pháp Gaussian Process Regression (GPR).

2. Kết quả đánh giá cho thấy các mô hình GPR xây dựng cho ba đáp ứng gồm năng suất bóc tách vật liệu (MRR), độ nhám bề mặt (Ra) và lực cắt tổng hợp (F) đều đạt độ chính xác cao, với các giá trị dự đoán phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm. Điều này khẳng định khả năng sử dụng các mô hình GPR như mô hình thay thế trong quá trình tối ưu hóa đa mục tiêu.

3. Trên cơ sở các mô hình GPR, bài toán tối ưu hóa đồng thời ba mục tiêu gồm đó cực đại hóa MRR, cực tiểu hóa Ra và cực tiểu hóa F đã được giải bằng thuật toán NSGA-II. Kết quả cho thấy thuật toán hội tụ ổn định, thể hiện qua sự gia tăng liên tục của chỉ số Hypervolume và sự ổn định của biên Pareto từ khoảng thế hệ thứ 80 trở đi. Tập nghiệm Pareto cuối cùng phản ánh rõ mối quan hệ đánh đổi giữa năng suất gia công, chất lượng bề mặt và lực cắt trong quá trình phay cứng.

4. Nghiệm Knee được xác định bằng phương pháp khoảng cách cực đại đến mặt phẳng CHIM trong không gian mục tiêu chuẩn hóa. Nghiệm này có các thông số công nghệ Dt = 9 mm, vc = 149.51 m/phút, fz = 0.039 mm/răng, ap = 0.11 mm và Davg = 100 nm, với các đáp ứng tương ứng MRR = 7.79 g/phút, Ra = 0.202 μm và F = 78.52 N. Mặc dù nghiệm Knee thể hiện sự cân bằng hình học trên biên Pareto, giá trị Ra vượt nhẹ giới hạn yêu cầu của doanh nghiệp (Ra ≤ 0.20 μm), do đó không được lựa chọn cho ứng dụng thực tế.

5. Sau khi loại bỏ các nghiệm không thỏa mãn điều kiện Ra ≤ 0.20 μm, các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí TOPSIS, MARCOS và EAMR được áp dụng để lựa chọn nghiệm tối ưu từ tập nghiệm Pareto khả thi. Kết quả cho thấy cả ba phương pháp đều lựa chọn cùng một phương án tối ưu, chứng tỏ tính ổn định và độ tin cậy cao của quá trình ra quyết định. Nghiệm tối ưu thu được có các thông số công nghệ D_t = 9 mm, v_c = 148.11 m/phút, f_z = 0.038 mm/răng, a_p = 0.11 mm và D_{avg} = 100 nm. Các giá trị dự đoán tương ứng đạt MRR = 6.89 g/phút, Ra = 0.19 μm và F = 73.97 N.

6. Kết quả kiểm chứng thực nghiệm tại chế độ công nghệ tối ưu cho thấy các giá trị đo được gồm MRR = 6.78 g/phút, Ra = 0.18 μm và F = 71.24 N. Sai số tương đối giữa giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm lần lượt là 1,60%, 5,26% và 3,68%. Các sai số đều nhỏ hơn 6%, khẳng định độ chính xác của các mô hình GPR, hiệu quả của thuật toán NSGA-II trong xây dựng tập nghiệm Pareto và tính phù hợp của các phương pháp MCDM trong lựa chọn chế độ công nghệ tối ưu.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Luận án đã nghiên cứu một cách có hệ thống quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi dưới điều kiện bôi trơn – làm mát nano-MQL sử dụng hạt nano CuO, từ đó xây dựng các mô hình dự đoán và đề xuất phương pháp tối ưu hóa chế độ gia công. Trên cơ sở các kết quả đạt được, có thể rút ra các kết luận chính như sau:

- Luận án đã xây dựng thành công hệ thống thực nghiệm phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi trên trung tâm phay CNC Mazak VCS 530C kết hợp với hệ thống nano-MQL sử dụng hạt CuO. Thiết kế thí nghiệm Box–Behnken có phân khối được áp dụng để khảo sát đồng thời ảnh hưởng của các thông số công nghệ gồm đường kính dao, tốc độ cắt, lượng chạy dao trên răng, chiều sâu cắt và kích thước hạt nano đến các chỉ tiêu đầu ra là độ nhám bề mặt (Ra), lực cắt tổng hợp (F) và năng suất bóc tách vật liệu (MRR). Bộ dữ liệu thực nghiệm thu được có độ tin cậy cao và đủ khả năng phản ánh quy luật của quá trình gia công.

- Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến các chỉ tiêu đầu ra đã được làm rõ. Kết quả cho thấy lượng chạy dao trên răng và chiều sâu cắt là các yếu tố có ảnh hưởng mạnh đến MRR và lực cắt, trong khi độ nhám bề mặt chịu ảnh hưởng đáng kể bởi lượng chạy dao và đường kính dao. Kích thước hạt nano CuO tuy không phải là yếu tố chi phối riêng lẻ nhưng có tác động thông qua các tương tác với điều kiện cắt và hình học dụng cụ.

- Các mô hình hồi quy bề mặt đáp ứng (RSM) bậc hai đã được xây dựng thành công cho ba đại lượng đầu ra gồm Ra, MRR và F. Các mô hình đều đạt ý nghĩa thống kê và có khả năng mô tả tốt mối quan hệ giữa các biến đầu vào và đầu ra trong miền khảo sát, đồng thời cho phép phân tích ảnh hưởng riêng lẻ cũng như ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố công nghệ.

- Đã xây dựng thành công các mô hình Gaussian Process Regression (GPR) để dự đoán năng suất bóc tách vật liệu (MRR), độ nhám bề mặt (Ra) và lực cắt tổng hợp (F). Kết quả đánh giá cho thấy các mô hình GPR có độ chính xác cao, với các giá trị dự đoán phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm. Điều này khẳng định khả năng sử dụng GPR như mô hình thay thế hiệu quả cho quá trình tối ưu hóa đa mục tiêu trong gia công cơ khí.

- Bài toán tối ưu hóa đơn mục tiêu đã được giải quyết thành công đối với từng chỉ tiêu Ra, MRR và F. Kết quả cho thấy các nghiệm tối ưu thu được có sự khác biệt rõ rệt, phản ánh bản chất mâu thuẫn giữa chất lượng bề mặt, lực cắt và năng suất gia công.

- Đã thiết lập và giải thành công bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu đồng thời cực đại hóa MRR, cực tiểu hóa Ra và cực tiểu hóa F bằng thuật toán NSGA-II. Kết quả cho thấy thuật toán hội tụ ổn định, thể hiện qua sự gia tăng liên tục của chỉ số Hypervolume và sự ổn định của biên Pareto từ khoảng thế hệ thứ 80 trở đi. Tập nghiệm Pareto cuối cùng phản ánh rõ mối quan hệ đánh đổi giữa năng suất gia công, chất lượng bề mặt và lực cắt trong quá trình phay cứng dưới điều kiện nano-MQL.

- Đã xác định nghiệm Knee trên biên Pareto bằng phương pháp khoảng cách cực đại đến mặt phẳng CHIM trong không gian mục tiêu chuẩn hóa. Nghiệm Knee thu được có các thông số công nghệ D_t = 9 mm, v_c = 149.51 m/phút, f_z = 0.039 mm/răng, a_p = 0.11 mm và D_{avg} = 100 nm, tương ứng với các đáp ứng MRR = 7.79 g/phút, Ra = 0.202 µm và F = 78.52 N. Tuy nhiên, do giá trị Ra vượt nhẹ giới hạn công nghệ đặt ra (Ra ≤ 0.20 µm), nghiệm này chỉ được sử dụng như một nghiệm tham chiếu trong quá trình phân tích biên Pareto.

- Đã áp dụng các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí TOPSIS, MARCOS và EAMR để lựa chọn nghiệm tối ưu từ tập nghiệm Pareto khả thi sau khi loại bỏ các nghiệm có Ra > 0,20 µm. Kết quả cho thấy cả ba phương pháp đều lựa chọn cùng một nghiệm tối ưu, chứng tỏ tính ổn định và độ tin cậy cao của quá trình ra quyết định. Nghiệm tối ưu thu được có các thông số công nghệ D_t = 9 mm, v_c = 148.11 m/phút, f_z = 0.038 mm/răng, a_p = 0.11 mm và D_{avg} = 100 nm. Các đáp ứng dự đoán tương ứng đạt MRR = 6.89 g/phút, Ra = 0.19 µm và F = 73.97 N.

- Đã tiến hành kiểm chứng thực nghiệm đối với nghiệm tối ưu được lựa chọn bởi các phương pháp MCDM. Kết quả thực nghiệm thu được gồm MRR = 6.78 g/phút, Ra = 0,18 µm và F = 71.24 N. Sai số tương đối giữa giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm lần lượt là 1,60%, 5,26% và 3,68%, đều nhỏ hơn 6%. Kết quả này khẳng định độ chính xác của các mô hình GPR, hiệu quả của thuật toán NSGA-II trong tối ưu hóa đa mục tiêu và tính phù hợp của các phương pháp MCDM trong lựa chọn chế độ công nghệ tối ưu cho điều kiện sản xuất thực tế.

Nhìn chung, luận án đã đề xuất thành công một quy trình tích hợp giữa thực nghiệm, mô hình hóa bằng GPR, tối ưu hóa đa mục tiêu bằng NSGA-II và ra quyết định đa tiêu chí bằng các phương pháp MCDM để giải quyết bài toán lựa chọn chế độ công nghệ trong phay cứng dưới điều kiện nano-MQL. Kết quả nghiên cứu không chỉ có ý nghĩa khoa học trong lĩnh vực tối ưu hóa quá trình gia công mà còn có giá trị thực tiễn trong việc nâng cao năng suất, chất lượng bề mặt và hiệu quả sản xuất trong ngành cơ khí chế tạo.

2. Hướng nghiên cứu tiếp

Từ các kết quả đạt được, một số hướng nghiên cứu tiếp theo được đề xuất như sau:

- Mở rộng nghiên cứu đối với các loại hạt nano khác hoặc nanofluid lai nhằm so sánh và đánh giá hiệu quả bôi trơn - làm mát trong quá trình phay cứng thép 90CrSi.

- Nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ hạt nano CuO đến độ nhám bề mặt, lực cắt, nhiệt độ vùng cắt, mòn dụng cụ và năng suất gia công để xác định nồng độ tối ưu.

- Bổ sung các chỉ tiêu đầu ra khác như nhiệt độ vùng cắt, mòn dụng cụ, ứng suất dư hoặc tính toàn vẹn bề mặt nhằm xây dựng mô hình đánh giá toàn diện hơn cho quá trình phay cứng.

- Nghiên cứu kết hợp nano-MQL với các công nghệ hỗ trợ khác như rung siêu âm, khí lạnh hoặc cryogenic-MQL nhằm nâng cao hơn nữa hiệu quả gia công.

- Tiếp tục phát triển các mô hình dự đoán dựa trên học máy và trí tuệ nhân tạo, đồng thời mở rộng các bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu theo hướng tích hợp các tiêu chí về năng lượng, chi phí và tính bền vững của quá trình sản xuất.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN HƯỚNG NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN VĂN

1. Dinh Van Thanh, Hoang Van Got, Vu Ngoc Pi, Do The Vinh, and **Hoang Anh Toan***. "Response Surface Modeling and Optimization of Cutting Force in External Cylindrical Hard Milling of 90CrSi Tool Steel under CuO Nano-MQL". WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics **(Scopus Q3)**. Đã được chấp nhận đăng (Accepted), tháng 11 năm 2025.

2. Trần Quốc Hùng, Hoàng Văn Gợt, Đỗ Thế Vinh, Vũ Ngọc Pi, và **Hoàng Anh Toàn*.**"Surface Roughness Modeling and Parameter Influence in Nano-MQL Milling Process". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Số 329, tháng 6 năm 2025, ISSN 2615-9910 (bản in), ISSN 2815-5505 (online).

3. Lưu Anh Tùng, Hoàng Văn Gợt, Đỗ Thế Vinh, Vũ Ngọc Pi, và **Hoàng Anh Toàn***. "MRR Optimization in Nano-MQL Milling of Hardened 90CrSi Tool Steel Using CuO Nanoparticles". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Số 329, tháng 6 năm 2025, ISSN 2615-9910 (bản in), ISSN 2815-5505 (online).

4. **Toan Hoang Anh***, Thanh Dinh Van, Got Hoang Van, Vinh Do The, and Pi Vu Ngoc. "Statistical Modeling and Optimization of Surface Roughness in Nano-MQL Milling of Hardened 90CrSi Cylindrical Surfaces". In: Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications (ICERA 2025), tháng 12 năm 2025 **(Scopus Q4)**. (Báo cáo tại hội thảo quốc tế).

5. **Toan Hoang Anh*,** Got Hoang Van, Vinh Do The, Pi Vu Ngoc, and Thanh Dinh Van. "Enhanced MRR in Hard Milling Using CuO Nano-Lubricants: Experimental and RSM-Based Modeling Study". In: Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications (ICERA 2025), tháng 12 năm 2025 **(Scopus Q4)**. (Báo cáo tại hội thảo quốc tế).

6. Nguyen Anh Tuan, Hoang Van Got, Do The Vinh, Vu Ngoc Pi, **Hoang Anh Toan*.**"Pareto-Based Multi-Objective Optimization and Trade Off Analysis of Material Removal Rate and Surface Roughness in CuO Nano-MQL Hard Milling of 90CrSi Tool Steel". In: Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications (ICERA 2026), năm 2026 (Scopus Q4). (Báo cáo tại hội thảo quốc tế).

7. Nguyen Anh Tuan, Hoang Van Got, Do The Vinh, Vu Ngoc Pi, **Hoang Anh Toan*.**"Multi-Objective Optimization of Hard Milling of Hardened 90CrSi Tool Steel under CuO Nano-MQL Using Gaussian Process Regression and NSGA-II" . In: Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications (ICERA 2026), năm 2026 (Scopus Q4). (Báo cáo tại hội thảo quốc tế).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Mickelson, D., *Guide to hard milling and high speed machining*. 2006: Industrial Press.

[2] Davim, J.P., *Machining of hard materials*. 2011: Springer Science & Business Media.

[3] Fallböhmer, P., et al., *High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing.* Journal of Materials Processing Technology, 2000. **98**(1): p. 104-115.

[4] Wojciechowski, S., et al., *Modeling of cutter displacements during ball end milling of inclined surfaces.* Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015. **15**(4): p. 798-805.

[5] Shaw, M. and A. Vyas, *The mechanism of chip formation with hard turning steel.* CIRP Annals, 1998. **47**(1): p. 77-82.

[6] Grzesik, W., *Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools.* Wear, 2008. **265**(3-4): p. 327-335.

[7] Bosheh, S. and P.T. Mativenga, *White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006. **46**(2): p. 225-233.

[8] Brinksmeier, E., et al., *Residual stresses—measurement and causes in machining processes.* CIRP annals, 1982. **31**(2): p. 491-510.

[9] König, W., M. Klinger, and R. Link, *Machining hard materials with geometrically defined cutting edges—field of applications and limitations.* CIRP Annals, 1990. **39**(1): p. 61-64.

[10] Klocke, F. and G. Eisenblätter, *Dry cutting.* Cirp Annals, 1997. **46**(2): p. 519-526.

[11] Itoigawa, F., et al., *Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy.* Wear, 2006. **260**(3): p. 339-344.

[12] Maruda, R.W., et al., *A study on droplets sizes, their distribution and heat exchange for minimum quantity cooling lubrication (MQCL).* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016. **100**: p. 81-92.

[13] Mali, T., J. Shinde, and D. Khankal, *Minimum Quantity Lubrication in Machining A Review.* International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology, 2019: p. 1-3.

[14] Khan, M., M. Mithu, and N.R. Dhar, *Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid.* Journal of materials processing Technology, 2009. **209**(15-16): p. 5573-5583.

[15] Wu, S., et al., *High-speed milling of hardened steel under minimal quantity lubrication with liquid nitrogen.* Journal of Manufacturing Processes, 2023. **95**: p. 351-368.

[16] Shokoohi, Y., E. Khosrojerdi, and B.R. Shiadhi, *Machining and ecological effects of a new developed cutting fluid in combination with different cooling techniques on turning operation.* Journal of Cleaner Production, 2015. **94**: p. 330-339.

[17] Pereira, O., et al., *Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304.* Journal of Cleaner Production, 2016. **139**: p. 440-449.

[18] Ali, S.H., et al., *Recent developments in MQL machining of aeronautical materials: A comparative review.* Chinese Journal of Aeronautics, 2025. **38**(1): p. 102918.

[19 Bhowmik, A., et al., *A comprehensive review on the viability of minimum quantity lubrication technology for machining difficult-to-cut alloys.* AIP Advances, 2025. **15**(3).

[20] Balasuadhakar, A., S.T. Kumaran, and F. Ahmed, *A review on the role of nanoparticles in MQL machining.* Materials Today: Proceedings, 2023. **72**: p. 2828-2832.

[21] Chinchanikar, S., S.S. Kore, and P. Hujare, *A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining.* Journal of Manufacturing Processes, 2021. **68**: p. 56-70.

[22] Panda, D., K. Kumari, and N. Dalai, *Performance of Minimum Quantity Lubrication (MQL) and its effect on Dry Machining with the addition of Nano-particle with the biodegradable base fluids: A review.* Materials Today: Proceedings, 2022. **56**: p. 1298-1301.

[23] Altaf, S.F., et al., *Machining with minimum quantity lubrication and nano-fluid MQL: A review.* Tribology Online, 2024. **19**(3): p. 209-217.

[24] Jadhav, P.K., et al., *Multi-objective optimization of EN19 steel milling parameters using Taguchi, ANOVA, and TOPSIS approaches.* Journal of Alloys and Metallurgical Systems, 2024. **7**: p. 100102.

[25] Cica, D., et al., *Multi-objective optimization of hard milling using Taguchi based grey relational analysis.* Tehnički vjesnik, 2020. **27**(2): p. 513-519.

[26] Ceritbinmez, F. and E. Kanca, *The Effects of Cutting Parameters Used in Milling X153CrMoV12 Cold Work Tool Steel by End Mills on Surface Roughness and Hardness of The Workpiece.* Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 2022. **10**(1): p. 27-38.

[27] Gutnichenko, O., et al., *Analysis and monitoring the initial tool damage and coating failure when hard milling Vanadis 4E with TiAlN coated PcBN.* Procedia CIRP, 2025. **133**: p. 322-327.

[28] Saidur, R., K. Leong, and H.A. Mohammed, *A review on applications and challenges of nanofluids.* Renewable and sustainable energy reviews, 2011. **15**(3): p. 1646-1668.

[29] Dong, P.Q., T.M. Duc, and T.T. Long, *Performance evaluation of MQCL hard milling of SKD 11 tool steel using MoS2 nanofluid.* Metals, 2019. **9**(6): p. 658.

[30] Tran Minh Duc, T.T.L., *Investigation of rapeseed oil–based nanofluid on hard machining performance under minimum quantity lubrication environment.* International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES), 2022. **10**(6): p. 4.

[31] Yuan, S., et al., *Experimental investigation on the compatibility of nanoparticles with vegetable oils for nanofluid minimum quantity lubrication machining.* Tribology Letters, 2018. **66**(3): p. 106.

[32] Setti, D., et al., *Performance evaluation of Ti–6Al–4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015. **88**: p. 237-248.

[33] Duc, T., N. Tuan, and T. Long, *Optimization of Al2O3 nanoparticle concentration and cutting parameters in hard milling under nanofluid MQL environment. Adv Mech Eng. 2024; 16: 16878132241257114*.

[34] Huang, W., et al., *Surface integrity optimization for ball-end hard milling of AISI D2 steel based on response surface methodology.* Plos one, 2023. **18**(8): p. e0290760.

[35] Gaitonde, V.N., et al., *Machinability evaluation in hard milling of AISI D2 steel.* Materials research, 2016. **19**(2): p. 360-369.

[36] Li, B., et al., *Modelling of phase transformations induced by thermo-mechanical loads considering stress-strain effects in hard milling of AISI H13 steel.* International Journal of Mechanical Sciences, 2018. **149**: p. 241-253.

[37] Zhang, Q., S. Zhang, and J. Li, *Three dimensional finite element simulation of cutting forces and cutting temperature in hard milling of AISI H13 steel.* Procedia Manufacturing, 2017. **10**: p. 37-47.

[38] Rech, J., et al., *Characterisation of friction and heat partition coefficients at the tool-work material interface in cutting.* CIRP Annals, 2013. **62**(1): p. 79-82.

[39] Liu, Z., et al., *Energy consumption characteristics in finish hard milling of tool steels.* Procedia Manufacturing, 2015. **1**: p. 477-486.

40] Sealy, M., et al., *Energy consumption and modeling in precision hard milling.* Journal of Cleaner Production, 2016. **135**: p. 1591-1601.

[41] Sealy, M., et al., *Energy based process signature for surface integrity in hard milling.* Journal of Materials Processing Technology, 2016. **238**: p. 284-289.

[42] Liu, Z. and Y. Guo, *A hybrid approach to integrate machine learning and process mechanics for the prediction of specific cutting energy.* CIRP Annals, 2018. **67**(1): p. 57-60.

[43] Beruvides, G., et al., *Coping with complexity when predicting surface roughness in milling processes: hybrid incremental model with optimal parametrization.* Complexity, 2017. **2017**(1): p. 7317254.

[44] Krajinović, I., et al., *Finite element study of the influence of hard coatings on hard metal tool loading during milling.* Surface and Coatings Technology, 2016. **304**: p. 134-141.

[45] Beake, B., et al., *Wear performance of different PVD coatings during hard wet end milling of H13 tool steel.* Surface and Coatings Technology, 2015. **279**: p. 118-125.

[46] An, Q., et al., *Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool.* International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014. **43**: p. 94-101.

[47] Jayakumar, K. and P.A. Rahman, *Effect of end milling parameters on MRR and hardness variation of AA7075.* Materials Today: Proceedings, 2023. **72**: p. 2212-2216.

[48] Lu, X., et al., *Cutting parameters optimization for MRR under the constraints of surface roughness and cutter breakage in micro-milling process.* Journal of Mechanical Science and Technology, 2018. **32**(7): p. 3379-3388.

[49] Tamilarasan, A., D. Rajamani, and A. Renugambal, *An approach on fuzzy and regression modeling for hard milling process.* Applied Mechanics and Materials, 2015. **813**: p. 498-504.

[50] Moayyedian, M., et al., *Surface roughness analysis in milling machining using design of experiment.* SN Applied Sciences, 2020. **2**(10): p. 1698.

[51] Iqbal, A., et al., *Optimizing cutting parameters in minimum quantity of lubrication milling of hardened cold work tool steel.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009. **223**(1): p. 43-54.

[52] Mia, M., et al., *Optimization of MQL flow rate for minimum cutting force and surface roughness in end milling of hardened steel (HRC 40).* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **89**(1): p. 675-690.

[53] Kanchana, J., et al., *Multi response optimization of process parameters using grey relational analysis for milling of hardened Custom 465 steel.* Procedia Manufacturing, 2019. **30**: p. 451-458.

[54] Xu, J., et al., *Multiobjective Optimization of Milling Parameters for Ultrahigh-Strength Steel AF1410 Based on the NSGA-II Method.* Advances in Materials Science and Engineering, 2020. **2020**(1): p. 8796738.

[55] Mukkoti, V.V., et al., *Optimization of process parameters in CNC milling of P20 steel by cryo-treated tungsten carbide tools using NSGA-II.* Production & Manufacturing Research, 2020. **8**(1): p. 291-312.

[56] Mugilan, T., N. Sridhar, and G. Sathishkumar, *Multi response hybrid optimization of sustainable high-speed end milling on 89.7 Ti-6Al-4V.* Materials Today: Proceedings, 2022. **65**: p. 3170-3176.

[57] Kumar, S., P. Chandna, and G. Bhushan, *Minimization of work piece temperature under the constraints of SR and MRR during 2.5 D milling process of Inconel 625 using GEMG-fuzzy and GA.* Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 2022. **5**(2): p. 167-182.

[58] Pedrammehr, S., et al., *Machine learning-based modelling and meta-heuristic-based optimization of specific tool wear and surface roughness in the milling process.* Axioms, 2022. **11**(9): p. 430.

[59] Aslan, A., *Machine learning models and machinability analysis for comparison of various cooling and lubricating mediums during milling of Hardox 400 steel.* Tribology International, 2024. **198**: p. 109860.

[60] Danish, M., et al., *Machine learning models for prediction and classification of tool wear in sustainable milling of additively manufactured 316 stainless steel.* Results in Engineering, 2024. **22**: p. 102015.

[61] Nguyen, Q.-M. and T.-V. Do, *Optimal approaches for hard milling of SKD11 steel under MQL conditions using SIO2 nanoparticles.* Advances in Materials Science and Engineering, 2022. **2022**(1): p. 2627522.

[62] Do, T. and T. Phan, *Multi-objective optimization of surface roughness and MRR in milling of hardened SKD 11 steel under nanofluid MQL condition.* International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2021. **10**(7): p. 357-362.

[63] Pu, Z. and A. Singh, *High speed ball nose end milling of hardened AISI A2 tool steel with PCBN and coated carbide tools.* Journal of Manufacturing Processes, 2013. **15**(4): p. 467-473.

[64] Gaitonde, V.N., et al., *Machinability evaluation in hard milling of AISI D2 steel.* Materials research, 2016. **19**: p. 360-369.

[65] Caliskan, H., E. Altas, and P. Panjan, *Study of nanolayer AlTiN/TiN coating deposition on cemented carbide and its performance as a cutting tool.* Journal of Nano Research, 2017. **47**: p. 1-10.

[66] Faga, M., et al., *AlSiTiN nanocomposite coatings developed via Arc Cathodic PVD: Evaluation of wear resistance via tribological analysis and high speed machining operations.* Wear, 2007. **263**(7-12): p. 1306-1314.

[67] Tymczyszyn, J., A. Szajna, and G. Mrówka-Nowotnik, *Influence of Nanocomposite PVD Coating on Cutting Tool Wear During Milling of 316L Stainless Steel Under Air Cooling Conditions.* Materials, 2025. **18**(9): p. 1959.

[68] Zhang, S., et al., *Structural optimisation and synthesis of multilayers and nanocomposite AlCrTiSiN coatings for excellent machinability.* Surface and Coatings Technology, 2015. **277**: p. 23-29.

[69] Do, T.-V. and N.-A.-V. Le. *Optimization of surface roughness and cutting force in MQL hard-milling of AISI H13 steel*. in *International Conference on Engineering Research and Applications*. 2018. Springer.

[70] Trung, D., *Influence of cutting parameters on surface roughness during milling AISI 1045 steel.* Tribology in Industry, 2020. **42**(4): p. 658.

[71] Le, T., V.-B. Pham, and T. Hoang, *Surface finish comparison of dry and coolant fluid high-speed milling of JIS SDK61 mould steel.* Engineering, Technology & Applied Science Research, 2022. **12**(1): p. 8023-8028.

[72] Hoang, T.D., et al., *Cutting Forces and Surface Roughness in Face-Milling of SKD61 Hard Steel.* Journal of Mechanical Engineering/Strojniški Vestnik, 2019. **65**(6).

[73] Do, T.-V. and Q.-C. Hsu, *Optimization of minimum quantity lubricant conditions and cutting parameters in hard milling of AISI H13 steel.* Applied Sciences, 2016. **6**(3): p. 83.

[74] Vu, N.-C., X.-P. Dang, and S.-C. Huang, *Multi-objective optimization of hard milling process of AISI H13 in terms of productivity, quality, and cutting energy under nanofluid minimum quantity lubrication condition.* Measurement and control, 2021. **54**(5-6): p. 820-834.

[75] Vu, N.C., S.C. Huang, and H.T. Nguyen, *Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in hard milling using Taguchi and response surface methodology.* Key Engineering Materials, 2018. **773**: p. 220-224.

[76] Ngoc, C.V., X.P. Dang, and S.C. Huang, *Optimizing SKD-61 steel machining for marine component manufacture: A grey-Taguchi study on nanofluid minimum quantity lubrication.* Tạp chí Khoa học-Công nghệ Thủy Sản, Trường Đại học Nha Trang, 2024(01): p. 129-133.

[77] Linh, P.N., et al., *Multi-Objective Optimization of Finishing Milling of C45 Steel using Factorial Design.* Engineering, Technology & Applied Science Research, 2024. **14**(6): p. 18199-18204.

[78] Nguyen Lam, K., *Study on multi-objective optimization of X12M steel milling process by reference ideal method.* EUREKA: Physics and Engineering,(4), 2021: p. 89-104.

[79] Nguyen, A.-T., et al., *Multiobjective Optimization of Surface Roughness and Tool Wear in High-Speed Milling of AA6061 by Machine Learning and NSGA-II.* Advances in Materials Science and Engineering, 2022. **2022**(1): p. 5406570.

[80] Nguyen, V.-H., et al., *Multiobjective optimization of end milling parameters for enhanced machining performance on 42CrMo4 using machine learning and NSGA-III.* Machining science and technology, 2024. **28**(5): p. 744-776.

[81] Nguyen, Q., T. Do, and T. Nguyen, *Minimization of temperature in cutting zone: a case study of hard milling of SKD 61 steel.* Uni. J. Mecha. Eng., 2020. **8**(2): p. 97-104.

[82] Hưng, L.T., *Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến chất lượng bề mặt và mòn dụng cụ khi phay cao tốc thép SKD61 đã nhiệt luyện*. 2024: Hà Nội.

[83] Lộc, p.h. and n.t.x. chinh, *nghiên cứu cải tiến độ bóng bề mặt của thép skd61 sử dụng các thông số phay tối ưu bằng phương pháp taguchi.* Journal of Science and Technology-IUH, 2024. **67**(01).

[84] Vu, M., et al., *The impact of cutting conditions and cooling lubrication on hard milling of SKD11 alloy steel-An approach using the Taguchi method.* International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2024. **13**(1): p. 1-10.

[85] Dolinšek, S., S. Ekinović, and J. Kopač, *A contribution to the understanding of chip formation mechanism in high-speed cutting of hardened steel.* Journal of Materials Processing Technology, 2004. **157**: p. 485-490.

[86] Sagapuram, D., et al., *On the cutting of metals: a mechanics viewpoint.* Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020. **142**(11): p. 110808.

[87] Becze, C., et al., *High-speed five-axis milling of hardened tool steel.* International Journal Of Machine Tools and Manufacture, 2000. **40**(6): p. 869-885.

[88] Suresh, R., et al., *State-of-the-art research in machinability of hardened steels.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013. **227**(2): p. 191-209.

[89] Merchant, M.E., *Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip.* Journal of applied physics, 1945. **16**(5): p. 267-275.

[90] Duc, T.M., N.M. Tuan, T.T. Long, and T.B. Ngoc, *Machining feasibility and sustainability study associated with air pressure, air flow rate, and nanoparticle concentration in nanofluid minimum quantity lubrication-assisted hard milling process of 60Si2Mn stee*l. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022. 236(23): p. 11256-11269.

[91] Ekinovic, S., S. Dolinsek, and I. Jawahir, *Some observations of the chip formation process and the white layer formation in high speed milling of hardened steel.* Machining Science and Technology, 2004. **8**(2): p. 327-340.

[92] Li, B., et al., *Simulated and experimental analysis on serrated chip formation for hard milling process*. Journal of Manufacturing Processes, 2019. 44: p. 337-348.

[93] Liao, Y. and H. Lin, *Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007. **47**(11): p. 1660-1666.

[94] Toh, C., *Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel.* Journal of Materials Processing Technology, 2005. **167**(1): p. 110-118.

[95] Das, S.R., A. Panda, and D. Dhupal, *Experimental investigation of surface roughness, flank wear, chip morphology and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with coated carbide insert.* Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes, 2017. **3**(1): p. 9.

[96] Kar, B.C., et al., *Research trends in high speed milling of metal alloys: A short review.* Materials Today: Proceedings, 2020. **26**: p. 2657-2662.

[97] Johnson, G.R. and W.H. Cook, *Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures.* Engineering fracture mechanics, 1985. **21**(1): p. 31-48.

[98] Bartoszuk, M. and P. Löschner, *Importance of the Johnson-Cook Material Model Parameters in Simulation Studies of the Cutting Process.* International Journal for Engineering Modelling, 2025. **38**(1 Regular Issue): p. 39-51.

[99] Löschner, P., P. Niesłony, and S. Kołodziej, *Parameter Sensitivity Study of the Johnson–Cook Model in FEM Turning of Ti6Al4V Alloy.* Materials, 2025. **18**(14): p. 3351.

[100] Molinari, A., R. Cheriguene, and H. Miguelez, *Contact variables and thermal effects at the tool–chip interface in orthogonal cutting.* International Journal of Solids and Structures, 2012. **49**(26): p. 3774-3796.

[101] Brocail, J., M. Watremez, and L. Dubar, *Identification of a friction model for modelling of orthogonal cutting.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010. **50**(9): p. 807-814.

[102] Mac, T.-B., T.-T. Luyen, and D.-T. Nguyen, *The impact of high-speed and thermal-assisted machining on tool wear and surface roughness during milling of SKD11 steel.* Metals, 2023. **13**(5): p. 971.

[103] Kuntoglu, M., *Machining induced tribological investigations in sustainable milling of Hardox 500 steel: A new approach of measurement science.* Measurement, 2022. **201**: p. 111715.

[104] Grzesik, W., J. Rech, and K. Żak, *Determination of friction in metal cutting with tool wear and flank face effects.* Wear, 2014. **317**(1-2): p. 8-16.

[105] Liu, G.-J., et al., *Wear mechanism of cemented carbide tool in high speed milling of stainless steel.* Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018. **31**(1): p. 98.

[106] Zawada-Michałowska, M., P. Pieśko, and J. Józwik, *Tribological aspects of cutting tool wear during the turning of stainless steels.* Materials, 2019. **13**(1): p. 123.

[107] Duc, T.M., P.Q. Dong, T.T. Long, and D.V. Thanh, *Evaluation of MQCL technique using MoS2 nanofluids during hard milling process of SKD 11 tool steel.* International Journal of Mechanical Engineering and Applications, 2019. 7(4): p. 91-100.

[108] Weinert, K., et al., *Dry machining and minimum quantity lubrication.* CIRP annals, 2004. **53**(2): p. 511-537.

[109] Suda, S., et al., *A synthetic ester as an optimal cutting fluid for minimal quantity lubrication machining.* CIRP Annals, 2002. **51**(1): p. 95-98.

[110] Wakabayashi, T., et al., *Tribological characteristics and cutting performance of lubricant esters for semi-dry machining.* CIRP Annals, 2003. **52**(1): p. 61-64.

[111] Damir, A., A. Sadek, and H. Attia, *On the performance of cryogenic technology in milling of hardened H13 tool steel.* Procedia CIRP, 2024. **122**: p. 384-389.

[112] Lawson, J., *Design and Analysis of Experiments with R*. 2014: CRC press.

[113] Kistler Instrumente AG, *KISTLER: measure, analyze, innovate*. 2003: PO Box, Eulachstr. 22, CH-8408 Winterthur.

[114] Deb, K., *Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms: an introduction*, in *Multi-objective evolutionary optimisation for product design and manufacturing*. 2011, Springer. p. 3-34.

[115] Stević, Ž., et al., *Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COmpromise solution (MARCOS).* Computers & industrial engineering, 2020. **140**: p. 106231.

[116] Das, I., *On characterizing the "knee" of the Pareto curve based on normal-boundary intersection.* Structural optimization, 1999. **18**(2): p. 107-115.

[117] Keshavarz-Ghorabaee, M., E.K. Zavadskas, M. Amiri, and J. Antucheviciene, *Evaluation by an area-based method of ranking interval type-2 fuzzy sets (EAMRIT-2F) for multi-criteria group decision-making.* Transformations in Business & Economics, 2016. 15(3): p. 76-95.

[118] Duc, T.M., T.T. Long, and N.M. Tuan, *Performance investigation of MQL parameters using nano cutting fluids in hard milling*. Fluids, 2021. 6(7): p. 248.

[119] Trần Minh Đức, Trần Thế Long, Trần Quyết Chiến, *Ảnh hưởng của nồng độ hạt nano Al_2O_3 và chế độ cắt đến nhám bề mặt khi phay cứng thép Hardox 500 sử dụng MQCL,* Tạp chí Khoa học Công nghệ, ĐH Thái Nguyên, T. 204, S.11, 2019, Tr. 227-234.

[120] Trần Minh Đức, Phạm Quang Đồng, Trần Thế Long, Trần Quyết Chiến, *Nghiên cứu chế tạo đầu phun dung dịch lạnh cho bôi trơn làm nguội tối thiểu, ứng dụng phay cứng thép SKD11,* Tạp chí Khoa học Công nghệ, ĐH Thái Nguyên, T. 173, S.13, 2017, Tr. 227-234.

[121] Duc, T.M., T.T. Long, and N.M. Tuan, *Novel uses of Al2O3/MoS2 hybrid nanofluid in MQCL hard milling of Hardox 500 steel*. Lubricants, 2021. 9(4): p. 45.

[122] Dong, P.Q., T.M. Duc, N.M. Tuan, T.T. Long, D.V. Thanh, and N.V. Truong, *Improvement in the hard milling of AISI D2 steel under the MQCL condition using emulsion-dispersed MoS2 nanosheets*. Lubricants, 2020. 8(6): p. 62.

[123] Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II.* IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002. 6(2): p. 182-197.

[124] Hwang, C.L. and K. Yoon, Multiple Attribute Decision Making: *Methods and Applications.* 1981, Berlin: Springer-Verlag.

PHỤ LỤC 1

Bộ dữ liệu gồm 135 thí nghiệm được xây dựng từ thiết kế BBD có phân khối, bao gồm các biến đầu vào (v_c, f_z, a_p, D_{avg}) *tương ứng với ba đường kính dao phay Dt (*ϕ*6,* ϕ*9 và* ϕ*12 mm) và các biến đầu ra (Ra, MRR và F). Trong đó, thí nghiệm 1–45 sử dụng dao Ø6 mm, thí nghiệm 46–90 sử dụng dao Ø9 mm và thí nghiệm 91–135 sử dụng dao Ø12 mm; các mức thông số công nghệ của từng đường kính dao được trình bày trong Bảng 3.5 (toàn bộ dữ liệu có fz từ 0.02 đến 0.08 mm/răng và ap từ 0.08 đến 0.25 mm).*

Trial.	Dt (mm)	vc (m/ph)	fz (mm/răng)	ap (mm)	Davg (nm)	Ra	MRR	F
1	6	150	0.03	0.12	20	0.26	9.46	84.42748
2	6	150	0.02	0.1	100	0.23	5.25	68.90573
3	6	125	0.03	0.1	100	0.29	6.55	74.35725
4	6	150	0.03	0.08	50	0.245	6.30	74.35725
5	6	150	0.04	0.1	50	0.31	10.54	86.37129
6	6	100	0.03	0.12	20	0.34	6.30	95.85406
7	6	125	0.03	0.1	100	0.29	6.57	75.50497
8	6	100	0.02	0.1	100	0.3	3.50	73.46428
9	6	150	0.03	0.08	100	0.255	6.30	69.03622
10	6	150	0.03	0.12	100	0.275	9.41	77.1816
11	6	125	0.03	0.1	50	0.28	6.57	78.08329
12	6	100	0.03	0.08	20	0.32	4.19	83.21658
13	6	150	0.02	0.1	50	0.22	5.26	66.46804
14	6	125	0.03	0.1	100	0.29	6.56	75.50497
15	6	125	0.03	0.1	20	0.275	6.59	81.66395
16	6	125	0.04	0.08	50	0.315	6.98	84.71127
17	6	100	0.02	0.1	20	0.295	3.51	77.06491
18	6	150	0.03	0.08	20	0.24	6.31	74.35725
19	6	125	0.04	0.12	100	0.36	10.53	94.13288
20	6	100	0.04	0.1	100	0.4	6.99	95.0421
21	6	125	0.03	0.1	50	0.28	6.57	78.08329
22	6	150	0.04	0.1	20	0.3	10.49	88.80315
23	6	125	0.04	0.12	20	0.35	10.52	101.1237
24	6	100	0.03	0.12	50	0.36	6.31	95.20504
25	6	125	0.04	0.08	20	0.31	7.00	87.14356
26	6	125	0.02	0.08	100	0.26	3.50	64.87681
27	6	125	0.02	0.12	100	0.28	5.24	73.03424
28	6	100	0.02	0.1	50	0.29	3.51	74.31016
29	6	125	0.02	0.08	20	0.25	3.49	68.90573
30	6	125	0.02	0.12	50	0.27	5.26	76.74634
31	6	100	0.03	0.08	100	0.33	4.20	77.1816
32	6	100	0.03	0.12	100	0.37	6.31	89.49302
33	6	150	0.03	0.12	50	0.27	9.47	78.77817
34	6	125	0.03	0.1	50	0.28	6.57	78.08329
35	6	125	0.03	0.1	20	0.275	6.57	81.66395
36	6	150	0.04	0.1	100	0.32	10.54	83.94046
37	6	125	0.04	0.08	100	0.325	7.00	80.98148
38	6	100	0.03	0.08	50	0.325	4.21	80.46117
39	6	100	0.04	0.1	50	0.39	6.99	97.47307
40	6	100	0.04	0.1	20	0.38	7.02	103.1795

Trial.	Dt (mm)	vc (m/ph)	fz (mm/răng)	ap (mm)	Davg (nm)	Ra	MRR	F
41	6	125	0.02	0.12	20	0.265	5.25	78.33901
42	6	125	0.03	0.1	20	0.275	6.58	81.66395
43	6	150	0.02	0.1	20	0.21	5.25	66.46804
44	6	100	0.02	0.08	50	0.28	2.79	71.02816
45	6	100	0.04	0.12	50	0.46	8.38	104.7712
46	9	150	0.05	0.15	20	0.28	13.06	116.9487
47	9	150	0.04	0.1	100	0.2	6.97	73.82412
48	9	125	0.05	0.1	100	0.25	7.31	85.34635
49	9	150	0.05	0.1	50	0.23	8.77	91.04395
50	9	150	0.06	0.15	50	0.33	15.68	126.3131
51	9	100	0.05	0.2	20	0.4	11.67	144.3399
52	9	125	0.05	0.15	100	0.29	10.91	113.675
53	9	100	0.04	0.1	100	0.27	4.62	79.18333
54	9	150	0.05	0.1	100	0.22	8.76	87.32125
55	9	150	0.05	0.2	100	0.29	17.54	126.3131
56	9	125	0.06	0.1	50	0.32	8.77	117.7158
57	9	100	0.05	0.15	20	0.34	8.77	120.1541
58	9	150	0.04	0.15	50	0.24	10.58	98.85848
59	9	125	0.05	0.1	100	0.25	7.28	85.34635
60	9	125	0.05	0.2	20	0.37	14.55	138.181
61	9	125	0.06	0.15	50	0.35	13.12	129.5839
62	9	100	0.04	0.1	20	0.29	4.68	90.58697
63	9	150	0.05	0.1	20	0.24	8.76	99.18669
64	9	125	0.06	0.2	100	0.41	17.60	144.3399
65	9	100	0.06	0.15	100	0.41	10.56	132.4726
66	9	125	0.05	0.1	50	0.26	7.26	94.30801
67	9	150	0.06	0.2	20	0.36	21.00	141.9014
68	9	125	0.06	0.2	20	0.42	17.55	159.0975
69	9	100	0.05	0.2	50	0.41	11.68	138.181
70	9	125	0.06	0.1	20	0.33	8.77	126.3131
71	9	125	0.04	0.15	100	0.26	8.75	102.1274
72	9	125	0.04	0.2	100	0.3	11.64	120.1541
73	9	100	0.04	0.15	50	0.3	6.97	96.74709
74	9	125	0.04	0.1	20	0.26	5.84	93.85627
75	9	125	0.04	0.2	50	0.31	11.64	126.3131
76	9	100	0.05	0.1	100	0.3	5.79	96.74709
77	9	100	0.05	0.15	100	0.35	8.72	113.9956
78	9	150	0.05	0.2	50	0.29	17.56	132.4726
79	9	125	0.05	0.15	50	0.31	10.88	117.7158
80	9	125	0.05	0.1	20	0.27	7.29	96.74709
81	9	150	0.06	0.15	100	0.34	15.78	126.3131
82	9	125	0.06	0.1	100	0.33	8.80	120.1541
83	9	100	0.05	0.2	50	0.41	11.66	138.181
84	9	100	0.06	0.15	50	0.42	10.48	134.4619
85	9	100	0.06	0.2	20	0.44	14.06	150.4992
86	9	125	0.04	0.15	20	0.28	8.77	106.1744
87	9	125	0.05	0.1	20	0.27	7.29	96.74709
88	9	150	0.04	0.1	20	0.22	6.97	90.58697
89	9	100	0.04	0.2	50	0.32	9.37	120.1541
90	9	100	0.06	0.15	50	0.43	10.50	138.181
91	12	150	0.06	0.2	20	0.32	15.80	161.5952
92	12	150	0.04	0.15	100	0.215	7.91	97.20597

Trial.	Dt (mm)	vc (m/ph)	fz (mm/răng)	ap (mm)	Davg (nm)	Ra	MRR	F
93	12	125	0.06	0.15	100	0.28	9.89	109.0688
94	12	150	0.06	0.15	50	0.27	11.87	120.9339
95	12	150	0.08	0.2	50	0.38	21.02	181.1739
96	12	100	0.06	0.25	20	0.43	13.04	193.4942
97	12	125	0.06	0.2	100	0.31	13.17	150.8277
98	12	100	0.04	0.15	100	0.3	5.26	102.9077
99	12	150	0.06	0.15	100	0.26	11.89	111.054
100	12	150	0.06	0.25	100	0.31	19.87	156.5375
101	12	125	0.08	0.15	50	0.37	13.16	168.855
102	12	100	0.06	0.2	20	0.36	10.47	162.3669
103	12	150	0.04	0.15	50	0.23	7.87	106.1744
104	12	125	0.06	0.15	100	0.28	9.87	109.0688
105	12	125	0.06	0.25	20	0.35	16.39	175.0143
106	12	125	0.08	0.2	50	0.4	17.62	187.3339
107	12	100	0.04	0.15	20	0.33	5.28	120.1541
108	12	150	0.06	0.2	20	0.34	15.77	168.526
109	12	125	0.08	0.25	100	0.45	21.78	193.4942
110	12	100	0.08	0.15	100	0.43	10.47	168.855
111	12	125	0.06	0.15	50	0.29	9.77	120.9339
112	12	150	0.08	0.25	20	0.4	26.36	199.2009
113	12	125	0.08	0.2	20	0.42	17.65	193.4942
114	12	100	0.06	0.25	50	0.44	13.10	187.3339
115	12	125	0.08	0.15	20	0.38	13.25	175.0143
116	12	125	0.04	0.2	100	0.29	8.73	138.181
117	12	125	0.04	0.25	100	0.32	10.91	150.8277
118	12	100	0.04	0.2	50	0.34	7.07	129.5839
119	12	125	0.04	0.15	20	0.29	6.60	120.1541
120	12	125	0.04	0.25	50	0.33	10.87	156.5375
121	12	100	0.06	0.15	100	0.34	7.90	126.6412
122	12	100	0.06	0.2	100	0.38	10.49	156.5375
123	12	150	0.06	0.25	50	0.32	19.80	162.696
124	12	125	0.06	0.2	50	0.33	13.15	156.5375
125	12	125	0.06	0.15	20	0.3	9.88	127.0945
126	12	150	0.08	0.15	100	0.35	15.74	162.696
127	12	125	0.08	0.15	100	0.37	13.17	156.5375
128	12	100	0.06	0.15	50	0.35	7.93	132.8006
129	12	100	0.08	0.2	50	0.47	14.00	187.3339
130	12	100	0.08	0.25	20	0.48	17.66	199.2009
131	12	125	0.04	0.2	20	0.32	8.77	144.3399
132	12	125	0.06	0.15	20	0.3	9.85	127.0945
133	12	150	0.04	0.15	20	0.24	7.85	114.7737
134	12	100	0.04	0.15	50	0.32	5.25	118.0424
135	12	100	0.08	0.25	50	0.485	17.60	206.942

PHỤ LỤC 2

Tập nghiệm Pareto thu được từ quá trình tối ưu hóa đa mục tiêu bằng thuật toán NSGA-II kết hợp mô hình GPR đối với các mục tiêu tối đa hóa MRR, tối thiểu hóa Ra và tối thiểu hóa lực cắt F.

Dt	vc	fz	ap	Davg	MRR	Ra	F
12	142.96	0.04	0.08	100	4.54	0.17	53.89
6	150.00	0.04	0.12	50	12.12	0.31	89.65
9	149.36	0.03	0.09	100	3.90	0.16	65.73
6	150.00	0.04	0.12	50	12.12	0.31	89.65
9	144.54	0.03	0.08	100	3.86	0.16	63.33
6	145.96	0.03	0.09	50	6.51	0.24	71.01
9	149.83	0.04	0.12	50	8.16	0.21	86.06
12	146.29	0.04	0.10	100	5.19	0.18	61.53
6	149.96	0.04	0.12	50	12.06	0.31	89.43
6	146.64	0.03	0.10	50	7.99	0.26	75.79
12	145.64	0.04	0.10	100	5.07	0.18	59.89
12	147.28	0.04	0.09	100	4.96	0.18	58.53
12	143.31	0.04	0.09	100	4.59	0.17	54.58
6	148.88	0.03	0.11	50	9.91	0.28	81.57
9	149.59	0.04	0.12	50	7.84	0.21	84.67
6	147.90	0.03	0.11	50	9.52	0.28	80.74
6	145.69	0.03	0.10	50	7.32	0.25	73.63
9	147.18	0.04	0.10	100	6.84	0.19	73.13
6	148.03	0.03	0.11	50	9.32	0.27	79.85
6	146.29	0.03	0.10	50	7.61	0.26	74.64
6	149.00	0.04	0.11	50	10.65	0.29	84.34
9	144.19	0.04	0.09	100	5.70	0.18	67.02
12	146.82	0.04	0.10	100	5.25	0.18	63.05
6	149.34	0.04	0.11	50	11.05	0.30	85.82
6	147.02	0.03	0.10	50	8.64	0.27	77.85
9	147.13	0.04	0.10	100	6.21	0.19	70.92
6	148.92	0.04	0.11	50	10.42	0.29	83.60
6	149.77	0.04	0.11	50	11.73	0.31	88.24
6	145.02	0.03	0.09	50	6.67	0.25	71.64
12	145.27	0.04	0.09	100	5.00	0.18	58.87
9	148.77	0.03	0.09	100	4.46	0.17	66.13
9	144.60	0.03	0.08	100	4.08	0.16	63.37
6	147.40	0.03	0.10	50	8.96	0.27	78.97
12	144.22	0.04	0.09	100	4.78	0.18	56.45
12	144.22	0.04	0.09	100	4.78	0.18	56.45
6	145.13	0.03	0.09	50	6.92	0.25	72.46

Dt	vc	fz	ap	Davg	MRR	Ra	F
9	149.56	0.04	0.11	100	7.74	0.20	78.34
6	149.13	0.04	0.11	50	10.71	0.29	84.61
9	149.55	0.03	0.10	100	5.53	0.18	69.27
6	145.86	0.03	0.10	50	7.43	0.25	73.95
9	145.04	0.04	0.09	100	5.85	0.18	67.88
6	148.74	0.03	0.11	50	9.94	0.28	81.79
6	146.21	0.03	0.09	50	7.54	0.26	74.49
6	146.92	0.03	0.10	50	8.30	0.26	76.79
9	149.51	0.04	0.11	100	7.79	0.20	78.52
6	148.41	0.04	0.11	50	9.98	0.29	82.33
6	149.51	0.04	0.11	50	11.42	0.30	87.23
6	149.35	0.04	0.11	50	11.17	0.30	86.28
9	145.37	0.03	0.09	100	4.40	0.17	64.81
6	149.58	0.03	0.10	50	8.84	0.27	77.97
9	145.97	0.03	0.09	100	4.78	0.17	65.83
6	147.36	0.03	0.10	50	8.89	0.27	78.62
6	145.75	0.03	0.09	50	7.03	0.25	72.94
9	147.52	0.04	0.10	100	6.45	0.19	72.00
6	149.17	0.04	0.11	50	10.90	0.30	85.24
6	147.83	0.03	0.11	50	9.45	0.28	80.60
6	149.20	0.04	0.11	50	10.88	0.30	85.21
6	147.63	0.03	0.10	50	9.10	0.27	79.38
9	148.11	0.04	0.11	100	6.89	0.19	73.97
6	147.87	0.03	0.11	50	9.21	0.27	79.51

PHỤ LỤC 3

Tập nghiệm Pareto khả thi sau khi loại bỏ các phương án có độ nhám bề mặt Ra ≤ 0.20 μm, được sử dụng làm tập phương án đầu vào cho các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí TOPSIS, MARCOS và EAMR.

No.	Dt	vc	fz	ap	Davg	MRR	Ra	F
1	9	149.36	0.03	0.09	100	3.90	0.16	65.73
2	9	144.54	0.03	0.08	100	3.86	0.16	63.33
3	9	144.60	0.03	0.08	100	4.08	0.16	63.37
4	9	148.77	0.03	0.09	100	4.46	0.17	66.13
5	9	145.37	0.03	0.09	100	4.40	0.17	64.81
6	9	145.97	0.03	0.09	100	4.78	0.17	65.83
7	12	142.96	0.04	0.08	100	4.54	0.17	53.89
8	12	143.31	0.04	0.09	100	4.59	0.17	54.58
9	9	149.55	0.03	0.10	100	5.53	0.18	69.27
10	12	144.22	0.04	0.09	100	4.78	0.18	56.45
11	12	144.22	0.04	0.09	100	4.78	0.18	56.45
12	12	147.28	0.04	0.09	100	4.96	0.18	58.53
13	12	145.27	0.04	0.09	100	5.00	0.18	58.87
14	12	145.64	0.04	0.10	100	5.07	0.18	59.89
15	12	146.29	0.04	0.10	100	5.19	0.18	61.53
16	12	146.82	0.04	0.10	100	5.25	0.18	63.05
17	9	144.19	0.04	0.09	100	5.70	0.18	67.02
18	9	145.04	0.04	0.09	100	5.85	0.18	67.88
19	9	147.13	0.04	0.10	100	6.21	0.19	70.92
20	9	147.52	0.04	0.10	100	6.45	0.19	72.00
21	9	148.11	0.04	0.11	100	6.89	0.19	73.97
22	9	147.18	0.04	0.10	100	6.84	0.19	73.13