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

Ngành: Kỹ thuật Cơ khí
Mã số: 9520103

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Hà Nội - 2026

Công trình được hoàn thành tại Viện Nghiên cứu Cơ khí, Bộ Công Thương

Người hướng dẫn khoa học: 1. GS.TS. Vũ Ngọc Pi

2. PGS.TS. Hoàng Văn Gợt

Người phản biện 1:

Người phản biện 2:

Người phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Viện

Họp tại: Viện Nghiên cứu Cơ khí – Bộ Công thương

Phòng 209 Tòa nhà trụ sở chính, số 4, đường Phạm Văn Đồng, quận Cầu Giấy – TP. Hà Nội.

Vào hồi , giờ phút, ngày tháng năm 2026

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Viện Nghiên cứu Cơ khí, số 4, Phạm Văn Đồng, Cầu Giấy, Hà Nội.
- Thư viện Quốc gia Việt Nam.

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).

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Bề mặt trụ định hình lồi rất phổ biến trong chế tạo chày dập và khuôn mẫu. Phương pháp mài truyền thống tuy đạt độ chính xác cao nhưng chi phí lớn, năng suất thấp và kém linh hoạt. Nhằm thay thế nguyên công mài, phay cứng CNC trên vật liệu sau tôi là hướng đi tiềm năng giúp rút ngắn quy trình và tăng tính linh hoạt cho sản xuất.Tuy nhiên, phay cứng thép dụng cụ 90CrSi gặp thách thức lớn do lực cắt và nhiệt cắt cao làm dao nhanh mòn. Phương pháp tưới tràn truyền thống không hiệu quả và dễ gây sốc nhiệt làm nứt vỡ mảnh cắt. Vì vậy, công nghệ bôi trơn tối thiểu nano-MQL kết hợp hạt nano CuO được đề xuất để thay thế.Đến nay, chưa có nghiên cứu hệ thống nào về phay cứng bề mặt trụ định hình thép 90CrSi sau tôi bằng nano-MQL. Do đó, đề tài "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" có tính cấp thiết cao, giúp giải quyết khoảng trống khoa học và đáp ứng nhu cầu thực tiễn ngành 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/min) 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

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.



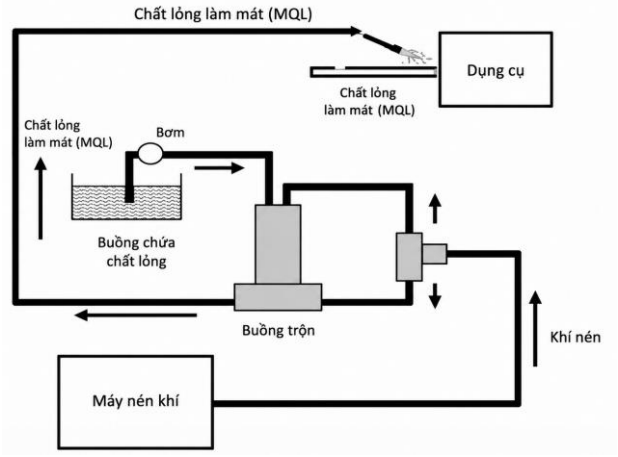
***Hình 1.2**. Khuôn điện thoại di động tạo bởi phay cứng và chế độ phay cứng đã dùng*

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.

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

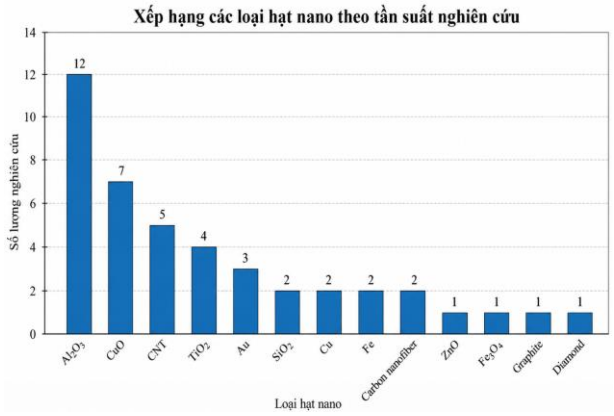
Các nghiên cứu tổng hợp cho thấy kỹ thuật bôi trơn tối thiểu (MQL) là một giải pháp hiệu quả thay thế cho làm mát truyền thống trong gia công, vừa giảm lượng dung dịch cắt gọt vừa cải thiện hiệu năng công nghệ. Như minh họa trong Hình 1.4, hệ thống MQL hoạt động dựa trên việc phun một lượng rất nhỏ dầu 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.



Hình 1.4. 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.

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.



Hình 1.10. Biểu đồ xếp hạng các loại hạt nano theo tần suất nghiên cứu trong các công trình về nanofluid [28]

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

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.

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.

1.4. Vật liệu dụng cụ cắt trong gia công cứng

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. 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;

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. 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

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

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về phay cứng đã tiến bộ đáng kể trong khảo sát thực nghiệm và ứng dụng MQL/nano-MQL, nhưng vẫn hạn chế về phạm vi vật liệu, dạng bề mặt cùng mức độ tích hợp mô hình hóa - tối ưu hóa. Từ tổng quan nghiên cứu, bốn khoảng trống quan trọng được chỉ ra bao gồm: (i) thiếu nghiên cứu phay cứng thép 90CrSi trên bề mặt trụ ngoài định hình; (ii) chưa có đánh giá hệ thống về ảnh hưởng của nano-MQL (hạt CuO); (iii) thiếu mô hình tích hợp dự đoán đồng thời độ nhám, lực cắt và năng suất; (iv) hạn chế áp dụng tối ưu hóa đa mục tiêu kết hợp học máy.

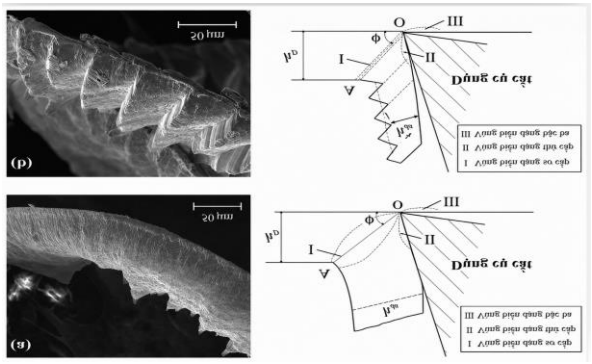
Xuất phát từ đó, luận án hướng tới nghiên cứu thực nghiệm và xây dựng mô hình dự báo - tối ưu hóa cho quá trình phay cứng bề mặt trụ ngoài định hình thép 90CrSi dưới điều kiện nano-MQL (CuO). Nội dung này không chỉ làm rõ cơ chế công nghệ mà còn đề xuất giải pháp tối ưu có ý nghĩa thực tiễn cao cho sản xuất cơ khí hiện đại.

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

2.1. Cơ sở lý thuyết về phay cứng

2.1.1. Cơ chế hình thành phoi khi phay cứng

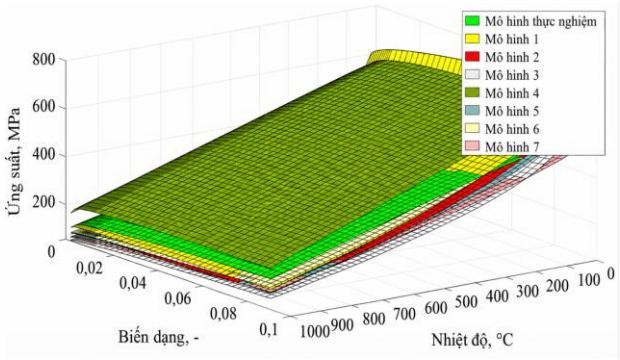
Trong phay cứng, quá trình hình thành phoi chịu ảnh hưởng đồng thời của độ cứng cao của vật liệu gia công, tốc độ biến dạng lớn trong vùng cắt và đặc tính cắt gián đoạn của từng răng dao. Đối với các thép tôi cứng như 90CrSi, SKD11… hoặc thép chịu mài mòn HARDOX 500, ứng suất chảy lớn làm giảm khả năng 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.



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]

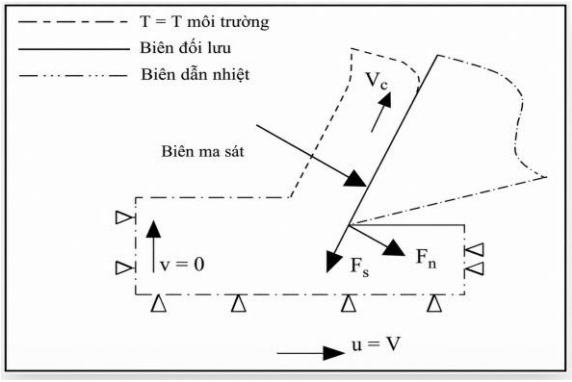
2.1.2. Cơ chế sinh nhiệt và ứng xử nhiệt-cơ của vật liệu

2.1.2.1. Ứng xử nhiệt-cơ của vật liệu



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

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



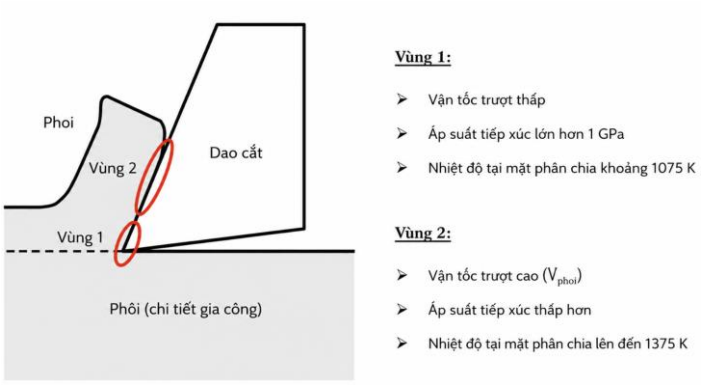
Hình 2.8: Các điều kiện biên nhiệt – cơ trong mô phỏng phần tử hữu hạn phay cứng

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.

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

2.1.3.1.1. Ma sát trên mặt trước của dụng cụ cắt



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

2.1.3.1.2. 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 gia công. Dù lượng nhiệt sinh ra tại đây nhỏ hơn vùng dao-phoi, nhưng vùng này lại ảnh hưởng trực tiếp nhất đến độ nhám và độ chính xác gia công. Khi mặt sau bị mòn, diện tích tiếp xúc tăng lên làm gia tăng lực ma sát, gây ra hiện tượng cày xới và biến dạng dẻo cục bộ của lớp vật liệu bề mặt.

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..

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).

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

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..

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.

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

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.

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.

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.

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

. 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.

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.

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.

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

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.

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)

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,

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.

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.

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

2.5.4. Kết hợp mô hình hóa và tối ưu hóa

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

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

- Cơ sở lý thuyết: Phân tích cơ chế tạo phoi, hiện tượng nhiệt - cơ và các chỉ tiêu đánh giá (độ nhám, lực cắt, năng suất).

-Công nghệ bôi trơn: Lựa chọn nano-MQL làm giải pháp tối ưu giúp cải thiện ma sát và truyền nhiệt vùng cắt.

-Thiết kế thí nghiệm: Áp dụng phương pháp bề mặt đáp ứng kết hợp phân khối để tối ưu hóa các biến nghiên cứu.

- Mô hình hóa & Tối ưu: Sử dụng RSM, GPR và thuật toán NSGA-II để dự báo, tìm tập nghiệm tối ưu đa mục tiêu.

CHƯƠNG 3: XÂY DỰNG HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM

3.1. Giới thiệu

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



Trung tâm phay đứng Mazak VCS 530C (Hình 3.1)

3.2.2. Thiết bị đo lực Kistler 9257BA



Hình 3.2:Thiết bị đo lực KISTTLER 9257BA

3.2.3 Cân điện tử WT3003NE



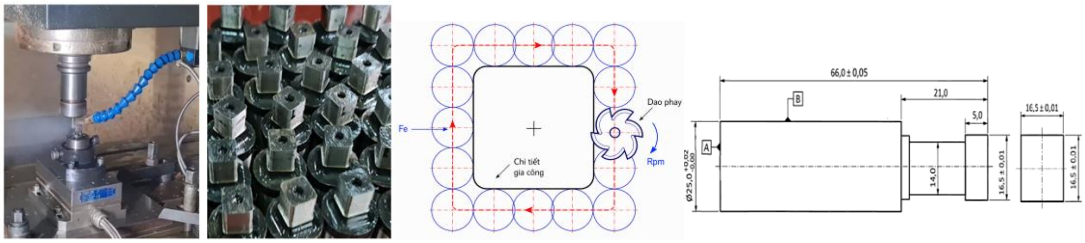
Hình 3.3: Cân điện tử WT3003NE

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/h.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 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

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). 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.

3.5.2. Thiết kế bề mặt đáp ứng có phân khối

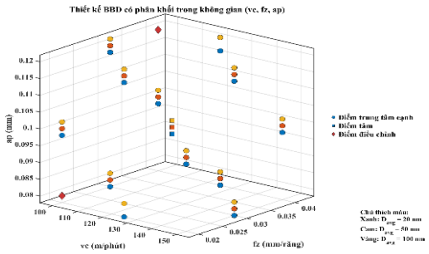
Để đáp ứng cấu trúc yếu tố hỗn hợp nêu trên, một thiết kế bề mặt đáp ứng có phân khối đã được áp dụng, trong đó mỗi mức kích thước hạt nano xác định một khối thí nghiệm độc lập. Trong từng khối, tất cả các thí nghiệm được tiến hành với Sn cố định, cho phép đánh giá ảnh hưởng của các biến công nghệ liên tục (V,F,D) không bị nhiễu bởi sự khác biệt hệ thống giữa các mức kích thước hạt nano.

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.

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

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].



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).

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.

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.

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.

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.

Kết luận chương 3

- Hệ thống thí nghiệm: Mô tả chi tiết trung tâm phay CNC, hệ thống đo lực cắt và thiết bị đo khối lượng đảm bảo độ chính xác cao.
- Điều kiện cắt: Sử dụng bôi trơn nano-MQL (hạt CuO) trên phôi thép 90CrSi sau nhiệt luyện.
- Thiết kế thí nghiệm: Áp dụng phương pháp bề mặt đáp ứng Box-Behnken có phân khối nhằm tối ưu số lượng và độ tin cậy của các lượt chạy dao.
- Đo lường đầu ra: Xác định rõ quy trình và thiết bị đo nhám bề mặt, lực cắt, tốc độ bóc tách vật liệu (MRR).

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

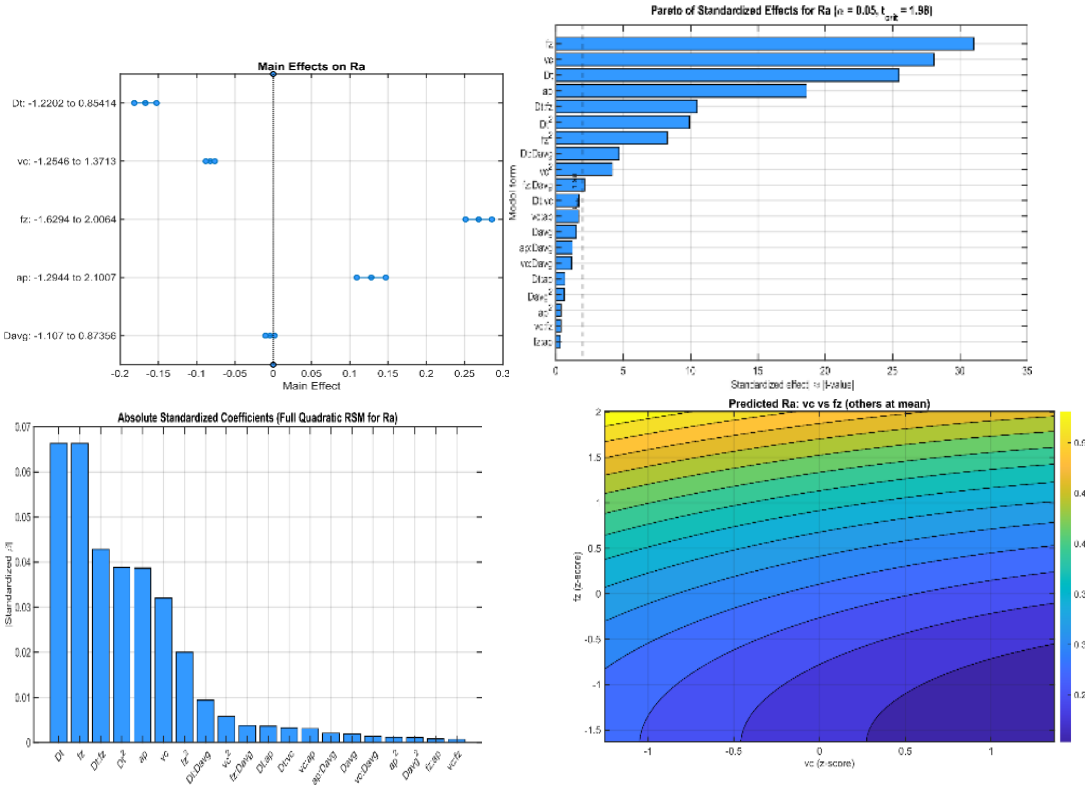
4.1. Kết quả thực nghiệm

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.

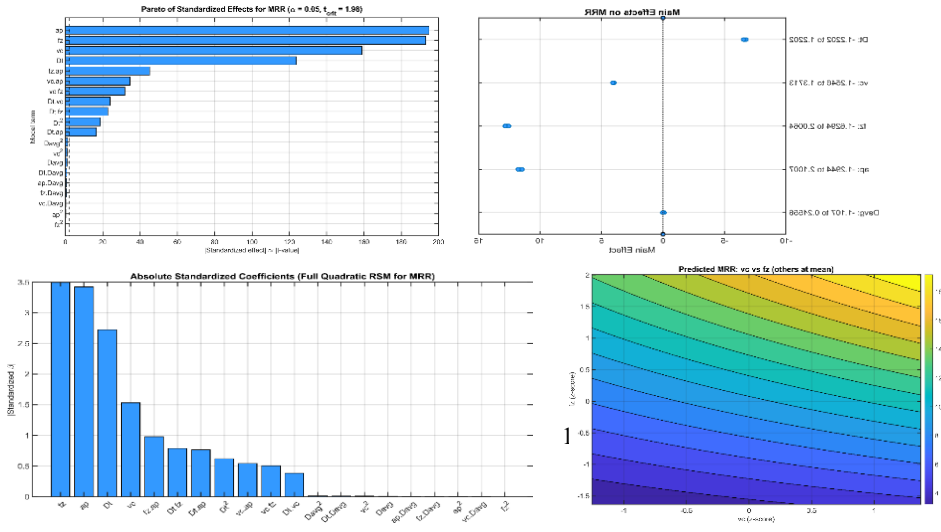
4.2. Phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ

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



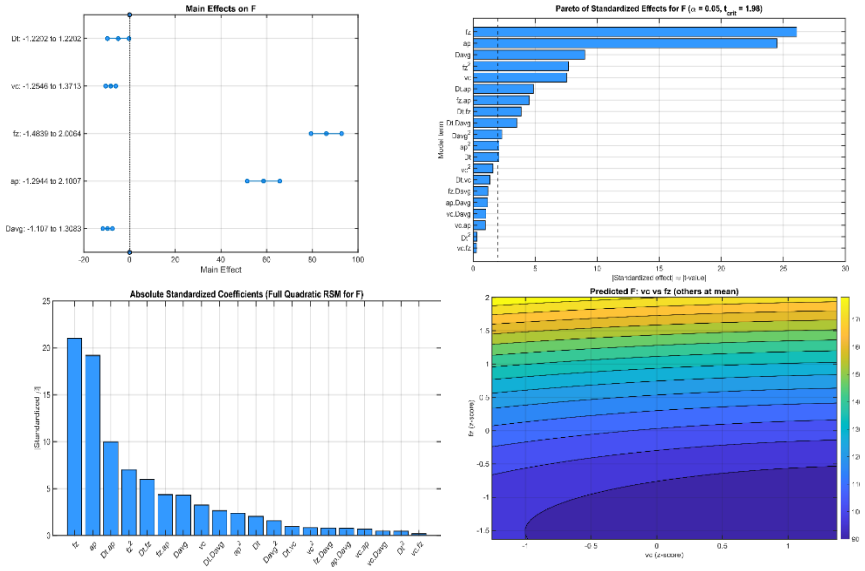
Tổng hợp các kết quả phân tích cho thấy độ nhám bề mặt trong quá trình phay cứng chịu ảnh hưởng chủ yếu bởi lượng chạy dao trên răng và đường kính dao, tiếp theo là chiều sâu cắt và tốc độ cắt. Sự tồn tại của các hạng tử tương tác và bậc hai với ý nghĩa thống kê cao khẳng định rằng mối quan hệ giữa các 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)



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)



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)

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

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	-	-
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%.*

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

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%.*

4.3.3. ANOVA cho mô hình lực cắt (F)

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%.*

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

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:

$$\begin{aligned} Ra = {} & 0.848170 - 0.090865 D_t - 0.005581 v_c + 6.370997 f_z + 1.461923 a_p + 0.000633 D_{avg} \\ & + 0.000070 D_t v_c - 1.056083 D_t f_z - 0.029585 D_t a_p - 0.000115 D_t D_{avg} \\ & - 0.002259 v_c f_z - 0.003261 v_c a_p - 0.000002 v_c D_{avg} + 0.980891 f_z a_p \\ & + 0.006959 f_z D_{avg} + 0.001262 a_p D_{avg} + 0.006421 D_t^2 + 0.000016 v_c^2 \\ & + 73.515860 f_z^2 - 0.472196 a_p^2 + 0.000001 D_{avg}^2 \end{aligned}$$

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:

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

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:

$$\begin{aligned} F = {} & 111.9446 - 7.7521 D_t - 0.7521 v_c + 938.9999 f_z + 237.8213 a_p - 0.0414 D_{avg} \\ & + 0.0205 D_t v_c - 147.3338 D_t f_z + 81.1601 D_t a_p - 0.0325 D_t D_{avg} \\ & - 0.5946 v_c f_z - 0.7218 v_c a_p - 0.0007 v_c D_{avg} - 5278.5399 f_z a_p \\ & + 1.4562 f_z D_{avg} + 0.4555 a_p D_{avg} + 0.0769 D_t^2 + 0.0023 v_c^2 \\ & + 25762.3114 f_z^2 - 945.8464 a_p^2 + 0.0014 D_{avg}^2 \end{aligned}$$

Kết luận chương 4

Nghiên cứu xây dựng thành công các mô hình RSM bậc hai có độ chính xác cao cho độ nhám, năng suất bóc tách và lực cắt trong quá trình gia công. Kết quả cho thấy lượng

chạy dao, chiều sâu cắt, đường kính dao và hạt nano CuO ảnh hưởng lớn đến các chỉ tiêu đầu ra, khẳng định mô hình đủ tin cậy để tối ưu hóa ở 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

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(Dt,vc,_z,ap,Davg) (5.1)

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:

min f_0Ra=f(Dt,vc,fz,ap,Davg) (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: Dt=9 mm, Davg=100 mm, vc=150 m/phút, fz=0.02 mm/răng, ap=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)

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/phút, đại diện cho chế độ cắt năng suất cao.

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

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

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

Mục tiêu	D_t (mm)	v_c (m/min)	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/min)	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

- 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).

5.2.2. Khái niệm tập Pareto và biên Pareto

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

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], là một phiên bản cải tiến của thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA) chuyên dụng cho bài toán đa mục tiêu.

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

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

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.

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

Ba hàm mục tiêu được xét đồng thời gồm:

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.

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

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/min	100 – 150
fz	Lượng chạy dao răng	mm/răng	0.02 – 0.04
ap	Chiều sâu cắt	mm	0.08 – 0.12
Davg	Kích thước hạt nano CuO	nm	{20, 50, 100}

5.4.2. Các ràng buộc công nghệ

$$\begin{cases} 100 \le v_c \le 150 \\ 0.02 \le f_z \le 0.04 \\ 0.08 \le a_p \le 0.12 \end{cases} \quad (5.9)$$

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):

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

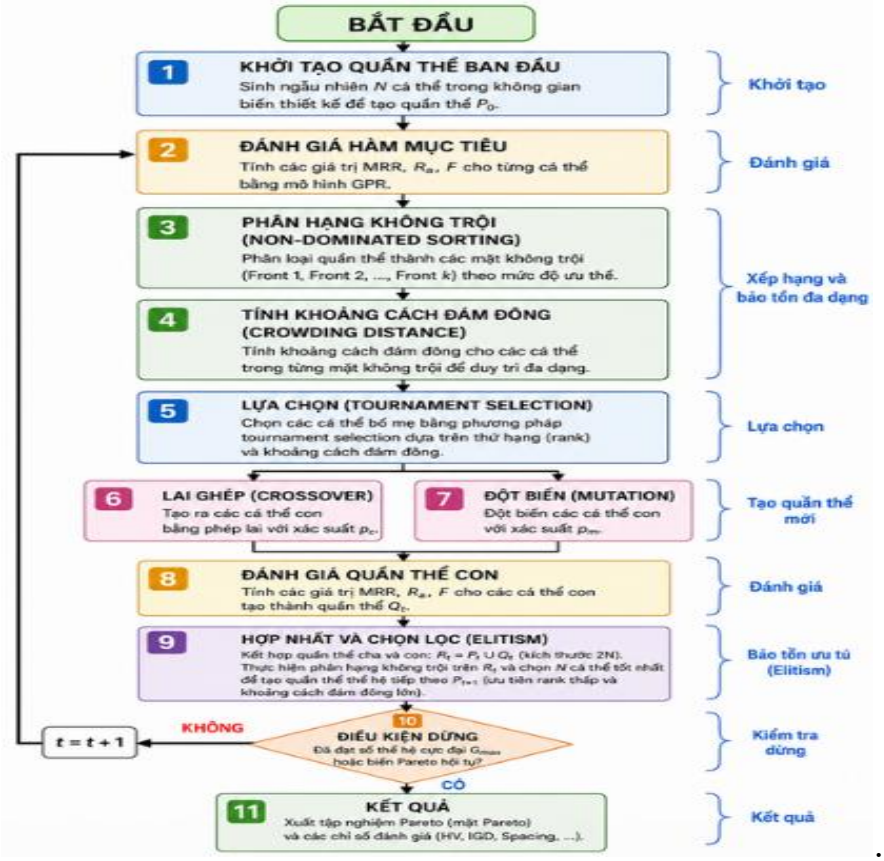
5.4.3. Chuyển đổi và thống nhất hướng tối ưu hóa các hàm mục tiêu

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

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	Min-max theo dữ liệu	Giới hạn bởi giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của dữ liệu thực nghiệm
Hàm mục tiêu	MRR, Ra, F	Tối đa hóa MRR; tối thiểu hóa Ra và F

5.4.5. Quy trình tối ưu hóa bằng NSGA-II



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

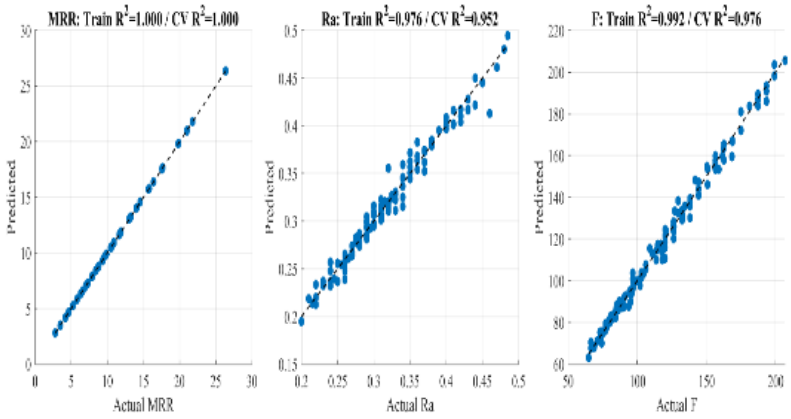
5.4.6. Xác định nghiệm Knee trên biên Pareto

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

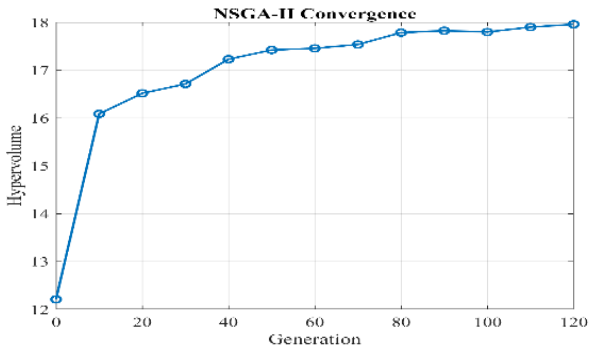


Hình 5.2. So sánh giá trị dự đoán và giá trị thực nghiệm của các mô hình GPR cho MRR, Ra và F.

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

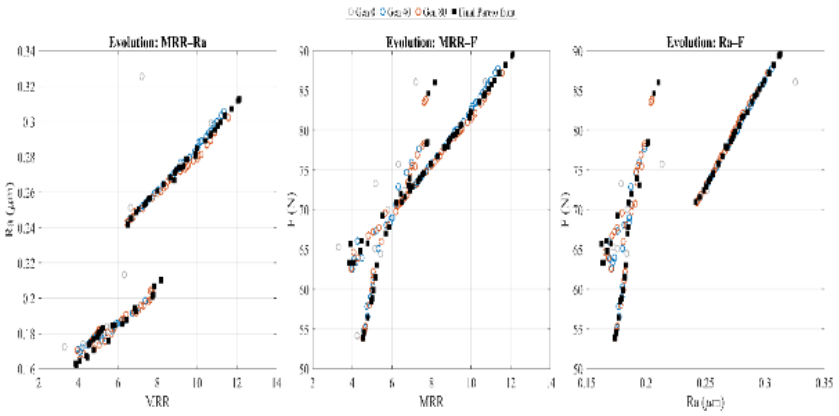
Sự hội tụ của thuật toán NSGA-II được đánh giá thông qua chỉ số Hypervolume (HV), như trình bày trong Hình 5.3.



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

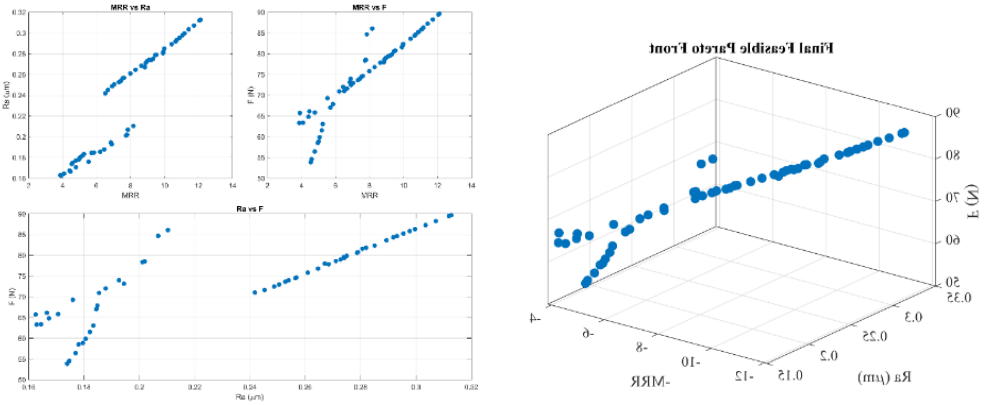
5.5.3. Sự tiến hóa của tập nghiệm Pareto

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



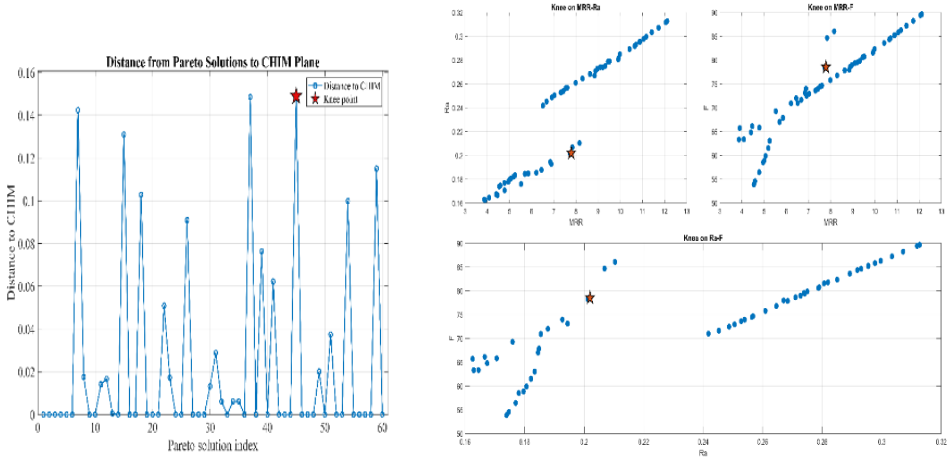
5.5.4. Phân tích tập nghiệm Pareto cuối cùng

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.



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.



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

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

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.5.5.8. Kiểm chứng thực nghiệm.

5.5.8. Kiểm chứng thực nghiệm

Các thông số công nghệ sử dụng trong thí nghiệm kiểm chứng gồm Dt=9 mm, vc=148,11 m/phút, fz=0,038 mm/răng, ap=0,11 mm và Davg=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/min)	6,89	6,78	1,60
Ra (μm)	0,19	0,18	5,26
F (N)	73,97	71,24	3,68

Kết luận chương 5

Chương 5 đã ứng dụng thành công mô hình GPR để dự báo chính xác các đáp ứng MRR, Ra và F. Thuật toán NSGA-II được triển khai để giải bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu, thiết lập biên Pareto hội tụ ổn định. Sau khi loại nghiệm Knee do không thỏa mãn yêu cầu doanh nghiệp, ba phương pháp MCDM (TOPSIS, MARCOS, EAMR) đồng thuận xác định chế độ công nghệ tối ưu thực tế duy nhất. Kết quả kiểm chứng thực nghiệm tại chế độ này đạt sai số dưới 6% so với lý thuyết, khẳng định độ tin cậy và ý nghĩa thực tiễn cao của mô hình nghiên cứu..

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

- **Thực nghiệm:** Thiết lập thành công hệ thống phay cứng bề mặt trụ ngoài thép 90CrSi bằng nano-MQL (CuO) theo mô hình Box-Behnken.
- **Quy luật:** Lượng chạy dao và chiều sâu cắt chi phối mạnh MRR, F; lượng chạy dao và đường kính dao quyết định; hạt CuO tác động phi tuyến.

- **Mô hình hóa:** Xây dựng các mô hình RSM bậc hai và học máy GPR đạt độ chính xác cao, dự báo tin cậy.
- **Tối ưu hóa:** Ứng dụng NSGA-II xác định biên Pareto ổn định. Nghiệm Knee bị loại do không đạt chuẩn.
- **Ra quyết định:** Ba phương pháp MCDM (TOPSIS, MARCOS, EAMR) đồng thuận chọn chế độ tối ưu duy nhất: Nghiệm tối ưu thu được có các thông số công nghệ 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 tương ứng đạt MRR = 6.89 g/phút, Ra = 0.19 μm và F = 73.97 N.
- **Kiểm chứng:** Thực nghiệm tại chế độ tối ưu đạt sai số dưới 6%, khẳng định tính đúng đắn của mô hình.
- **Ý nghĩa:** Đề xuất quy trình tích hợp toàn diện (Thực nghiệm - GPR - NSGA-II - MCDM) có giá trị khoa học và thực tiễn cao cho ngành cơ khí.

2. **Hướng nghiên cứu tiếp**

- **Vật liệu bôi trơn:** Mở rộng khảo sát các loại hạt nano khác hoặc chất lỏng nano lai (nanofluid lai).
- **Nồng độ tối ưu:** Nghiên cứu sâu ảnh hưởng của nồng độ hạt CuO đến chất lượng và năng suất gia công.
- **Chỉ tiêu đánh giá:** Bổ sung các thông số về nhiệt độ vùng cắt, mòn dao, ứng suất dư và tính toàn vẹn bề mặt.
- **Công nghệ kết hợp:** Thử nghiệm tích hợp nano-MQL với rung siêu âm, khí lạnh hoặc cryogenic-MQL.
- **Mô hình hóa & Bền vững:** Phát triển mô hình học máy (AI), tích hợp thêm các tiêu chí tiết kiệm năng lượng, chi phí và sản xuất bền vững.