

ẢNH HƯỞNG TƯƠNG HỒ CỦA CƯỜNG ĐỘ DÒNG ĐIỆN VÀ BỘT NI ĐẾN TÍNH CHẤT BỀ MẶT CỦA THÉP 30CrNi2MoVA ĐƯỢC GIA CÔNG BẰNG TIA LỬA ĐIỆN CÓ TRỘN BỘT

Nguyễn Văn Tuân¹, Nguyễn Minh Đạt², Đỗ Mạnh Tùng², Lê Văn Tạo³,
Nguyễn Văn Hoàng², Nguyễn Mạnh Hùng^{2,*}

¹Khoa Cơ bản cơ sở, Trường Cao đẳng Công nghiệp quốc phòng

²Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

³Trung tâm Công nghệ, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

Tóm tắt

Nhiều nghiên cứu về đặc tính của lớp bề mặt qua gia công bằng tia lửa điện (EDM) đã được tiến hành. Tuy nhiên, chưa có nhiều nghiên cứu sử dụng bột Ni trong phương pháp gia công tia lửa điện có trộn bột (PMEDM) và khảo sát về ảnh hưởng của Ni đến tính chất của lớp bề mặt. Trong bài báo này, ảnh hưởng của các thông số công nghệ chính bao gồm dòng điện (I_p) và bột Ni tới tốc độ bóc tách vật liệu (MRR) và các tính chất bề mặt như độ nhám trung bình bề mặt (S_a) và tổ chức lớp bề mặt thép 30CrNi2MoVA được gia công bằng phương pháp PMEDM với bột Ni đã được nghiên cứu. Kết quả chỉ ra rằng I_p ảnh hưởng lớn nhất tới tốc độ bóc tách vật liệu và độ nhám bề mặt. Cụ thể, khi tăng I_p từ 5A lên 9A, MRR tăng 128% và 83% tương ứng với chế độ PMEDM và EDM, S_a tăng 31,8% và 30,5% tương ứng với chế độ PMEDM và EDM. Ngoài ra, sự hiện diện của bột Ni cải thiện đáng kể độ nhám bề mặt và MRR.

Từ khóa: EDM; PMEDM; MRR; tổ chức tế vi; độ nhám bề mặt.

1. Đặt vấn đề

Phương pháp gia công bằng tia lửa điện (EDM) đang ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp sản xuất ô tô, xe máy, điện tử, hàng không vũ trụ, y sinh... Khả năng nổi bật nhất của công nghệ này là gia công được các vật liệu có độ cứng cao, gây mài mòn mạnh dao cắt như Ti6Al4V, SKH54, SKD61. Tuy nhiên, gia công EDM có đặc điểm là tốc độ bóc tách vật liệu rất thấp và chất lượng bề mặt chưa tốt. Do đó, nhiều nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc cải thiện hiệu suất gia công và chất lượng bề mặt nhằm nâng cao hiệu quả của công nghệ này. Một trong những phương pháp được sử dụng phổ biến là trộn bột dẫn điện với kích thước μm hoặc nm vào dung dịch điện môi của quá trình EDM. Quá trình như vậy được gọi là gia công tia

* Tác giả liên hệ, email: hungnm@lqdtu.edu.vn
DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v20.n03.990

lửa điện có trộn bột (*Powder Mixed Electrical Discharge Machining - PMEDM*). PMEDM đã cải thiện đáng kể khả năng phóng điện giữa hai điện cực trong quá trình gia công. Sự tham gia của các hạt bột dẫn điện vào quá trình phóng điện đã làm giảm khả năng cách điện của dung dịch điện môi, thay đổi khoảng trống phóng điện giữa vật liệu và phôi [1]. Sự có mặt của các hạt bột dẫn điện khiến cho các tia lửa điện đồng đều hơn, kênh dẫn điện được mở rộng, năng lượng phóng điện được chia nhỏ và các hồ phóng điện trở nên nông hơn [2]. Do đó, quá trình phóng điện trở nên ổn định, nâng cao hiệu suất gia công và chất lượng bề mặt [3].

Nhiều nhà khoa học đã sử dụng các loại bột khác nhau trong quá trình EDM để đạt được chất lượng bề mặt mong muốn. Tuy nhiên, với hiểu biết của các tác giả, các nghiên cứu về ảnh hưởng của bột Ni tới đặc tính gia công và chất lượng bề mặt thép trong quá trình PMEDM còn tương đối ít. Ni là kim loại có khả năng cải thiện độ dẻo cho thép, chống ăn mòn rất tốt, chịu được nhiệt độ cao, do đó thường được sử dụng để hợp kim hóa thép hoặc để mạ các chi tiết thép quan trọng. Thép 30CrNi2MoVA là một loại thép hợp kim chất lượng cao, được sử dụng phổ biến trong ngành cơ khí. Do đó, nghiên cứu quá trình gia công PMEDM trộn bột Ni có ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn. Trong nghiên cứu này, các tác giả tập trung phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ chính bao gồm cường độ dòng điện gia công (I_p) và bột Ni tới tốc độ bóc tách vật liệu (*Material Removal Rate - MRR*) và độ nhám trung bình bề mặt (S_a) của thép 30CrNi2MoVA trong quá trình gia công PMEDM với bột Ni. Ngoài ra, tổ chức bề mặt thép sau gia công PMEDM cũng được khảo sát.

2. Vật liệu và phương pháp

2.1. Vật liệu

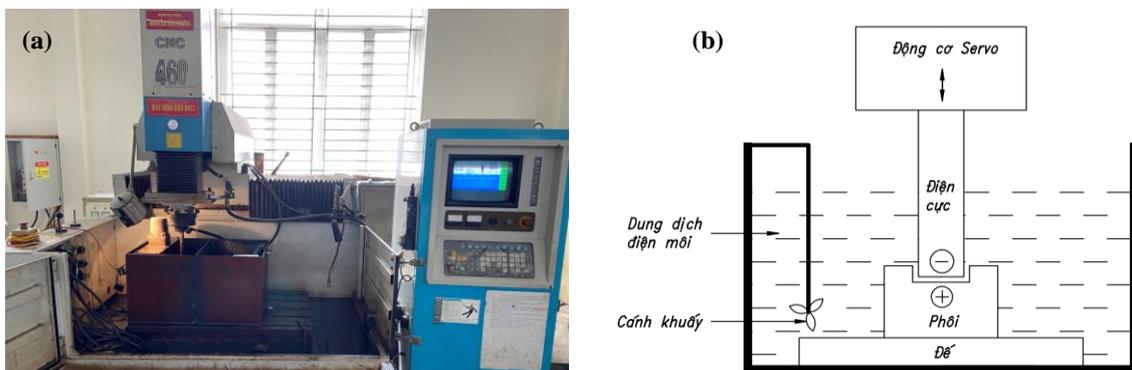
Trong thí nghiệm, vật liệu sử dụng là phôi thép 30CrNi2MoVA nhập khẩu từ Trung Quốc có thành phần hóa học của thép được xác định như trong Bảng 1 (trương đương tiêu chuẩn ГОСТ 4543-71). Dung dịch điện môi được sử dụng là dầu xung điện NP EDM FLUID được cung cấp bởi Công ty NPOIL (Việt Nam). Bột Ni với kích thước hạt 3-5 μm được sử dụng trong quá trình gia công PMEDM được cung cấp bởi Công ty Guangzhou Sailong Additive Manufacturing (Trung Quốc).

Bảng 1. Thành phần hóa học của thép 30CrNi2MoVA

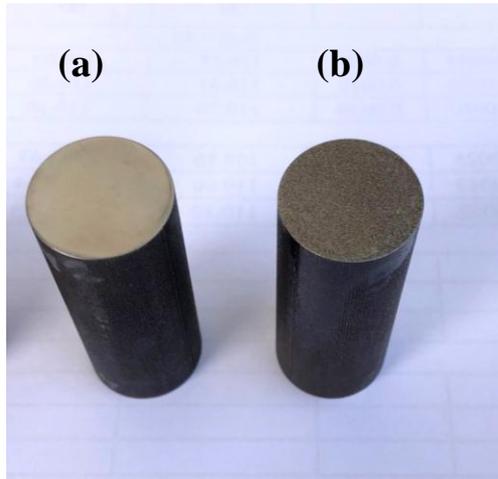
C	Cr	Ni	Mo	V	Si	Mn
0,28-0,34	0,8-1,2	1,65-2	0,3-0,5	0,08-0,15	0,17-0,37	0,25-0,55

2.2. Phương pháp

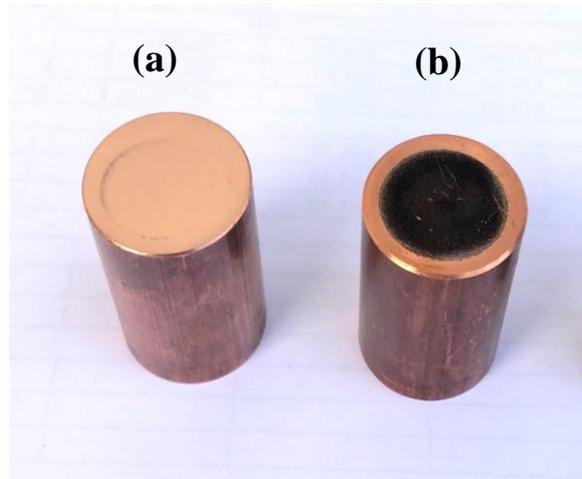
Các mẫu thí nghiệm được gia công trên máy xung CNC-460 EDM (Hình 1). Mẫu và điện cực đồng (hàm lượng 99% Cu) đều có dạng hình trụ với kích thước lần lượt là $\phi 20 \times 50$ mm đối với mẫu và $\phi 25 \times 40$ mm đối với điện cực (Hình 2, 3). Quá trình gia công tạo hình ban đầu được thực hiện bằng phương pháp cắt dây EDM, đảm bảo độ chính xác kích thước đạt 0,1 mm. Sau đó, bề mặt của mẫu và điện cực tiếp tục được xử lý bằng phương pháp mài tinh nhằm đạt độ chính xác bề mặt ở mức cao với sai số không vượt quá 0,01 mm. Sau khi hoàn thiện tạo hình, mẫu và điện cực được gá lắp chính xác trên máy xung, đảm bảo bề mặt của hai chi tiết luôn duy trì song song trong suốt quá trình gia công. Bể chứa điện môi của máy có kích thước (400 × 320 × 350) mm (dài × rộng × cao), chứa khoảng 16 lít dầu, đáp ứng yêu cầu ngập hoàn toàn phôi và điện cực trong quá trình gia công. Nồng độ bột Ni sử dụng trong thí nghiệm được lựa chọn là 10 g/L. Từ đó, lượng bột cần thiết bổ sung vào bể chứa được tính toán là 160 g. Tuy nhiên, trong quá trình gia công, do một phần bột có xu hướng lắng xuống đáy bể, dẫn đến sự thay đổi nồng độ bột trong điện môi, việc theo dõi và duy trì nồng độ bột ổn định là cần thiết. Để thực hiện điều này, nồng độ bột được đo định kỳ cả trước và trong suốt quá trình gia công. Quá trình xác định nồng độ bột được tiến hành bằng cách lấy dung dịch dầu và bột từ bể chứa vào một bình chia độ. Sau khi bột lắng hoàn toàn xuống đáy bình, phần dầu phía trên được tách ra và khối lượng bột được xác định. Từ đó nồng độ bột trong bể được tính toán một cách chính xác. Qua tính toán nhận thấy sự suy giảm nồng độ bột do hiện tượng lắng trong quá trình gia công khoảng 10%. Do đó, bột được cấp phần thiếu hụt do lắng đọng so với lượng lý thuyết để bù đắp hao hụt. Bên cạnh đó, bể chứa cũng được thiết kế thêm hệ thống cánh khuấy ở đáy bể nhằm hạn chế hiện tượng lắng bột, giúp duy trì nồng độ bột ổn định và đồng đều trong suốt quá trình gia công.



Hình 1. (a) Máy xung CNC-460 EDM; (b) Sơ đồ nguyên lý cấu tạo của máy.

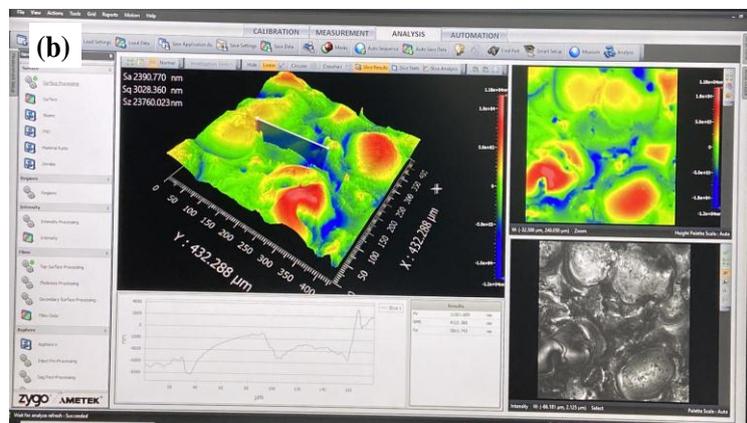


Hình 2. (a) Mẫu trước gia công;
(b) Mẫu sau gia công.



Hình 3. (a) Điện cực trước gia công;
(b) Điện cực sau gia công.

Độ nhám bề mặt trung bình (S_a) của các mẫu sau gia công được đo bằng máy đo độ nhám bề mặt không tiếp xúc ZeGage Pro (Hình 4), được cung cấp bởi Tập đoàn Zygo, Mỹ. Giá trị độ nhám đạt được trong mỗi chế độ công nghệ là giá trị độ nhám trung bình trên vùng diện tích được đo. Mỗi mẫu tiến hành đo độ nhám trên 4 vị trí tương tự để đảm bảo độ chính xác và dễ dàng so sánh với nhau. S_a là một thông số đo độ nhám bề mặt 3D, dùng để đánh giá mức độ gồ ghề trung bình của một bề mặt sau gia công, xét trên toàn bộ diện tích bề mặt, khác với độ nhám R_a là độ nhám 2D chỉ theo một đường cắt ngang bề mặt. Do đó, S_a có tính đại diện hơn cho độ nhám bề mặt.

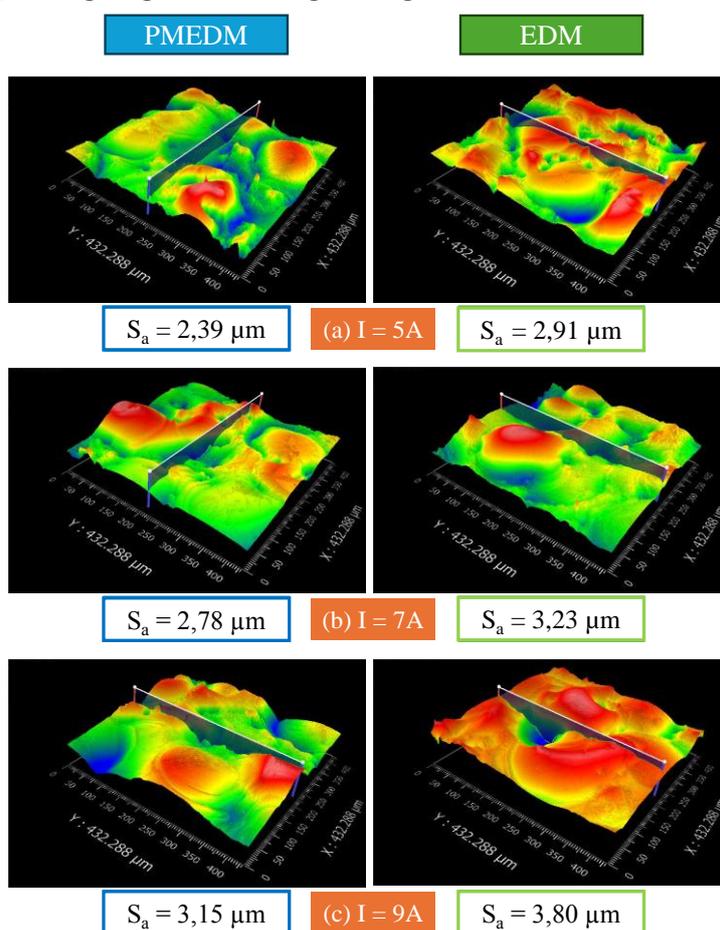


Hình 4. (a) Máy đo độ nhám ZeGage Pro; (b) Màn hình làm việc của phần mềm Mx.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của cường độ dòng điện và bột Ni đến độ nhám bề mặt

Trong phần này, các tác giả tập trung phân tích vai trò của cường độ dòng điện và bột Ni đến độ nhám bề mặt trong quá trình gia công PMEDM. Hình 5a, 5b và 5c là hình ảnh độ nhám bề mặt tương ứng với các chế độ $I = 5A, 7A$ và $9A$, được đo bằng máy đo độ nhám Zegage Pro. Các chế độ này được tham khảo từ các tài liệu khoa học đã công bố trước [4], [5], tương ứng với chế độ gia công EDM thô.



Hình 5. So sánh độ nhám bề mặt giữa hai phương pháp PMEDM và EDM.

Qua quan sát có thể thấy độ nhám có sự thay đổi rõ rệt theo chiều hướng tăng khi tăng cường độ dòng điện. Xu hướng là tương tự với quá trình gia công EDM. Hiện tượng này có thể được giải thích như sau: Khi cường độ dòng điện tăng lên, năng lượng trong mỗi lần phóng điện cũng tăng theo dẫn tới những hố phóng điện sâu hơn, kết quả là độ nhám bề mặt lớn hơn. Khi cường độ dòng quá cao sẽ dẫn tới việc hình thành các bong bóng khí với áp suất cao tại vùng gia công. Bong bóng khí này phát nổ sẽ đẩy bột ra xa khiến cho mật độ bột trong lần phóng điện tiếp theo không đảm bảo,

quá trình phóng điện mất ổn định cũng là nguyên nhân tăng độ nhám bề mặt (Bảng 2).

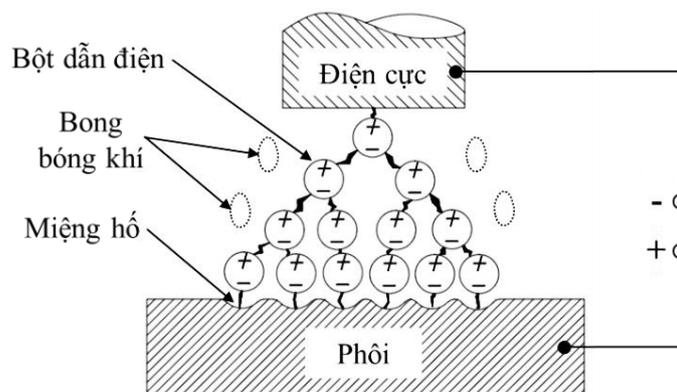
Bảng 2. Bảng so sánh độ nhám bề mặt thép 30CrNi2MoVA được gia công bằng phương pháp PMEDM và EDM

I _p (A)	Độ nhám trung bề mặt S _a (μm)		Mức độ cải thiện
	Không có bột	Có bột Ni (C _p = 10 g/L)	
5	2,91	2,39	17,87%
7	3,23	2,78	13,93%
9	3,80	3,15	20,63%

Điều này cũng đã được quan sát và báo cáo bởi các tác giả khác [5]-[7]. Có thể nhận thấy rõ việc thêm bột Ni vào dung dịch điện môi đã cải thiện đáng kể độ nhám bề mặt từ 15-20% ở mọi chế độ dòng điện khác nhau. Điều này có thể được giải thích bởi sự tham gia của các hạt dẫn điện trong quá trình phóng tia lửa. Các tác giả đề xuất cơ chế cải thiện độ nhám bề mặt khi gia công PMEDM so với gia công EDM trong cùng điều kiện như sau:

a) Khi bột dẫn điện được thêm vào, khoảng cách phóng điện giữa điện cực và phôi được tăng lên [8]. Điều này là do các hạt dẫn điện được sắp xếp thành các cầu nối dưới tác động của trường điện từ. Khoảng cách phóng điện tăng lên, dẫn đến giảm năng lượng và tốc độ loại bỏ vật liệu. Do đó, các hố trên bề mặt phôi được tạo ra có độ sâu và chiều rộng giảm, làm giảm độ nhám bề mặt.

b) Khi có sự tham gia của các hạt dẫn điện, các tia lửa điện được tạo ra đồng đều hơn. Trong quá trình EDM, tia lửa điện thường hình thành tại những khoảng cách ngắn nhất giữa điện cực và phôi. Tuy nhiên, trong quá trình PMEDM, các hạt dẫn điện hỗ trợ tạo ra kênh phóng điện. Kết quả là khả năng phóng tia lửa xảy ra tại nhiều điểm (Hình 6), làm phân tán năng lượng, do đó cải thiện đáng kể độ nhám bề mặt.



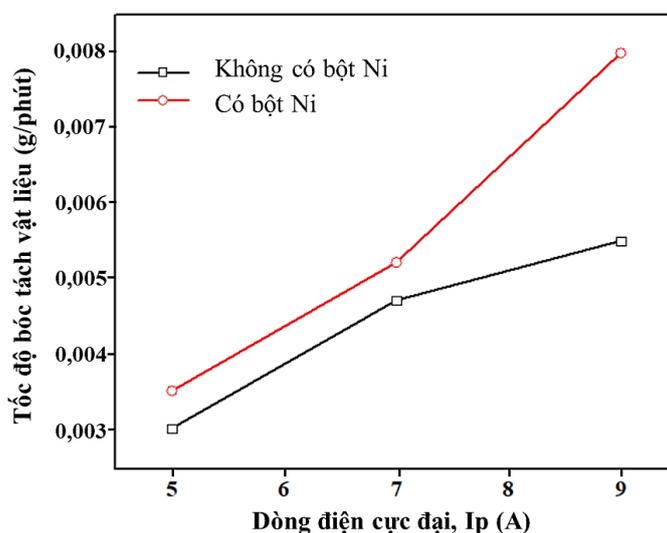
Hình 6. Đề xuất quá trình phóng điện với bột dẫn điện trong PMEDM.

3.2. Ảnh hưởng của cường độ dòng và bột đến tốc độ bóc tách vật liệu

Trong Hình 7, kết quả cho thấy MRR có xu hướng tăng khi tăng cường độ dòng điện. Trong chế độ PMEDM với $C_p = 10$ g/L, khi dòng điện tăng từ 5A đến 9A, MRR tăng từ 0,0035 g/phút lên 0,008 g/phút (128%); tương tự MRR tăng từ 0,003 g/phút lên 0,0055 g/phút (83%) đối với chế độ EDM. Nguyên nhân của hiện tượng này có thể lý giải là do khi cường độ dòng điện tăng lên sẽ kéo theo năng lượng phóng điện tăng lên dẫn tới tốc độ bóc tách vật liệu tăng theo. Từ Hình 7 cũng có thể nhận thấy tốc độ loại bỏ vật liệu của quá trình PMEDM đã được cải thiện so với quá trình EDM. Nguyên nhân của việc cải thiện MRR là do sự tham gia của các hạt dẫn điện trong quá trình EDM. Điều này được giải thích như sau:

- Khi bột dẫn điện có mặt trong quá trình phóng tia lửa, nó hình thành các kênh phóng điện tại nhiều vị trí giữa điện cực và phôi như đã trình bày ở Mục 3.1. Điều này làm cho quá trình phóng tia lửa ổn định hơn so với trường hợp không có bột dẫn điện.

- Bột được treo trong môi trường dung môi, làm giảm khả năng cách điện của môi trường điện môi [5]. Điều này cải thiện độ dẫn điện của dung môi và giảm độ nhớt của nó, giúp tia lửa phóng điện đều hơn.

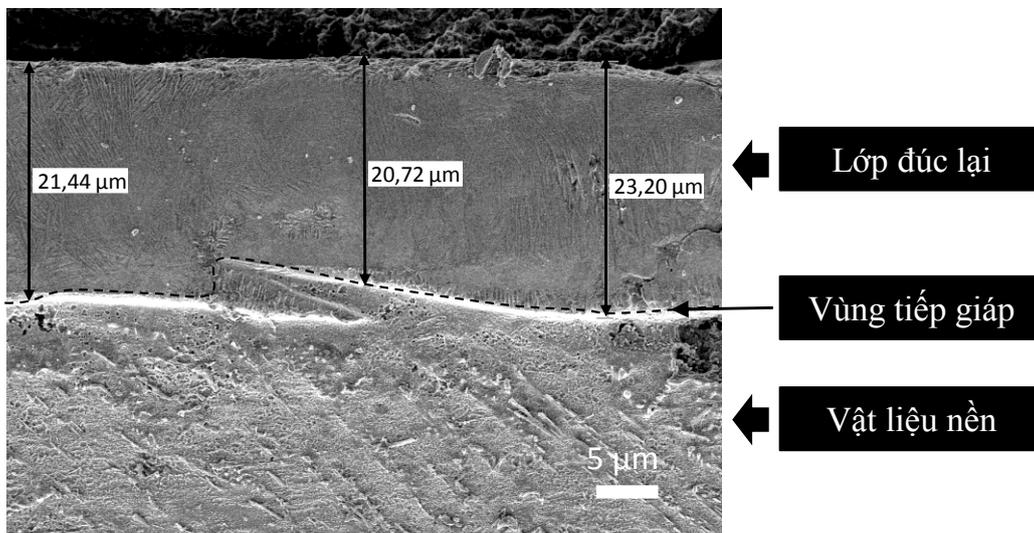


Hình 7. Tốc độ bóc tách vật liệu của hai phương pháp PMEDM và EDM ở $T_{on} = 100 \mu s$.

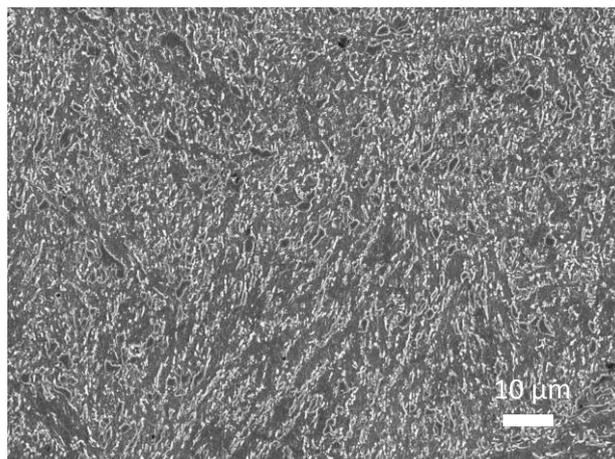
3.3. Tổ chức bề mặt sau gia công PMEDM

Hình 8 thể hiện sự hình thành của một lớp đúc lại được tạo thành sau quá trình gia công PMEDM. Trong khi đó, ở độ phóng đại cao hơn, Hình 9 và 10 tương ứng cho thấy

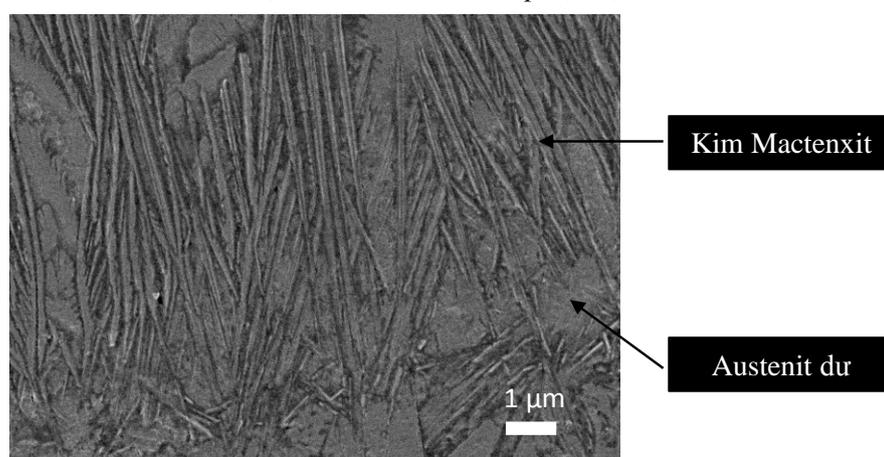
tổ chức tế vi của lớp nền và lớp đúc lại tại $I_p = 7 \text{ A}$, $T_{on} = 100 \text{ ms}$, $C_p = 10 \text{ g/L}$ có sự khác biệt đáng kể. Tổ chức tế vi của lớp nền tương đối đồng nhất, chỉ có sự xuất hiện của nền ferit xen kẽ peclit cùng một lượng nhỏ tạp chất và khuyết tật trong quá trình gia công trước đó. Tuy nhiên, tổ chức tế vi của lớp đúc lại dễ dàng nhận thấy cấu trúc đặc trưng của mactenxit, hình ảnh hiển thị rất nhiều kim mactenxit có chiều dài từ $3\text{-}10 \mu\text{m}$ và austenit dư chưa chuyển biến. Nguyên nhân hình thành tổ chức của lớp đúc lại như vậy là do quá trình nung nóng và làm nguội nhanh khi gia công xung trong môi trường dầu. Tổ chức mactenxit được hình thành khi nung thép lên nhiệt độ vùng austenit và làm nguội đủ nhanh, khiến austenit không kịp tiết ra các pha cân bằng ferit và xementit mà tạo ra pha giả ổn định mactenxit [9]. Cần lưu ý rằng, thép sử dụng trong nghiên cứu này là thép hợp kim có hàm lượng C trung bình ($\sim 5\%$ tổng lượng nguyên tố hợp kim). Do đó, điều kiện làm nguội trong dầu tạo ra tốc độ nguội đủ nhanh để chuyển biến mactenxit xảy ra trong lớp bề mặt thép. Lớp đúc lại với tổ chức mactenxit này có vai trò rất quan trọng trong việc nâng cao độ cứng và khả năng chống mài mòn cho bề mặt, cải thiện khả năng làm việc của chi tiết. Ngoài ra, do quá trình chuyển biến pha (austenit \rightarrow mactenxit) kèm theo giãn nở thể tích ($\sim 1\text{-}4\%$) khiến cho lớp đúc lại xuất hiện ứng suất nén bề mặt [7]. Lớp này tương tự như lớp ứng suất nén hình thành do biến dạng dẻo bề mặt trong quá trình lăn ép và đây là một trong những yếu tố quan trọng giúp cải thiện độ bền mỏi và khả năng chống mài mòn của vật liệu.



Hình 8. Ảnh SEM lớp đúc lại và lớp nền.



Hình 9. Ảnh SEM thể hiện tổ chức tế vi của lớp vật liệu nền.



Hình 10. Ảnh SEM thể hiện tổ chức tế vi của lớp đúc lại.

4. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của cường độ dòng điện và bột Ni đến độ nhám bề mặt và tốc độ bóc tách vật liệu trong quá trình gia công EDM và PMEDM. Bên cạnh đó, tổ chức tế vi của bề mặt sau gia công xung cũng được phân tích và đánh giá. Kết quả chính của nghiên cứu này có thể tổng hợp lại như sau:

- Cơ chế tham gia của các hạt bột trong quá trình phóng tia lửa điện và vai trò của chúng đối với tính chất bề mặt sau gia công đã được phân tích và làm sáng tỏ.
- Cường độ dòng điện có ảnh hưởng lớn tới độ nhám bề mặt và MRR. Cường độ dòng điện nhỏ dẫn tới MRR và độ nhám bề mặt thấp, ngược lại cường độ dòng điện lớn làm cho MRR tăng và độ nhám bề mặt cũng tăng theo.
- Việc thêm bột Ni vào dung dịch điện môi giúp cải thiện MRR và độ nhám bề mặt.
- Tổ chức lớp bề mặt sau gia công chủ yếu là mactenxit và austenit dư.

Bên cạnh những kết quả đạt được, nghiên cứu còn một số hạn chế như tốc độ bóc tách vật liệu của phương pháp còn thấp, độ nhám bề mặt sau gia công khá cao. Định hướng tiếp theo, các tác giả sẽ nghiên cứu ảnh hưởng của bột Ni trong phương pháp PMEDM đối với các tính chất bề mặt như độ cứng, chiều dày lớp đúc lại và thành phần lớp bề mặt chi tiết sau gia công.

Ngoài ra, kết quả nghiên cứu có tiềm năng ứng dụng trong các lĩnh vực gia công khuôn mẫu chính xác, chế tạo chi tiết trong ngành hàng không vũ trụ, lĩnh vực y sinh và các sản phẩm yêu cầu độ chính xác cao về hình học và chất lượng bề mặt. Nhóm tác giả khuyến nghị các hướng công nghệ như tối ưu tham số dòng điện, lựa chọn kích thước và loại hạt bột phù hợp, cải tiến hệ thống tuần hoàn điện môi, cũng như kết hợp PMEDM với các công nghệ xử lý bề mặt khác. Những định hướng này hứa hẹn góp phần cải thiện hiệu quả và mở rộng phạm vi ứng dụng thực tiễn của công nghệ PMEDM.

Lời cảm ơn

Các tác giả chân thành cảm ơn Trung tâm Công nghệ, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn đã cung cấp thiết bị cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] K. Furutani *et al.*, "Accretion of titanium carbide by electrical discharge machining with powder suspended in working fluid", *Precision Engineering*, Vol. 25, Iss. 2, pp. 138-144, 2001. DOI: 10.1016/S0141-6359(00)00068-4
- [2] X. Wang *et al.*, "Alternating energy electrical discharge machining of titanium alloy using a WC-PCD electrode", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 60, pp. 37-47, 2020. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.034
- [3] G. Talla *et al.*, "State of the art in powder-mixed electric discharge machining: A review", in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231, Iss. 14, pp. 2511-2562, 2017. DOI: 10.1177/0954405416634265
- [4] H. Marashi *et al.*, "Employing Ti nano-powder dielectric to enhance surface characteristics in electrical discharge machining of AISI D2 steel", *Applied Surface Science*, Vol. 357, pp. 892-907, 2015. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.09.105
- [5] M. Kolli and A. Kumar, "Surfactant and graphite powder-assisted electrical discharge machining of titanium alloy", in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231, Iss. 4, pp. 641-657, 2017. DOI: 10.1177/0954405415579019
- [6] W. S. Zhao *et al.*, "The application of research on powder mixed EDM in rough machining", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, Iss. 1-3, pp. 30-33, 2002. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00570-8

- [7] Y. S. Wong *et al.*, "Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 79, Iss. 1-3, pp. 30-40, 1998. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00450-0
- [8] Y. F. Tzeng and C. Y. Lee, "Effects of powder characteristics on electrodischarge machining efficiency", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, pp. 586-592, 2001. DOI: 10.1007/s001700170142
- [9] L. C. Dưỡng, *Vật liệu học*. Nxb Khoa học và Kỹ thuật, 1997, tr. 103.

EXPLORING THE MUTUAL INFLUENCE BETWEEN THE DISCHARGE CURRENT AND NICKEL POWDER ON THE SURFACE PROPERTIES OF 30CrNi2MoVA STEEL MANUFACTURED BY POWDER MIXED ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Abstract: *To date, a lot of studies have been conducted to investigate the surface layer characteristics resulting from Electrical Discharge Machining (EDM). However, research utilizing nickel powder in Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM) and examining its effects on surface properties remains relatively limited. In this study, the influence of key process parameters, including discharge current (I_p) and Ni powder, on the material removal rate (MRR) and surface properties such as average surface roughness (S_a) and the microstructure of the surface layer of 30CrNi2MoVA steel machined by PMEDM with nickel powder was investigated. The results indicate that discharge current (I_p) has the most significant impact on both the material removal rate and surface roughness. Specifically, when increasing I_p from 5A to 9A, MRR increased by 128% and 83%, respectively for PMEDM and EDM modes, S_a increased by 31.8% and 30.5%, respectively for PMEDM and EDM modes. Besides, the presence of Ni powder improved the surface roughness and MRR.*

Keywords: EDM; PMEDM; MRR; microstructure; surface roughness.

Nhận bài: 16/06/2025; Hoàn thiện: 17/09/2025; Chấp nhận đăng: 15/10/2025

