

**BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI**



NGUYỄN DUY TRINH

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

Chuyên ngành: Kỹ thuật Cơ Khí

Mã số: 9.52.01.03

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2025

Công trình được hoàn thành tại:
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI - BỘ CÔNG THƯƠNG

Người hướng dẫn khoa học:
PGS.TS. Hoàng Tiến Dũng

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ tại Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Trường và họp tại Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội vào hồi... giờ, ngày ... tháng ... năm ...

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Hợp kim Ti-6Al-4V được sử dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp, bao gồm hàng không vũ trụ, thiết bị thể thao, hóa dầu, y tế và ô tô, cùng nhiều ngành công nghệ cao khác. Việc ứng dụng rộng rãi của vật liệu này được thúc đẩy nhờ kết hợp các ưu điểm nổi bật như trọng lượng nhẹ (chỉ bằng 56% so với thép không gỉ), khả năng tương thích sinh học cao, cùng với khả năng chống ăn mòn vượt trội cùng độ bền cao [1-3]. Với độ bền mỏi vượt trội cùng khả năng chịu nhiệt cao, điều này giúp titanium và hợp kim của chúng được sử dụng trong các ứng dụng quan trọng như tua-bin khí trong ngành hàng không vũ trụ, với khả năng chịu được nhiệt độ lên tới 600°C [4, 5]. Trong điều kiện làm việc các kết cấu chịu tải trọng quay tuần hoàn và nhiệt độ cao trong ngành hàng không như trục chính của động cơ phản lực, rôto tua-bin, trục quạt động cơ, trục máy nén cao áp, trục rotor chính của trục thăng và trục bánh xe hạ cánh, các vết nứt mỏi thường khởi nguồn từ những vết xước nhỏ hình thành trong quá trình gia công. Các vết xước hình thành trong quá trình gia công là một trong những nguyên nhân chính gây ra sự khởi phát và lan truyền vết nứt mỏi, dẫn đến hư hỏng bề mặt làm việc của chi tiết máy. Do đó, nghiên cứu giải pháp giảm vết xước trên bề mặt chi tiết chế tạo từ vật liệu hợp kim Ti-6Al-4V giúp hạn chế sự phát triển các vết nứt do mỏi [6, 7]. Ngoài ra, khi sử dụng hợp kim Ti-6Al-4V trong sản xuất hệ thống vi cơ điện tử (MEMS), độ nhám bề mặt tăng có thể dẫn đến tuổi thọ mỏi thấp hơn, tăng khả năng mòn cơ học cùng nguy cơ nứt bề mặt cao hơn. Ngược lại, khi độ nhám bề mặt thấp thì độ bền và hiệu suất sử dụng của các thiết bị này được nâng lên đáng kể.

Nhu cầu về thiết bị sử dụng các chi tiết vật liệu Ti-6Al-4V đạt nhám nanomet cùng diện tích lớn đã tăng nhanh chóng trong nhiều lĩnh vực, chẳng hạn như hàng không vũ trụ, công nghiệp hóa dầu và y học [8, 9]. Các phương pháp đánh bóng MRF đáp ứng tốt và tạo ra các bề mặt dạng gương đạt nhám bề mặt nanomet. Với hai loại đánh bóng từ tính phổ biến được sử dụng bao gồm đầu bi và bánh mài [10-12], được sử dụng để đánh bóng các bề mặt lớn theo quỹ đạo của dụng cụ. Các mô hình này có hiệu suất đánh bóng thấp cùng và yêu cầu thời gian gia công kéo dài. Do đó, khi áp dụng trong sản xuất công nghiệp và đặc biệt các bề mặt có kích thước lớn cần rất nhiều thời gian đánh bóng. Hiệu suất và hiệu quả của đánh bóng từ tính có thể được nâng cao bằng cách tăng cường độ từ trường và mở rộng diện tích làm việc của máy đánh bóng từ tính. Wang và cộng sự [13] đã đề xuất một ách từ vĩnh cửu nhằm tạo ra bề mặt siêu mịn; trong nghiên cứu này đã đạt được từ trường rộng và cho thấy hiệu quả trong các quy trình đánh bóng MRF với bề mặt

lớn. Ách từ cải tiến được Luo và các cộng sự [14] đã phát triển để tạo ra bề mặt vật liệu gốm y tế (zirconia) kích thước lớn với khả năng loại bỏ vật liệu hiệu quả và chất lượng bề mặt cao. Tuy nhiên, với các ách từ đã phát triển, từ trường ở vùng được đánh bóng không mở rộng vô hạn do hạn chế về kích thước ách từ cũng như khả năng tạo ra từ trường. Một mảng từ trường vô hạn được tạo ra thông qua sự sắp xếp nam châm có thể khắc phục những hạn chế gặp phải trong quá trình tạo ra từ trường. Tác giả Meng và cộng sự [15] đã phát triển quy trình đánh bóng bằng các cụm nam châm trong các quy trình đánh bóng MRF để mở rộng khả năng vận hành từ trường. Phân bố mật độ từ trường và hiệu suất đánh bóng được xác minh thông qua các thí nghiệm và mô phỏng. Tuy nhiên, nghiên cứu tập trung vào việc tạo ra từ trường thông qua phương pháp sắp xếp nam châm đơn giản và chưa khám phá các phương pháp cải thiện chất lượng bề mặt và loại bỏ lượng dư vật liệu gia công trong các quy trình đánh bóng MRF bằng cách tăng cường độ từ trường. Một giải pháp lý tưởng có thể cải thiện hiệu quả đánh bóng của MRF là tăng cường độ từ trường bằng mảng Halbach [16, 17]. Mảng từ trường Halbach tăng cường cường độ từ trường và mở rộng vùng kích thích, do đó tăng hiệu quả đánh bóng trong các quy trình MRF. Trong máy gia tốc hạt, động cơ hiệu suất cao, chụp cộng hưởng từ và máy phân tích từ, mảng Halbach thường được sử dụng để tạo ra từ trường cường độ cao tập trung ở một bên trong khi sử dụng một số nam châm nhỏ [18, 19]. Hơn nữa, mảng Halbach dễ dàng mở rộng vùng tạo từ trường, do đó góp phần vào hiệu quả đánh bóng của dung dịch lỏng từ tính có mặt phẳng lớn.

Xuất phát từ những thách thức trong gia công chính xác hợp kim Ti-6Al-4V và các phân tích nêu trên, nghiên cứu sinh đề xuất hướng tiếp cận mới thông qua đề tài: **“NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG BỀ MẶT KHI ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH HỢP KIM TI-6AL-4V”**. Với cách tiếp cận mới dựa trên kết hợp công nghệ đánh bóng MRF với cấu hình mảng từ Halbach được tối ưu nhằm tăng cường độ từ trường và mở rộng vùng đánh bóng, từ đó nâng cao hiệu suất loại bỏ vật liệu trong khi vẫn duy trì độ chính xác và nhám bề mặt ở cấp độ nanomet. Một điểm cải tiến quan trọng khác được thiết lập thông qua dung dịch MRF mới sử dụng các thành phần thân thiện với môi trường như Fe_3O_4 , SiO_2 , H_2O_2 , axit malic và nước tinh khiết. Hệ dung dịch từ tính được thiết lập nhằm đảm bảo khả năng đánh bóng hiệu quả, trong khi giảm thiểu tác động đến sức khỏe và môi trường, phù hợp với định hướng sản xuất xanh.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chung:

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

Mục tiêu cụ thể:

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

3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu

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

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

3.2. Phạm vi nghiên cứu

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

- Thông số công nghệ: tốc độ quay của chi tiết gia công ($200 \div 600$ vòng/phút), khoảng cách đánh bóng ($1.0 \div 2.0$ mm), số chu kỳ chuyển động qua lại của mảng Halbach ($15 \div 30$ chu kỳ/phút), thể tích dung dịch MRF ($300 \div 600$ ml).
- Thông số dung dịch MRF: nồng độ H_2O_2 ($0.5 \div 1.5\%$ theo thể tích), giá trị pH của dung dịch ($4 \div 6$).

4. Nội dung nghiên cứu

Để thực hiện được mục tiêu nghiên cứu đề ra, Nghiên cứu sinh tập trung thực hiện các nội dung chính sau đây:

- Tổng quan về công nghệ đánh bóng từ tính, tập trung vào khả năng ứng dụng MRF cho hợp kim Ti-6Al-4V. Nội dung bao gồm tổng hợp và phân tích các nghiên cứu trong và ngoài nước về MRF, đánh giá tiến trình phát triển, cơ chế hoạt động và ứng dụng thực tiễn. Đặc biệt, nghiên cứu tập trung vào thiết lập dung dịch MRF sử dụng Fe_3O_4 , SiO_2 và H_2O_2 để nâng cao hiệu suất đánh bóng, đồng thời xác định các vấn đề nghiên cứu chính cần giải quyết nhằm tối ưu hóa quá trình đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V.

- Nghiên cứu nguyên lý đánh bóng từ tính MRF và thiết lập từ trường cũng như lực đánh bóng trong gia công hợp kim Ti-6Al-4V. Trên cơ sở phân tích chi tiết về cơ chế loại bỏ vật liệu và độ nhót biểu kiến, một mảng từ trường Halbach cải tiến được thiết lập nhằm tăng cường khả năng tạo từ trường và lực đánh bóng. Nội dung chương này tập trung vào đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến lực từ tác động lên hạt từ tính, đồng thời xây dựng mô hình toán học lực đánh bóng khi sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi.

- Các thí nghiệm được xây dựng dựa trên phân tích đơn nhân tố nhằm xác định dải thông số phù hợp cho quá trình đánh bóng MRF. Hợp kim Ti-6Al-4V được đánh bóng bằng dung dịch chứa Fe_3O_4 , SiO_2 , axit malic và H_2O_2 , trong đó ảnh hưởng của nồng độ H_2O_2 và pH đến hiệu suất đánh bóng được nghiên cứu chi tiết.

- Tiến hành thực nghiệm và tối ưu hóa một số thông số công nghệ đánh bóng MRF. Trước tiên, nghiên cứu kiểm chứng mô hình lực cắt và loại bỏ vật liệu trong quá trình đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi. Tiếp theo, thực nghiệm trực giao được sử dụng để phân tích đồng thời các yếu tố công nghệ quan trọng như khoảng cách đánh bóng, thể tích dung dịch, tốc độ quay của phôi và số hành trình kép của mảng Halbach. Dữ liệu thu được được xử lý bằng phương pháp phân tích phạm vi để xác định thông số công nghệ tối ưu, hướng đến mục tiêu đạt độ nhám bề mặt thấp và khả năng loại bỏ vật liệu cao.

5. Phương pháp nghiên cứu

L luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với thực nghiệm và ứng dụng công nghệ với các nội dung chính như sau:

- *Nghiên cứu lý thuyết*: Phân tích và đánh giá các yếu tố công nghệ ảnh hưởng đến quá trình đánh bóng từ tính, bao gồm cường độ từ trường, tốc độ quay phôi, tốc độ di chuyển mảng Halbach, khoảng cách đánh bóng và thể tích dung dịch MRF.

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

- *Nghiên cứu thực nghiệm*: Các thực nghiệm đánh bóng MRF trên hợp kim Ti-6Al-4V được thiết lập nhằm kiểm chứng các mô hình toán học đã xây dựng. Thực nghiệm được tiến hành với các yếu tố công nghệ thay đổi như nồng độ H_2O_2 , pH của dung dịch, khoảng cách đánh bóng và tốc độ di chuyển của mảng Halbach. Sử dụng các phương pháp xử lý số liệu để phân tích kết quả thí nghiệm, đánh giá mối quan hệ giữa các yếu tố công nghệ và chất lượng bề mặt cũng như khả năng loại bỏ vật liệu.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

6.1. Ý nghĩa khoa học

Thiết lập mô hình đánh bóng từ tính mảng từ trường Halbach cải tiến với dung dịch từ tính thân thiện với môi trường. Ứng dụng mô hình nâng cao năng suất và cải thiện chất lượng bề mặt (độ nhám) khi đánh bóng vật liệu hợp kim Ti-6Al-4V.

Xây dựng và kiểm chứng mô hình toán học mô tả lực tiếp tuyến (F_T) và pháp tuyến (F_N) trong quá trình đánh bóng từ tính, tạo cơ sở lý thuyết trong xác định khả năng loại bỏ vật liệu và nâng cao chất lượng bề mặt vật liệu Ti-6Al-4V. Thông qua mô phỏng từ trường và thiết kế thực nghiệm, nghiên cứu làm sáng tỏ cơ chế loại bỏ lượng dư vật liệu gia công và phân tích được các yếu tố tác động chính lên chất lượng bề mặt, qua đó mở ra khả năng ứng dụng cao trong đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V.

6.2. Ý nghĩa thực tiễn

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở lựa chọn các thông số kỹ thuật trong quy trình đánh bóng từ tính hợp kim titanium, đồng thời đóng vai trò như một tài liệu tham khảo trong hỗ trợ nghiên cứu, đào tạo và phát triển các kỹ thuật gia công và đánh bóng từ tính. Nghiên cứu này tạo tiền đề cho việc áp dụng công nghệ đánh bóng tiên tiến và linh hoạt vào sản xuất nhằm nâng cao chất lượng bề mặt trong các ngành công nghiệp yêu cầu độ chính xác cao.

7. Những đóng góp mới của đề tài

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

Quy trình đánh bóng MRF sử dụng dung dịch thân thiện với môi trường gồm hạt mài SiO_2 , Fe_3O_4 , chất oxy hóa H_2O_2 và axit malic, cho hiệu quả loại bỏ lượng dư vật liệu gia công cao với nhám bề mặt ở dạng nanomet và an toàn với môi trường, phù hợp với xu hướng sản xuất bền vững.

Mô hình toán học mô tả lực tiếp tuyến và pháp tuyến đạt độ chính xác cao (sai số $<16\%$), cho phép dự đoán hiệu suất loại bỏ lượng dư vật liệu gia công và tối ưu hóa nhám bề mặt, mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các ngành yêu cầu độ chính xác cao như hàng không, y tế và hóa dầu.

8. Cấu trúc của luận án.

Luận án được cấu trúc ngoài các phần: Mở đầu, kết luận, hướng nghiên cứu tiếp theo thì nội dung nghiên cứu được trình bày trong 4 chương:

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

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

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

Chương 4. Kết quả và phân tích.

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

Nội dung chương 1 tập trung vào các nghiên cứu liên quan tới:

- Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước.
- Công nghệ đánh bóng từ tính.
- Một số phương pháp đánh bóng từ tính hợp kim Titanium.
- Thách thức khi đánh bóng từ tính hợp kim Titanium.
- Phân tích dung dịch từ tính khi đánh bóng vật liệu hợp kim Ti-6Al-4V.

Từ đó rút ra một số kết luận như sau:

- 1) Hợp kim titan được sử dụng rộng rãi nhờ trọng lượng nhẹ, độ bền cao, khả năng chịu nhiệt và chống ăn mòn, nhưng quá trình hoàn thiện bề mặt gặp nhiều thách thức.
- 2) Công nghệ đánh bóng từ tính (MRF) giúp kiểm soát chính xác lực đánh bóng nhờ chất lỏng từ lưu biến, cho phép đạt độ nhám bề mặt nanomet, phù hợp với yêu cầu cao trong y sinh, hàng không vũ trụ.
- 3) Nghiên cứu so sánh hiệu suất của MRF với các phương pháp khác như MFAF, MRAFF, R-MRAFF, trong đó MRF dạng đĩa được đánh giá cao khi gia công bề mặt phẳng.
- 4) Đề xuất sử dụng màng từ trường Halbach kết hợp với dung dịch MRF chứa SiO_2 , Fe_3O_4 , H_2O_2 và axit malic, giúp nâng cao hiệu suất đánh bóng và đảm bảo tính thân thiện với môi trường.

CHƯƠNG 2: XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐÁNH BÓNG TỪ TÍNH SỬ DỤNG MẠNG HALBACH CẢI TIẾN

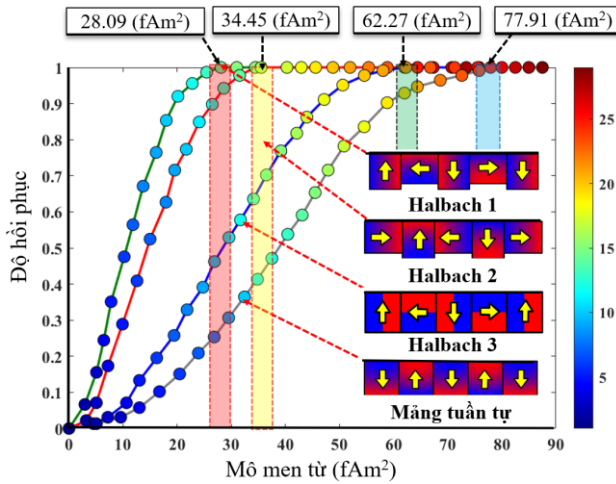
2.1. Nguyên lý và độ nhót biểu kiến trong quá trình đánh bóng từ tính

Quá trình đánh bóng từ tính dựa trên tác động của từ trường lên dung dịch MRF, tạo ra lực cắt trên bề mặt gia công. Khi chịu tác dụng của từ trường, các hạt từ tính trong MRF liên kết thành chuỗi, làm tăng độ nhót biểu kiến và chuyển trạng thái của dung dịch từ lỏng sang bán rắn. Cơ chế đánh bóng tương tự quá trình gia công cắt gọt, trong đó bề mặt vật liệu trải qua biến dạng đàn hồi, dẻo và bị loại bỏ vi mô. Độ nhót biểu kiến đóng vai trò quan trọng trong khả năng loại bỏ vật liệu, giúp kiểm soát lực cắt và đạt được độ nhám bề mặt siêu mịn.

2.2. Thiết lập sơ đồ đánh bóng từ tính với mảng Halbach cải tiến

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

Mảng Halbach tối ưu với các kích thước nam châm có chiều cao 30 mm và chiều rộng 25 mm được sử dụng trong phân tích qua đó thấy được tính ưu việt của Halbach được đề xuất so với các mảng nam châm thông thường. Các nam châm xen kẽ thông thường có kích thước chiều rộng và chiều cao là 40 mm. Độ phục hồi được xác định là hàm của mômen từ với kết quả phân tích trong Hình 2.1. Trong đó ba cấu hình Halbach khác nhau cùng phương pháp sắp xếp tuần tự được khảo sát thông qua khả năng phục hồi.

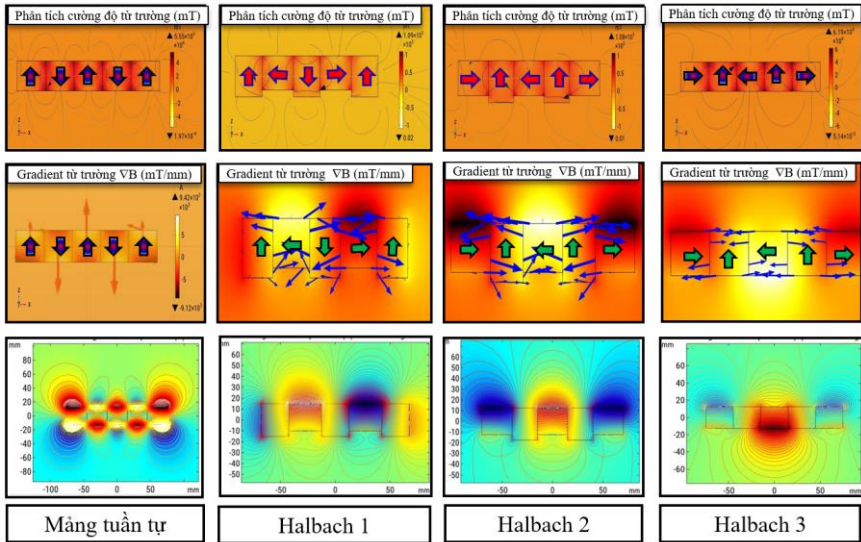


Hình 2.1 Khả năng phục hồi bằng ruy MRF theo các phương pháp sắp xếp mảng nam châm khác nhau

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

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

Mô phỏng sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics cho thấy sự phân bố độ dốc từ trường và từ thông tương ứng với các cấu trúc nam châm khác nhau (Hình 2.2). Kết quả cho thấy, khi độ dốc từ trường tăng, các tham số từ trường giảm. Khi các nam châm được sắp xếp vuông góc với nhau, các đường sức từ tập trung mạnh về một phía, tạo ra cấu trúc từ trường không đối xứng. Các mảng nam châm được sắp xếp theo cấu hình này được gọi là mảng Halbach. Trong đó, mảng Halbach 1 và Halbach 2 tạo ra từ trường tập trung hơn về một phía so với mảng Halbach 3 (mảng Halbach thông thường) và so với cách sắp xếp nam châm tuần tự theo phương pháp thông thường.



Hình 2.2 Độ dốc và cường độ từ trường thu được thông qua các phương pháp sắp xếp nam châm khác nhau

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

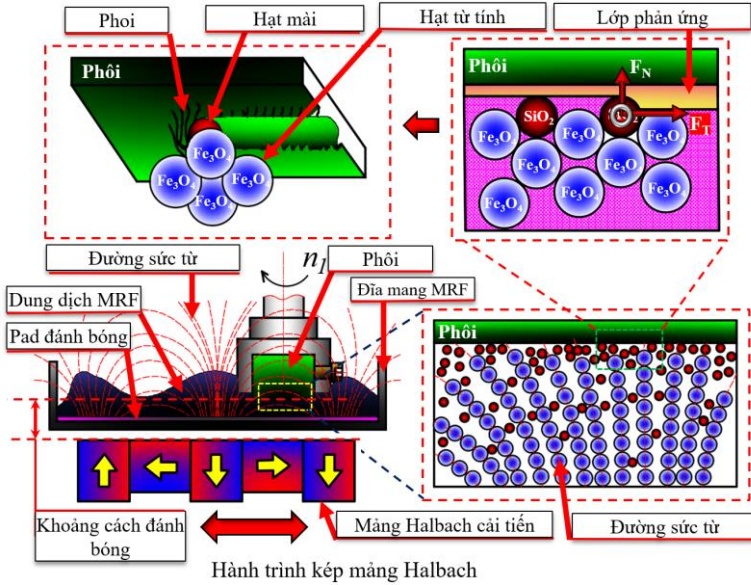
Trong các quy trình đánh bóng MRF, dòng chảy của chất lỏng quanh các hạt từ tính tạo ra lực cản. Khi chịu tác động của từ trường, các hạt Fe_3O_4 hình cầu phải chịu lực cản, được xác định bởi các yếu tố như vận tốc hạt, bán kính hạt R , độ nhớt η , và vận tốc v_ρ của dòng chất lỏng từ tính [20]. Lực cản này được tính toán dựa trên phương trình sau:

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

Các hạt từ tính trong dung dịch MRF với lực trọng trường trong dung dịch mang tạo ra được gọi là lực hấp dẫn, được mô tả theo phương trình sau:

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

2.3. Ứng dụng màng Halbach cải tiến trong đánh bóng từ tính



Hình 2.3 Nguyên lý đánh bóng MRF và cơ chế loại bỏ lượng dư vật liệu gia công với màng Halbach cải tiến

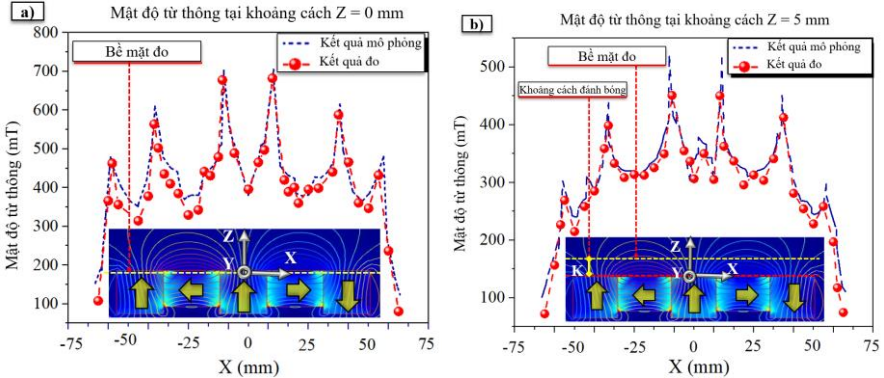
Dưới tác dụng từ trường, các hạt mài SiO_2 không từ tính được đẩy lên bề mặt phôi Ti-6Al-4V như mô tả trên Hình 2.3, tạo ra lực tiếp tuyến F_T và lực pháp tuyến F_N tác động lên bề mặt phôi. Khi các hạt mài SiO_2 kích thước nanomet di chuyển tương đối so với phôi, sự kết hợp giữa tốc độ quay của phôi do trục chính máy tạo ra và chuyển động tịnh tiến khứ hồi của màng Halbach giúp băng ruy MRF loại bỏ một lớp vật liệu gia công rất mỏng. Trong quá trình đánh bóng bằng ruy bán rắn MRF gồm các hạt Fe_3O_4 , SiO_2 , chất oxy hóa H_2O_2 , nước tinh khiết và axit malic luôn duy trì tiếp xúc với phôi. Khi băng ruy MRF di chuyển, các hạt mài và hạt từ tính mới liên tục hình thành nhờ quá trình phân phối lại dải MRF trong vùng đánh bóng tạo ra bởi cơ cấu tay quay thanh trượt. Điều này giúp nâng cao khả năng hoàn thiện bề mặt của vật liệu trong quá trình đánh bóng bằng màng Halbach cải tiến.

2.4. Phân tích từ trường và động học hạt từ tính Fe_3O_4 dưới tác dụng mảng Halbach cải tiến

Các đường sức từ, mật độ từ thông và lực từ được cải thiện trong mảng Halbach cải tiến đề xuất. Phân bố mật độ từ thông và các thay đổi trong các thành phần được cung cấp trực quan bằng hình ảnh 3D. Các thông số vật liệu được thiết lập trong phần mềm COMSOL multiphysics cung cấp lực kháng từ và từ hóa. Các kết quả mô phỏng được đề xuất đã được xác minh bằng thiết bị đo từ thông.

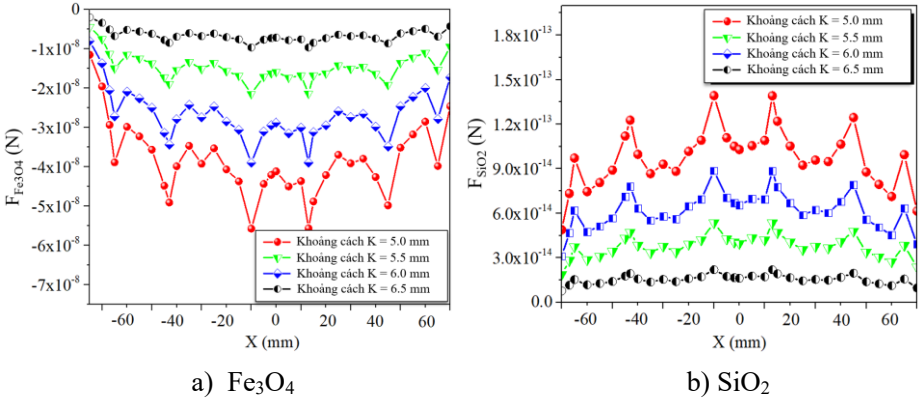
2.5. Phân tích ảnh hưởng của hạt từ tính Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2 dưới tác dụng từ trường Halbach cải tiến

Hiệu ứng từ trường tăng cường này giúp độ cứng của dải băng ruy MRF tăng lên, cùng với lực đánh bóng mạnh hơn, làm gia tăng đáng kể hiệu quả đánh bóng. Kết quả thu được cho thấy kết quả phân tích từ trường trong quá trình đánh bóng tương đương với các giá trị đo như được mô tả trên Hình 2.4. Khi mảng Halbach cải tiến thực hiện các chuyển động tịnh tiến khứ hồi, nó tạo ra các dải băng ruy MRF di chuyển đều trên bề mặt gia công, liên tục cung cấp các hạt từ Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2 mới, góp phần duy trì hiệu suất đánh bóng cao.



Hình 2.4 Kết quả đo và mô phỏng từ thông đo theo hướng X

Lực tác dụng lên các hạt từ tính Fe_3O_4 được tạo ra bởi các thông lượng từ thu được từ kết quả mô phỏng như được minh họa như trên Hình 2.5a. Lực lớn nhất tác dụng lên các hạt từ tính Fe_3O_4 được quan sát thấy ở các cạnh liền kề của nam châm. Các hạt từ có giá trị lực cao thường dịch chuyển ra khỏi bề mặt phôi và hướng về mảng Halbach. Các kết quả thể hiện trên Hình 2.5b cho thấy ở các vị trí khác nhau các giá trị lực F_{SiO_2-Z} khác nhau. Tuy nhiên, tất cả các vị trí đều hiển thị $F_{SiO_2-Z} > 0$ do đó các hạt mài SiO_2 có xu hướng di chuyển nhiều hơn về phía bề mặt gia công trong các quy trình đánh bóng MRF với các mảng Halbach cải tiến.



Hình 2.5 Lực từ tác dụng lên các hạt từ tính hạt từ Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2 dưới tác dụng của mảng Halbach cải tiến

2.6. Thiết lập mô hình lực đánh bóng cho quy trình đánh bóng với mảng Halbach tiến tịnh tiến khứ hồi

Khi xét đến tịnh tiến khứ hồi tạo ra bởi cơ cấu tay quay thanh trượt, mảng Halbach di chuyển tịnh tiến khứ hồi theo hướng x, tạo ra các dải băng ruy MRF chuyển động tịnh tiến khứ hồi trên bề mặt phôi Ti-6Al-4V. Hình 2.6 minh họa phạm vi dịch chuyển theo hướng x trên bề mặt phôi, được tạo ra bởi tác động của cơ cấu tay quay thanh trượt.

Khi có chuyển động của cơ cấu tay quay thanh trượt, lực pháp tuyến và lực tiếp tuyến động tạo ra bởi mảng Halbach theo thời gian t được xác định bởi:

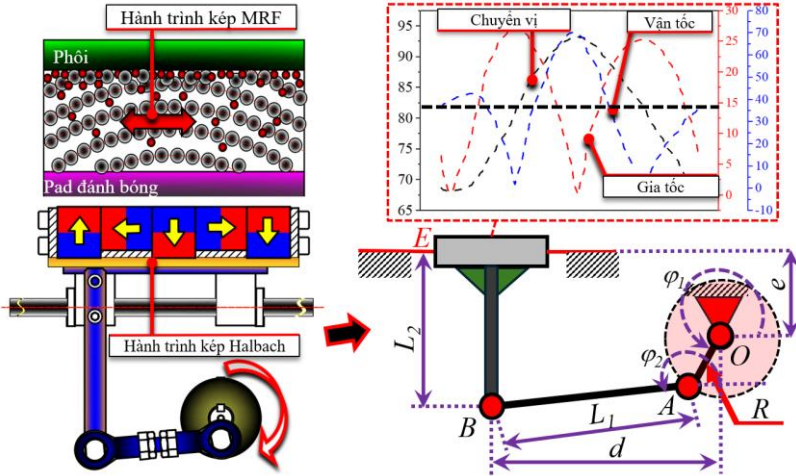
$$F_N = F_{\sigma_0}(t) = \left(\frac{\mu_0 G R^5 \rho^2}{(R+s)^2} \iint_A (H^2 \chi_m^2) dA \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{n-1} \left[\frac{\sqrt{2} E_k}{2\sqrt{\pi \varepsilon}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha - \theta}{\varepsilon} \right)^2} \cos^5 \alpha \right] d\alpha \right)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

$$F_T = F_{\tau_0}(t) + F_{\tau_i} = F_{\tau_0}(t) + P X m a$$

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

Bề mặt băng ruy MRF khi tiếp xúc với phôi Ti-6Al-4V sẽ tác động một lực đáng kể lên bề mặt phôi, góp phần tạo ra quá trình loại bỏ lượng dư vật liệu gia công hiệu quả. Dưới tác động của cơ cấu tay quay thanh trượt, mảng Halbach di chuyển theo hướng x, dẫn đến sự hình thành và di chuyển của các dải băng ruy MRF theo chuyển động của mảng Halbach. Lực pháp tuyến, phụ thuộc vào sự

tương tác giữa từ trường của mảng Halbach và bề mặt phôi, được tính bằng phương trình (2.36), trong khi lực tiếp tuyến, chịu ảnh hưởng bởi tốc độ dịch chuyển và khối lượng các hạt mài, được xác định thông qua phương trình (2.37). Hai lực này kết hợp tạo ra các tác động cắt, giúp loại bỏ lượng dư vật liệu gia công một cách hiệu quả khỏi bề mặt phôi, đồng thời duy trì độ ổn định của chuỗi từ và các hạt mài trong quá trình đánh bóng. Sự thay đổi của các lực này theo thời gian và chuyển động của cơ cấu tay quay thanh trượt sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất và chất lượng đánh bóng của hệ thống MRF.



Hình 2.6 Đặc điểm chuyển động của dải băng ruy MRF dưới tác động của mảng Halbach tịnh tiến

2.7. Kết luận chương 2

Chương này phân tích nguyên lý đánh bóng MRF dạng đĩa và đặc tính độ nhớt. Một phương pháp cải tiến sử dụng mảng Halbach được đề xuất nhằm tập trung lực từ tại khu vực đánh bóng. Các cấu hình nam châm được thiết kế, đánh giá, và tối ưu hóa với kích thước 25×30 mm, đạt mômen từ tối thiểu 28.09 fAm^2 , vùng từ trường $150 \times 135 \text{ mm}^2$ và mật độ từ thông 2.05 T .

Trong quá trình đánh bóng, dải băng ruy MRF hình thành tại điểm tiếp xúc giữa nam châm, tạo áp lực cao và độ cứng lớn. Phân tích lực từ cho thấy sự phân bố từ trường ảnh hưởng đến hạt mài và hạt từ tính. Ngoài tối ưu hóa mảng Halbach, chương này còn nghiên cứu lực từ tác dụng trong vùng đánh bóng.

Cuối cùng, một mô hình toán học được xây dựng để tính toán lực đánh bóng trong mảng Halbach cải tiến với chuyển động khứ hồi. Cấu hình tối ưu giúp tăng

cường lực từ lên hạt Fe_3O_4 và SiO_2 , cải thiện khả năng loại bỏ vật liệu và chất lượng bề mặt Ti-6Al-4V.

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

Trong chương này thực hiện các nội dung chính sau:

3.1. Mục tiêu và yêu cầu của nghiên cứu thực nghiệm

Mục tiêu:

Hệ thống thực nghiệm được xây dựng để kiểm chứng tính khả thi của mô hình đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi. Các thực nghiệm đơn yếu tố được thiết lập nhằm đánh giá ảnh hưởng của tốc độ quay phôi, khoảng cách đánh bóng, hành trình khứ hồi của mảng Halbach và thể tích dung dịch MRF đến hiệu suất đánh bóng.

Các thực nghiệm được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của nồng độ pH và hàm lượng chất oxy hóa H_2O_2 đến hiệu suất đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V, từ đó xác định điều kiện tối ưu.

Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình MRF với mảng Halbach cải tiến giúp nâng cao hiệu suất đánh bóng, cải thiện chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu, khẳng định tiềm năng ứng dụng trong gia công chính xác hợp kim Ti-6Al-4V.

Yêu cầu:

- Hệ thống cần được thiết kế để thuận tiện trong chế tạo, lắp đặt và vận hành, đồng thời dễ dàng tích hợp với các thiết bị có sẵn trong phòng thí nghiệm.
- Mảng Halbach được điều khiển bởi cơ cấu tay quay thanh trượt, cần duy trì lực từ ổn định, tối ưu hóa khả năng loại bỏ vật liệu và cải thiện độ nhám bề mặt.
- Thiết kế hệ thống phải đảm bảo hoạt động ổn định, cho phép điều chỉnh linh hoạt các thông số công nghệ như tốc độ quay, khoảng cách đánh bóng và chuyển động của mảng Halbach.

3.2. Thiết lập hệ thống thực nghiệm

3.2.1. Máy gia công

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



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

3.2.2. Vật liệu

Trong các thiết lập thực nghiệm, các phôi Ti-6Al-4V có kích thước dài, rộng và cao tương ứng $32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ đã được sử dụng trong các thí nghiệm đánh bóng MRF với mảng Halbach cải tiến với thông số vật liệu như được mô tả trên Bảng 3.1. Bề mặt phôi Ti-6Al-4V trước khi đánh bóng được mài với Ra xấp xỉ 500 nm. Thể tích dung dịch MRF được sử dụng trong các quy trình đánh bóng MRF được thiết lập ở mức 500 mL. Thành phần cụ thể được mô tả trong Bảng 3.2. Hạt mài SiO_2 (với kích thước hạt trung bình 300 nm) được cung cấp bởi Luoyang Tongrun Info Technology. Các hạt từ tính được sử dụng là Fe_3O_4 với kích thước hạt trung bình $1 \mu\text{m}$ do công ty Changsha Zhonglong Chemical. Nước tinh khiết được sử dụng trong các quy trình đánh bóng được cung cấp bởi Fisher Scientific Korea. Với dung dịch MRF cho thấy hiệu suất và chất lượng cao ở độ pH thấp, độ pH được đặt ở mức 4 với axit malic (56%).

Bảng 3.1 Thành phần hóa học của hợp kim Ti-6Al-4V [105]

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

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

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

3.2.3. Thiết bị đo

Trong nghiên cứu này, thiết bị đo cường độ từ trường, độ nhám bề mặt, lực cắt và lượng mòn dụng cụ cắt được đo bằng thiết bị đo nhám Mitutoyo Surftest JS-210; thiết bị đo lực Kistler 9139AA và kính hiển vi quang học Keyence VHX-7000.



Hình 3.2 Các thiết bị đo từ trường KT-101, Kistler 9139AA và VHX-7000

3.3. Thiết lập các thực nghiệm đơn yếu tố

Để đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ (V_c , f_z , a_p) tới độ nhám bề mặt R_a , lực cắt F_c và lượng mòn mặt sau dụng cụ cắt V_b , ma trận Taguchi L_{27} được lựa chọn cho nghiên cứu thực nghiệm.

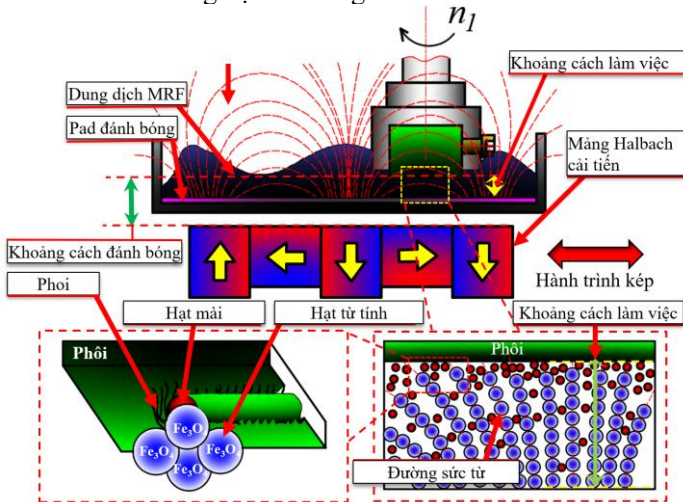
3.3.1. Ma trận thực nghiệm

Để đánh giá chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu khi đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V do mảng Halbach mang lại, các thực nghiệm được thiết kế dựa trên các điều kiện đánh bóng và thông số công nghệ được liệt kê trong Bảng 3.4.

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

Mức	Tốc độ phôi	Hành trình kép mảng Halbach	Khoảng cách đánh bóng	Thể tích MRF
1	200 rpm	15 rpm	1 mm	200 ml
2	300 rpm	20 rpm	1.5 mm	300 ml
3	400 rpm	25 rpm	2 mm	400 ml
4	500 rpm	30 rpm	2.5 mm	500 ml

Dưới tác động của từ trường do mảng Halbach tạo ra, cấu trúc các cụm hạt từ tính Fe_3O_4 trong dung dịch MRF đã gia tăng, như mô tả trong Hình 3.3, khi các hạt này sắp xếp thành chuỗi theo các đường sức từ. Độ dốc của từ trường do mảng Halbach cải tiến tạo ra, khiến các hạt từ tính bám chặt vào Pad đánh bóng và di chuyển tịnh tiến khứ hồi đồng bộ với mảng Halbach.



Hình 3.3 Sơ đồ nguyên lý đánh bóng MRF với mảng Halbach cải tiến

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

Các quy trình đánh bóng theo phương pháp CMP và MRF được thực hiện như mô tả trong Bảng 3.5 nhằm xác định phương pháp đánh bóng hiệu quả nhất cho phôi Ti-6Al-4V. Thời gian đánh bóng được điều chỉnh theo các mức 20, 40, 60, 80, và 100 phút, với khoảng cách đánh bóng là 5 mm cùng tốc độ quay của động cơ nhằm tạo chuyển động tịnh tiến khứ hồi cho băng ruy MRF được thiết lập ở mức 25 vòng/phút.

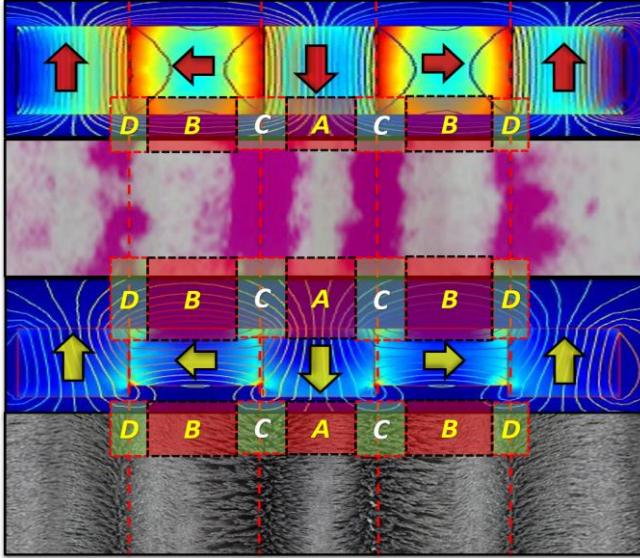
Bảng 3.5 Thành phần hỗn hợp đánh bóng MRF

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

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

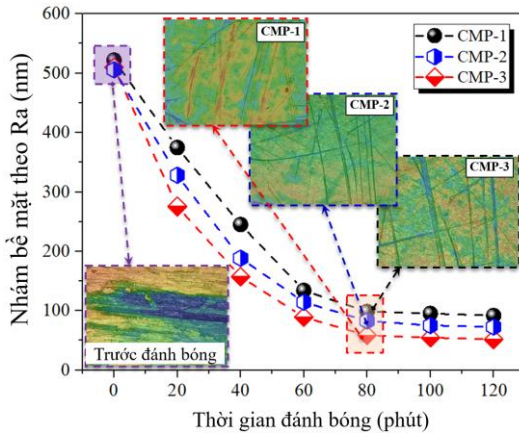
3.4. Áp lực đánh bóng do mảng Halbach tác dụng lên băng ruy từ tính (MRF)

Áp suất và vết do băng ruy MRF tác dụng lên bề mặt phôi Ti-6Al-4V trong quá trình đánh bóng từ tính với mảng Halbach cải tiến được mô tả trong Hình 3.4. Áp lực của băng ruy MRF tập trung tại vùng ranh giới (C) giữa các nam châm, cho thấy khả năng loại bỏ vật liệu cao tại vùng ranh giới này. Tại vùng ranh giới này do xuất hiện lực từ và độ dốc từ cao, qua đó các hạt từ Fe₃O₄ tập trung nhiều ở khu vực này. Do đó, băng ruy MRF với áp lực và lực từ cao hình thành và tác động lên các hạt mài SiO₂, đảm bảo loại bỏ lượng dư vật liệu gia công hiệu quả.



Hình 3.4 Áp lực tác dụng lên băng ruy MRF trong quy trình đánh bóng

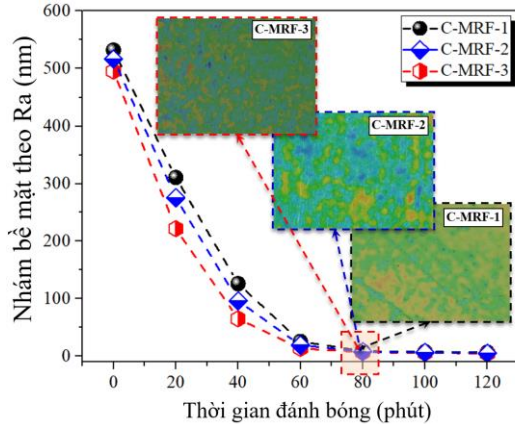
3.5. Phân tích và lựa chọn axit, hạt mài cho quá trình đánh bóng từ tính



Hình 3.5 Độ nhám bề mặt phôi Ti-6Al-4V theo thời gian bởi các quy trình CMP

Phương pháp đánh bóng với dung dịch MRF khác nhau như mô tả trong Bảng 3.5, với thay đổi nhám bề mặt theo thời gian đánh bóng khác nhau như minh họa trong Hình 3.6. Đáng chú ý, tác động của các loại axit khác nhau đến chất lượng bề mặt trong quy trình đánh bóng MRF đề xuất là không đáng kể. Đồng thời, chất lượng bề mặt đã được cải thiện đáng kể so với quy trình đánh bóng CMP

như mô tả trên Hình 3.5, với các vết xước nhỏ và độ nhám bề mặt đạt được lần lượt 10 nm, 9 nm và 7 nm khi sử dụng axit malic ($C_4H_6O_5$), axit photphoric (H_3PO_4) và axit sunfuric (H_2SO_4). Kết quả phân tích như mô tả trên Hình 3.5 và 3.11 cho thấy quy trình đánh bóng MRF đã được thiết lập hiệu quả, sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi tạo ra từ trường mạnh. Phương pháp tiếp cận này tỏ ra vượt trội so với quy trình đánh bóng CMP thông thường trong việc cải thiện khả năng đánh bóng.



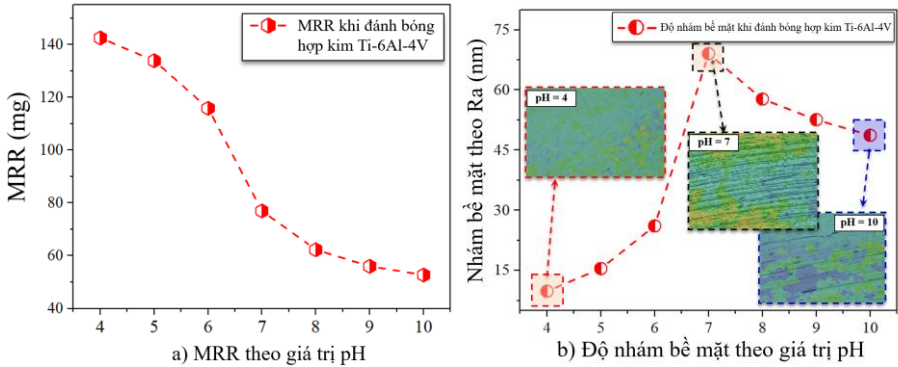
Hình 3.6 Nhám bề mặt phôi Ti-6Al-4V thu được theo thời gian và dung dịch MRF khác nhau

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

3.6. Phân tích hiệu suất đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V theo nồng độ pH khác nhau trong dung dịch MRF

Dung dịch MRF được cấu tạo từ hạt từ tính Fe_3O_4 và hạt mài SiO_2 với tỷ lệ 40% về thể tích, nước tinh khiết, và nồng độ pH được thiết lập trong khoảng từ 4 đến 10. Kết quả trình bày trong Hình 3.7a cho thấy khi pH tăng, tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công giảm. Đặc biệt ở mức pH đạt mức 10, khả năng loại bỏ vật liệu là thấp nhất khi đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V bằng MRF. Mô tả trong Hình 3.7b cho thấy chất lượng bề mặt của phôi Ti-6Al-4V có xu hướng giảm khi pH tăng. Qua các kết quả thực nghiệm cho thấy khi pH đạt mức 4, chất lượng bề mặt đạt được là tốt nhất. Tuy nhiên, khi tăng lên mức pH = 7, số lượng vết xước trên bề mặt nhiều hơn đáng kể, dẫn đến chất lượng bề mặt thô hơn thu được. Khi

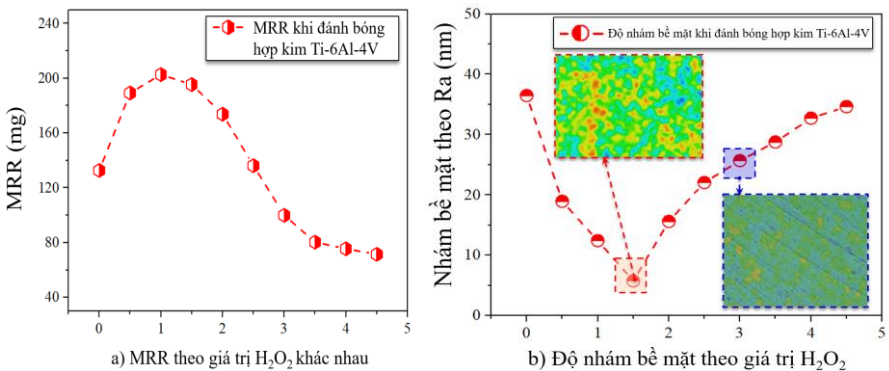
tăng thêm natri hydroxit (NaOH) để đưa pH lên trên 7, có sự cải thiện nhẹ về chất lượng bề mặt, nhưng không đáng kể.



Hình 3.7 Độ nhám bề mặt phôi Ti-6Al-4V theo thời gian bởi các quy trình CMP

Khi pH tăng đến 10, tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công giảm mạnh, mặc dù chất lượng bề mặt có phần cải thiện nhẹ so với pH 7. Ở mức pH cao, một lớp màng oxit bền hình thành trên bề mặt hợp kim titan, giúp bảo vệ bề mặt khỏi các tác động tiêu cực trong quá trình đánh bóng, qua đó không có lợi cho quy trình đánh bóng MRF. Tuy nhiên, khi pH giảm xuống dưới 4, môi trường trở nên có hại, vì vậy các nghiên cứu đều đặt giới hạn pH trong khoảng từ 4 đến 10 để cân bằng giữa hiệu suất đánh bóng và bảo vệ môi trường.

3.7. Hiệu suất đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V theo hàm lượng chất oxy hóa H_2O_2



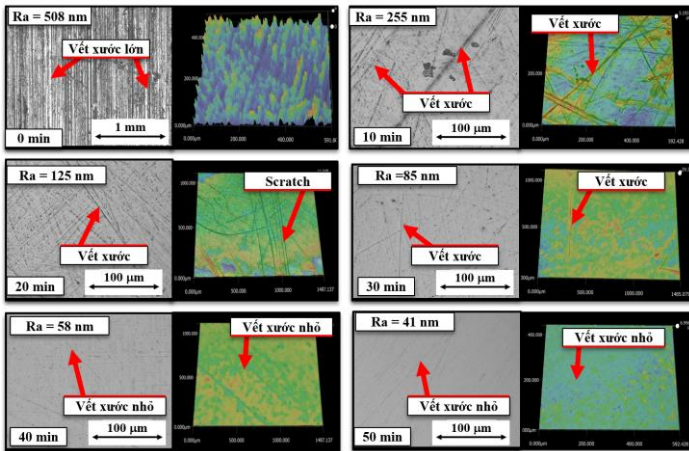
Hình 3.8 Hiệu quả đánh bóng MRF hợp kim Ti-6Al-4V theo nồng độ H_2O_2

Trong quá trình kiểm tra động lực đánh bóng ảnh hưởng đến hợp kim Ti-6Al-4V do chất oxy hóa H_2O_2 , dung dịch MRF kết hợp 40% theo thể tích hạt mài

và hạt từ tính $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$ đã được tạo thành. Độ pH được duy trì ở mức 4 và các nồng độ khác nhau của chất oxy hóa H_2O_2 đã được đưa vào trong các chuỗi đánh bóng. Hình 3.8a và b minh họa chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu (MRR), cho thấy sự thay đổi trong MRR của hợp kim Ti-6Al-4V và chất lượng bề mặt tương ứng với các nồng độ chất oxy hóa H_2O_2 khác nhau.

Khi bổ sung H_2O_2 vào dung dịch, màng oxit sẽ nhanh chóng hình thành trên bề mặt hợp kim Ti, giúp hạt mài hoạt động hiệu quả hơn, qua đó tăng khả năng loại bỏ vật liệu và cải thiện chất lượng bề mặt. Tuy nhiên, khi nồng độ H_2O_2 tăng lên 3.5% theo thể tích, tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công lại giảm, điều này có thể do sự phát triển quá nhanh của màng oxit trên bề mặt, làm hạt mài khó xuyên qua màng oxit để loại bỏ lượng dư vật liệu gia công. Ngoài ra, một lượng nhỏ oxit có thể tích tụ trong bùn MRF và trên tấm đánh bóng, khiến chất lượng bề mặt giảm khi nồng độ H_2O_2 vượt quá 1.5% theo thể tích.

3.8. Khả năng đánh bóng MRF với màng Halbach cải tiến



Hình 3.9 Hình thái bề mặt của phôi Ti-6Al-4V theo thời gian đánh bóng MRF với màng Halbach tịnh tiến khứ hồi

Những thay đổi về hình thái bề mặt phôi Ti-6Al-4V theo thời gian được thể hiện trong Hình 3.9. Các vết lõm sâu và lỗi dập bề mặt do quá trình mài ban đầu để lại dần dần bị loại bỏ, thay vào đó là bề mặt có độ nhám được cải thiện rõ rệt. Bề mặt ban đầu có độ nhám khoảng 500 nm và được đánh bóng ở khoảng cách đánh bóng 5 mm. Thời gian đánh bóng cần thiết để đạt được độ nhám bề mặt lần lượt là 255, 125, 85, 58 và 41 nm tương ứng với 10, 20, 30, 40 và 50 phút. Sau 80 phút đánh bóng, bề mặt xuất hiện các vết xước và rất nhỏ, khó quan sát được cùng với bề mặt dạng gương với độ nhám Ra đạt 7 nm. Qua đó cho thấy với mô hình

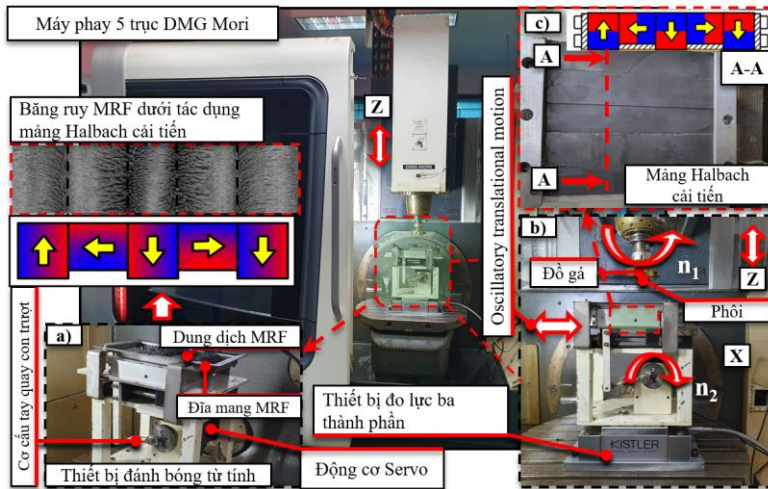
đánh bóng MRF với mảng Halbach cải tiến hiệu quả đánh bóng cao, cùng nhám bề mặt đạt được cấp độ nanomet.

3.9. Kết luận chương 3

- Chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu (MRR) của phôi Ti-6Al-4V trong quá trình đánh bóng MRF bị ảnh hưởng bởi độ pH và nồng độ H_2O_2 .
- Khi pH tăng, độ bóng bề mặt và MRR giảm, trong khi nồng độ H_2O_2 cao hơn giúp tăng MRR, đạt cực đại ở mức 1% thể tích.
- Sau 80 phút đánh bóng với mảng Halbach cải tiến, bề mặt đạt độ nhám Ra 7 nm, chứng minh hiệu quả cao của phương pháp đề xuất.

CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

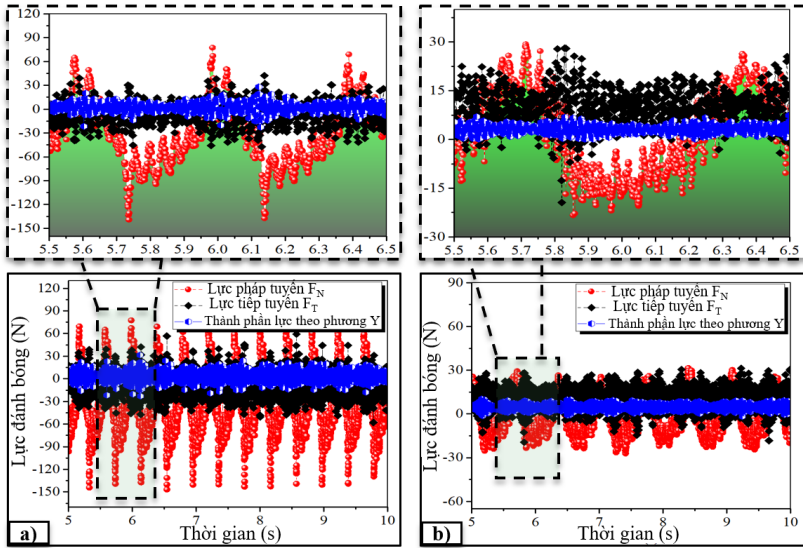
4.1. Thiết lập thực nghiệm kiểm chứng mô hình lực cắt



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

Hình 4.1 mô tả thấy thiết lập thử nghiệm đánh bóng MRF sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi được điều khiển bởi cơ cấu tay quay thanh trượt. Các thí nghiệm đánh bóng với độ nhám ban đầu khoảng 500 nm với kích thước phôi hợp kim Ti-6Al-4V 32×32×15 mm. Trong các thí nghiệm này, thể tích MRF được đặt mức 400 ml, bao gồm các hạt từ tính Fe_3O_4 (kích thước 1 μm , 36% theo thể tích), các hạt mài SiO_2 (kích thước 300 nm, 8% theo thể tích) và 2% H_2O_2 theo thể tích với axit malic được điều chỉnh đến độ pH là 4. Các tín hiệu lực được đo bằng cảm

biến lực Kisler 9139AA có độ phân giải 0,01 N, được lắp bên dưới thiết bị đánh bóng MRF.



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

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

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

Dựa trên dữ liệu thử nghiệm được trình bày trong Bảng 4.1, các giá trị của ε và θ được xác định lần lượt là 0.2508 và 0.5128. Các thí nghiệm được tiến hành trong

các điều kiện khác nhau để xác minh độ tin cậy của các mô hình F_T và F_N được đề xuất bao gồm: thể tích MRF, khoảng cách đánh bóng (K) và tốc độ quay của phôi. Nhiều thông số công nghệ khác nhau đã được lựa chọn và các mức tương ứng của chúng được trình bày trong Bảng 4.2.

Hình 4.2 cho thấy các giá trị đo được của F_T và F_N trong quá trình đánh bóng vật liệu Ti-6Al-4V bằng các hạt từ tính và hạt mài mòn Fe_3O_4 và SiO_2 . Trong các quá trình đánh bóng sử dụng màng Halbach được dẫn động bởi cơ cấu tay quay thanh trượt, có thể thấy cả lực pháp tuyến F_T và lực tiếp tuyến F_N đều tăng khi số lần di chuyển kép tăng từ 15 đến 25.

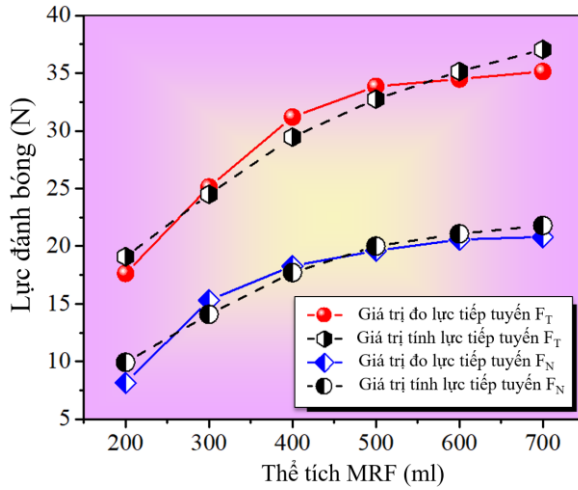
Bảng 4.2 Kiểm chứng thực nghiệm các mô hình lực đánh bóng F_T và F_N

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

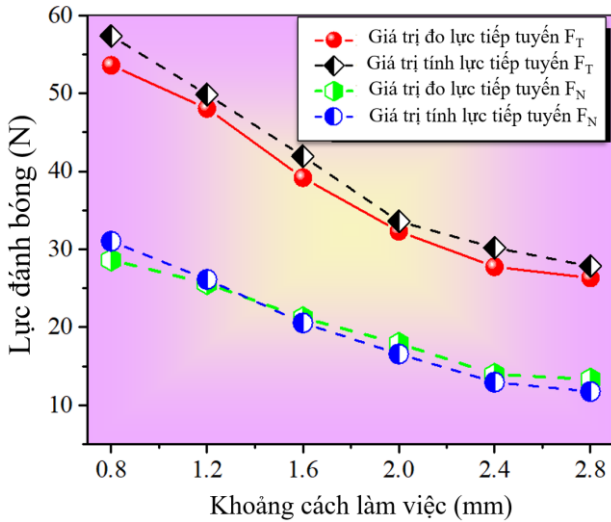
4.2. Lực tiếp tuyến và pháp tuyến trong quy trình đánh bóng từ tính sử dụng màng halbach tịnh tiến khứ hồi

Hình 4.3 minh họa tác động của thể tích dung dịch MRF lên các thành phần lực F_T và F_N trong quá trình đánh bóng sử dụng màng Halbach chuyển động qua lại. Kết quả cho thấy rằng việc tăng thể tích MRF, tương ứng với hàm lượng hạt từ cao hơn, dẫn đến tăng cả F_T và F_N . Khi thể tích MRF tăng, nhiều chuỗi hạt từ hơn tham gia vào quá trình đánh bóng, tạo ra các dải MRF dày đặc với độ cứng cao hơn. Độ cứng băng ruy MRF cùng hiệu quả cắt tăng lên tạo ra lực đánh bóng cao hơn khi có chuyển động tương đối với phôi Ti-6Al-4V.

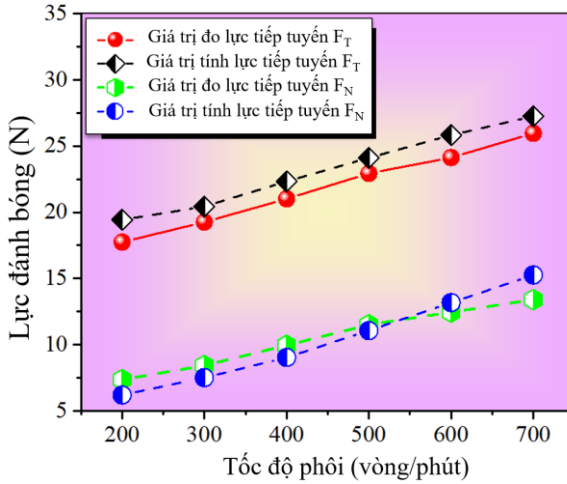
Khi tăng khoảng cách đánh bóng sẽ dẫn đến giảm lực từ, do đó làm giảm lực tác dụng lên phôi do độ cứng của ruy băng MRF giảm như minh họa trong Hình 4.4. Hình 4.5 mô tả tác động của việc thay đổi tốc độ phôi lên các thành phần lực đánh bóng F_T và F_N . Dữ liệu chỉ ra rằng việc tăng tốc độ phôi sẽ tăng cường chuyển động tương đối giữa phôi và băng ruy MRF đánh bóng, do đó làm tăng lực đánh bóng.



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



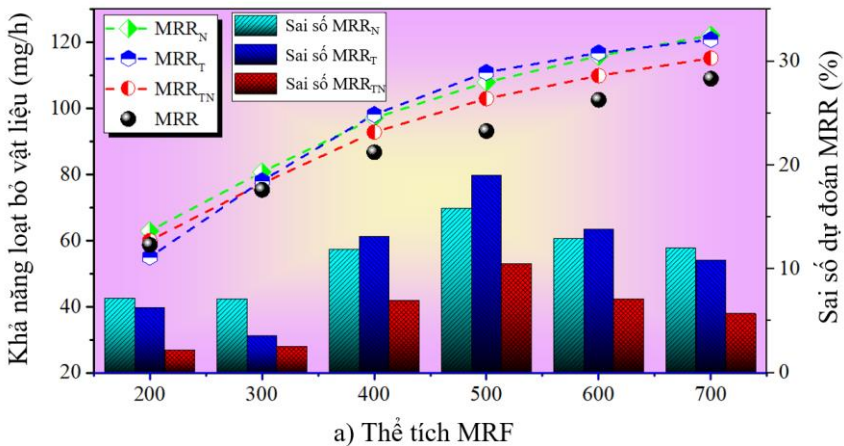
Hình 4.4 Lực đánh bóng F_T và F_N thay đổi theo khoảng cách đánh bóng K

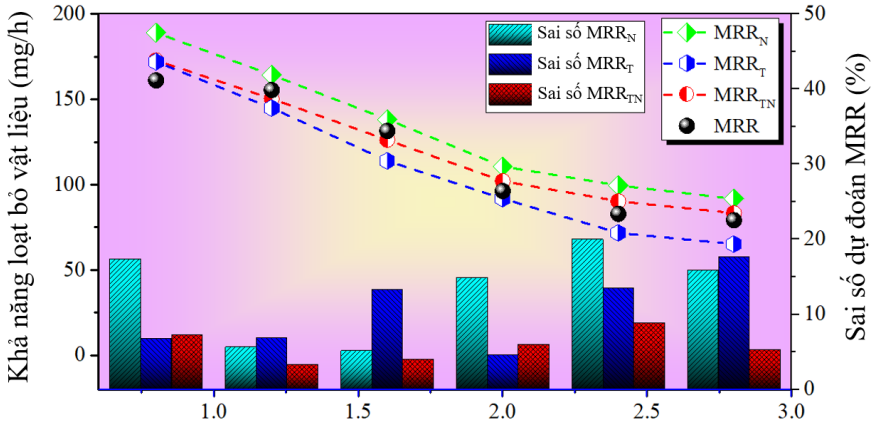


Hình 4.6 Lực đánh bóng F_T và F_N thay đổi theo tốc độ phôi

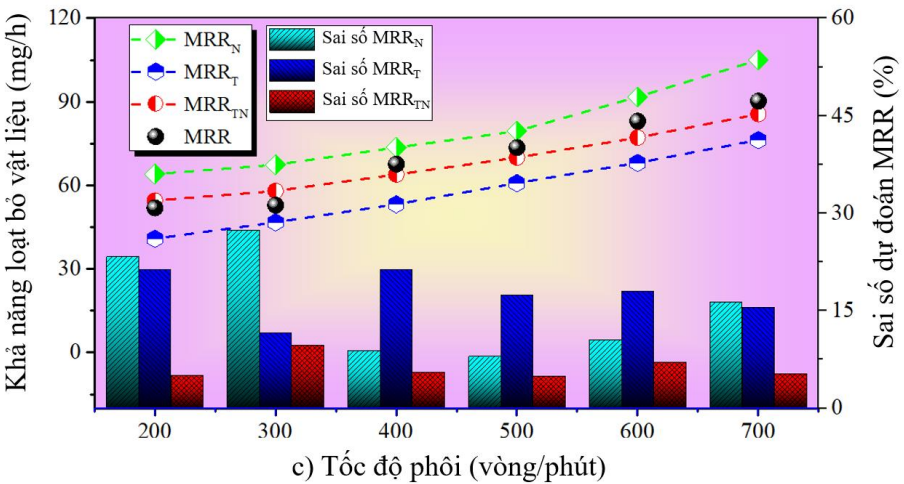
4.3. Mô hình loại bỏ vật liệu trong đánh bóng từ tính sử dụng mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi

Hình 4.7 minh họa mô hình dự đoán khả năng loại bỏ vật liệu (MRR) và sai số giữa giá trị MRR lý thuyết và dữ liệu thực nghiệm. Kết quả cho thấy tốc độ loại bỏ lượng dư vật liệu gia công tăng khi nồng độ MRF và tốc độ phôi đánh bóng cao hơn, nhưng giảm khi khoảng cách làm việc tăng.





b) Khoảng cách đánh bóng K



c) Tốc độ phôi (vòng/phút)

Hình 4.7 Giá trị sai số MRR_{NT} , MRR_T và MRR_N so với thực nghiệm (MRR)

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

và phôi. Nghiên cứu này sẽ góp phần quan trọng trong việc dự đoán chính xác chất lượng bề mặt của phôi Ti-6Al-4V cho các nghiên cứu tương lai.

4.4. Thiết lập thực nghiệm trực giao

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

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

Mức	Hành trình kép của mảng Halbach	Khoảng cách đánh bóng (mm)	Tốc độ phôi (rpm)	Thể tích MRF (ml)
1	15 Hành trình kép	1	200	200
2	20 Hành trình kép	1.5	300	300
3	25 Hành trình kép	2	400	400
4	30 Hành trình kép	2.5	500	500

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

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

Sau khi hoàn thành, kết quả được phân tích bằng phương pháp phạm vi để xác định thứ tự ảnh hưởng của các yếu tố chính và phụ đến chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu cùng với đó đưa ra bộ thông số công nghệ tối ưu. Các thí nghiệm đánh bóng MRF được thực hiện với các yếu tố ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu, bao gồm hành trình kép của mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi (C1), khoảng cách đánh bóng (C2), tốc độ phôi (C3), và thể tích bùn MRF (C4).

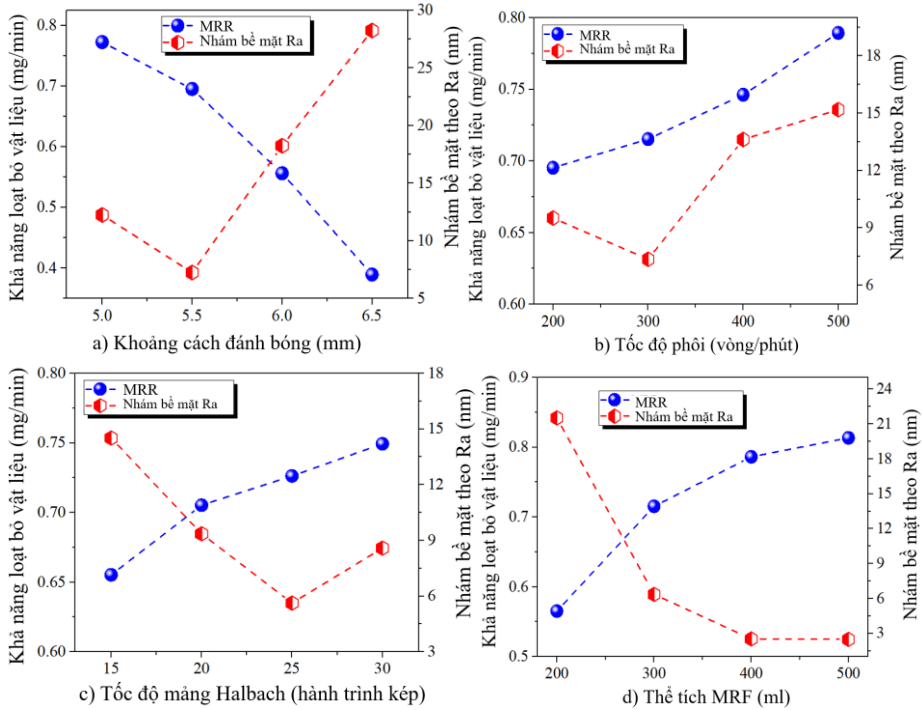
4.5. Chất lượng bề mặt khi đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi theo các thông số công nghệ khác nhau

Các thông số công nghệ ảnh hưởng đến khả năng loại bỏ vật liệu và độ nhám bề mặt được minh họa trong Hình 4.8. Khi khoảng cách đánh bóng tăng từ 5 mm lên 6.5 mm, MRR giảm từ 0.77 xuống 0.39 mg/phút do cường độ từ trường giảm (Hình 4.8a). Tăng tốc độ quay phôi từ 200 lên 500 vòng/phút giúp MRR tăng từ 0.65 lên 0.76 mg/phút nhờ tăng số lần tiếp xúc giữa phôi và băng ruy MRF (Hình 4.8b). Khi số hành trình kép của mảng Halbach tăng, MRR cũng tăng từ 0.66 lên 0.73 mg/phút do tăng cường chuyển động giữa phôi và băng ruy (Hình 4.8c). Thể tích MRF tối ưu là 400 mL, giúp MRR đạt 0.86 mg/phút mà không gây lãng phí vật liệu (Hình 4.8d).

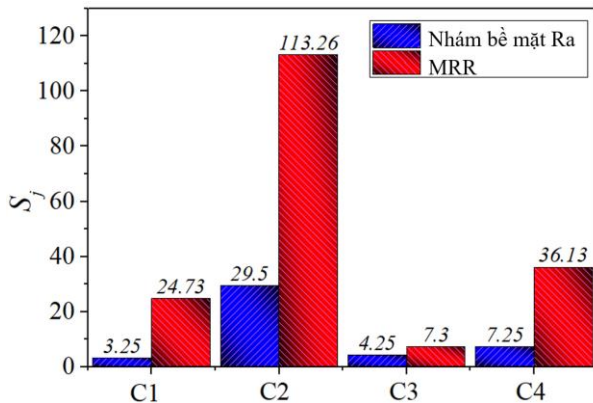
Các kết quả được mô tả trong Hình 4.10, làm sáng tỏ các chỉ số ảnh hưởng (M_{ij}) liên quan đến nhám bề mặt và MRR sau khi đánh bóng hợp kim Ti-6Al-4V được thực hiện theo các thông số công nghệ khác nhau, mỗi thông số được đặc trưng bởi các mức cụ thể. Khi phân tích nhám bề mặt, có thể thấy rõ từ Hình 4.9 đối với yếu tố C1, giá trị trung bình M_{ij} thấp nhất được quan sát ở mức 4 và các yếu tố C2, C3 và C4 lần lượt thể hiện mức 2, 3 và 4. Do đó, tổ hợp tham số tối ưu để đạt được giá trị độ nhám bề mặt thấp nhất được thiết lập là C1, C2, C3 và C4 ở mức 4, 2, 3 và 4. Ngược lại, trong bối cảnh MRR, giá trị M_{ij} cao hơn cho thấy hiệu quả đánh bóng được cải thiện. Do đó, các tham số liên quan đến việc loại bỏ lượng dư vật liệu gia công cao nhất tương ứng với C1, C2, C3 và C4 ở mức 4, 1, 2 và 4 như mô tả trong Hình 4.10.

Kết quả hình thái bề mặt được thể hiện trong Hình 4.11, với bốn thí nghiệm xác minh cho thấy nhám bề mặt thu được với $R_a = 1$ nm. So với kết quả từ 16 nhóm thí nghiệm theo phương pháp trực giao, các thí nghiệm xác minh cho chất lượng bề mặt cải thiện hơn đáng kể. Quan sát hình thái bề mặt trong quá trình thí nghiệm xác minh cho thấy chỉ xuất hiện các vết xước rất nhỏ và bề mặt đạt được độ bóng cao. Việc ứng dụng quy trình đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi cho hợp kim Ti-6Al-4V, trên cơ sở các thí nghiệm theo phương pháp trực giao, đã cho phép xác định được các thông số tối ưu. Kết quả của quá trình xác minh này cho thấy bề mặt hợp kim Ti-6Al-4V đạt được độ bóng cao và vượt trội

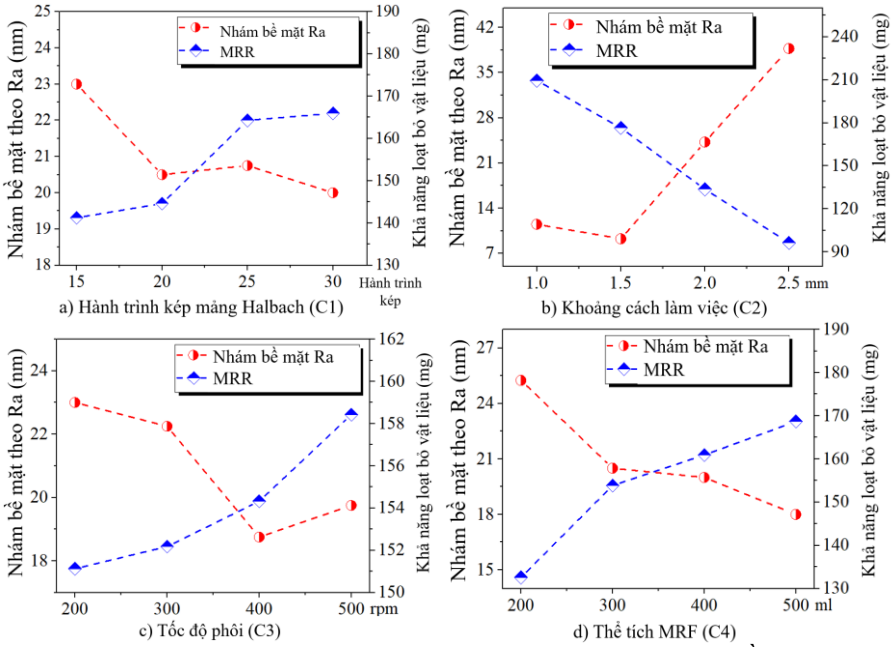
so với thực nghiệm trực giao, chứng tỏ tính hiệu quả của quy trình đánh bóng trong việc cải thiện chất lượng bề mặt và kiểm soát vết xước ở mức tối thiểu.



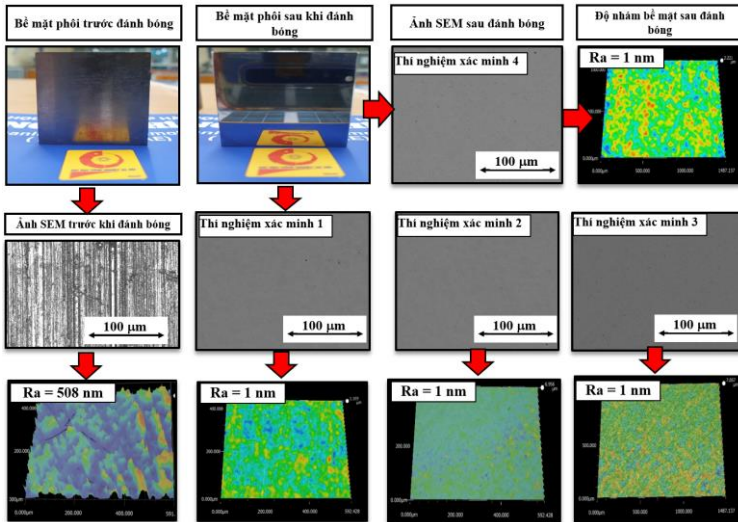
Hình 4.8 Ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến chất lượng bề mặt và khả năng loại bỏ vật liệu



Hình 4.9 Các giá trị S_j tương ứng của từng yếu tố



Hình 4.10 M_{ij} với Ra và MRR khi đánh bóng phôi Ti-6Al-4V bằng dung dịch MRF theo các thí nghiệm trực giao



Hình 4.11 Bề mặt phôi Ti-6Al-4V sau khi đánh bóng MRF với mảng Halbach tịnh tiến khứ hồi theo các điều kiện công nghệ tối ưu

4.6. Kết luận chương 4

Quy trình đánh bóng MRF thân thiện với môi trường được áp dụng cho hợp kim Ti-6Al-4V, trong đó mô hình toán học của lực tiếp tuyến (F_T) và lực pháp tuyến (F_N) đã được kiểm chứng qua thực nghiệm với mảng Halbach tĩnh tiến. Thí nghiệm trực giao kết hợp phương pháp phạm vi xác định thông số công nghệ tối ưu, sử dụng dung dịch MRF gồm SiO_2 , Fe_3O_4 , H_2O_2 và axit malic. Kết quả cho thấy mô hình lực đánh bóng đạt độ chính xác cao (sai số dưới 16%), đồng thời mô hình dự đoán MRR chính xác hơn khi xét cả F_T và F_N . Thứ tự ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt là khoảng cách đánh bóng > thể tích MRF > tốc độ quay phôi > mảng Halbach. Thông số tối ưu gồm 30 hành trình kép, khoảng cách đánh bóng 1.5 mm, tốc độ quay phôi 400 vòng/phút, thể tích MRF 500 ml, giúp đạt $R_a = 1$ nm.

HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA ĐỀ TÀI

Đề tài kiến nghị những hướng nghiên cứu cần được tiếp tục thực hiện đó là:

1. Sử dụng SEM, TEM, XRD để phân tích sự thay đổi bề mặt trong quá trình đánh bóng MRF, làm rõ cơ chế hóa học và cơ học, từ đó tối ưu hóa vật liệu và dung dịch đánh bóng.
2. Phát triển mảng Halbach hiệu suất cao để đánh bóng bề mặt phức tạp (hình cầu, hình nón, vi cấu trúc), mở rộng ứng dụng MRF trong hàng không, y tế, và linh kiện điện tử.
3. Ứng dụng thuật toán di truyền, học máy, AI để tối ưu hóa và dự đoán chất lượng bề mặt, nâng cao hiệu suất đánh bóng và tiết kiệm tài nguyên.
4. Phát triển dung dịch MRF thân thiện môi trường, đảm bảo hiệu suất cao, đáp ứng tiêu chuẩn môi trường nghiêm ngặt.
5. Mở rộng MRF cho vật liệu tiên tiến như gốm, hợp kim siêu bền, composite, nâng cao tiềm năng công nghệ trong sản xuất yêu cầu độ chính xác cấp nguyên tử.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

- [1] D. H. Tien and **T. N. Duy***, "Novel magnetic field array optimization method for the chemical magnetorheological finishing of Ti-6Al-4V alloy with SiO₂ abrasive and Fe₃O₄ magnetic particles," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (**SCIE Q1, IF 2.9**), vol. 134, no. 3, pp. 1395-1417, 2024/08/03 2024.
- [2] D. H. Tien and **N. D. Trinh***, "Novel hybrid chemical magnetorheological fluid for polishing Ti-6Al-4V alloy," *Materials and Manufacturing Processes* (**SCIE Q1, IF 4.1**), vol. 39, no. 12, pp. 1798-1815, 2024/03/07 2024.
- [3] D. H. Tien, P. T. T. Thoa, N. Van Que, and **T. N. Duy***, "Developing material removal rate from polishing force modeling via magnetorheological finishing using an improved Halbach array with a slider crank mechanism for Ti-6Al-4V alloy," *Materials Today Communications* (**SCIE Q1, IF 3.7**), vol. 45, p. 112360, 2025/04/01/ 2025.
- [4] **N. D. Trinh**, D. H. Tien, P. T. T. Thoa, N. Van Que, K. V. Quang, and N. T. Mai, "Circular Halbach array integrated using an abrasive circulating system during the ultra-precision machining of polymethyl methacrylate optical material," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* (**SCOPUS Q1**), vol. 7, no. 6, pp. 793-808, 2024/11/01/ 2024.
- [5] **N. Duy Trinh et al.**, "A Novel Circulating Abrasive Flow Strategy Using Circular Halbach Array for Magneto-Rheological Finishing of Ti-6Al-4V," *Journal of Machine Engineering* (**SCOPUS Q2**), vol. 24, 03/13 2024.
- [6] D. H. Tien, **T. N. Duy**, and P. T. T. Thoa, "Applying GPR-FGRA hybrid algorithm for prediction and optimization of eco-friendly magnetorheological finishing Ti-6Al-4V alloy," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* (**ISI Q2**), vol. 17, no. 2, pp. 729-745, 2023/04/01 2023.
- [7] **Trinh, N.D.**, N.M. Quang, L.T.P. Thanh, N.T. Tung, D.N. Hoanh, and N.N. Quan, *An advanced magnetic abrasive finishing with regenerative abrasive particles for polymethyl methacrylate material using a Halbach array*. Sādhanā (**SCIE Q2**), 2025. **50**(2): p. 74.
- [8] **Duy, T.N.**, N.M. Quang, and N. Van Que, *Surface quality and material removal via viscosity-controlled Magnetorheological finishing Ti-6Al-4V using Fe₃O₄-SiO₂ abrasives and Halbach array*. Results in Engineering (**ISI Q1**), 2025. **26**: p. 105089.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Liu, D. Zhang, and C. Yao, "A modified constitutive model coupled with microstructure evolution incremental model for machining of titanium alloy Ti-6Al-4V," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 297, p. 117262, 2021/11/01/ 2021.
- [2] Y. Liu, D. Geng, Z. Shao, Z. Zhou, X. Jiang, and D. Zhang, "A study on strengthening and machining integrated ultrasonic peening drilling of Ti-6Al-4V," *Materials & Design*, vol. 212, p. 110238, 2021/12/15/ 2021.
- [3] N. Khanna, P. Shah, L. N. L. de Lacalle, A. Rodríguez, and O. Pereira, "In pursuit of sustainable cutting fluid strategy for machining Ti-6Al-4V using life cycle analysis," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 29, p. e00301, 2021/09/01/ 2021.
- [4] A. S. Kumar, B. G. Priyadarshini, B. Jahaziel, and V. Krishnaraj, "On the formation of Ti₂AlN MAX phase coatings and improvement in tool life by superimposing on tungsten carbide cutting tool for machining Ti-6Al-4V alloys," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 107, pp. 210-225, 2023/12/01/ 2023.
- [5] R. Bammidi, D. Sreeramulu, H. Madivada, P. K. Rejeti, and M. Venkatesh, "Towards an understanding of Ti-6Al-4V machining and machinability," *Materials Today: Proceedings*, 2023/09/15/ 2023.
- [6] V. Zega *et al.*, "A 3D Printed Ti6Al4V Alloy Uniaxial Capacitive Accelerometer," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 18, pp. 19640-19646, 2021.
- [7] T. N. Pornsin-sirirak, Y. C. Tai, H. Nassef, and C. M. Ho, "Titanium-alloy MEMS wing technology for a micro aerial vehicle application," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 89, no. 1, pp. 95-103, 2001/03/20/ 2001.
- [8] L. Ednie *et al.*, "The effects of surface finish on the fatigue performance of electron beam melted Ti-6Al-4V," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 857, p. 144050, 2022/11/01/ 2022.
- [9] A. D. Di Crescenzo, M. Mousseigne, and W. Rubio, "Effect on surface integrity of high-productivity finishing on Ti-6Al-4V with wiper edge length tool," *Procedia CIRP*, vol. 108, pp. 406-411, 2022/01/01/ 2022.
- [10] N. A. Mutalib, I. Ismail, S. M. Soffie, and S. N. Aqida, "Magnetorheological finishing on metal surface: A review," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 469, no. 1, p. 012092, 2019/01/01 2019.
- [11] W. Wang, S. Ji, and J. Zhao, "Review of magnetorheological finishing on components with complex surfaces," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 131, no. 5, pp. 3165-3191, 2024/03/01 2024.
- [12] A. S. Rajput, M. Das, and S. Kapil, "A comprehensive review of magnetorheological fluid assisted finishing processes," *Machining Science and Technology*, vol. 26, no. 3, pp. 339-376, 2022/05/04 2022.

- [13] Y. Wang, S. Yin, and H. Huang, "Polishing characteristics and mechanism in magnetorheological planarization using a permanent magnetic yoke with translational movement," *Precision Engineering*, vol. 43, pp. 93-104, 2016/01/01/ 2016.
- [14] H. Luo *et al.*, "An atomic-scale and high efficiency finishing method of zirconia ceramics by using magnetorheological finishing," *Applied Surface Science*, vol. 444, pp. 569-577, 2018/06/30/ 2018.
- [15] M. Nie, J. Cao, J. Li, and M. Fu, "Magnet arrangements in a magnetic field generator for magnetorheological finishing," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 161-162, p. 105018, 2019/10/01/ 2019.
- [16] M. Xie, Z. An, and J. Zhuang, "Design and experimental research of dynamic magnetic field device based on Halbach array in magnetorheological polishing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, 06/01 2022.
- [17] J. Qin, M. Feng, and Q. Cao, "Processing Optimization for Halbach Array Magnetic Field-Assisted Magnetic Abrasive Particles Polishing of Titanium Alloy," *Materials*, vol. 17, no. 13. doi: 10.3390/ma17133213
- [18] K. Nishimura, "The strongest array beyond Halbach array," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 580, p. 170933, 2023/08/15/ 2023.
- [19] J. Ye *et al.*, "Concise magnetic force model for Halbach-type magnet arrays and its application in permanent magnetic guideway optimization," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 587, p. 171301, 2023/12/01/ 2023.
- [20] Z. Huang, Q. Yan, J. Pan, Z. Chen, and J. Lu, "Dynamic magnetic field magnetorheological finishing with constant load and variable gap," *Precision Engineering*, vol. 86, pp. 388-399, 2024/03/01/ 2024.