

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP TAGUCHI VÀ QUAN HỆ MỜ XÁM (FGRA) PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ CẮT TỚI MÒN DAO KHI PHAY CAO TỐC THÉP CỨNG

APPLYING TAGUCHI METHOD AND FUZZY GREY RELATIONSHIP ANALYSIS (FGRA) TO ANALYZE THE INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS ON TOOL WEAR WHEN HIGH-SPEED MILLING OF HARDENED STEEL

Lê Thế Hưng¹, Phạm Văn Bồng²,
Chu Khắc Trung², Hoàng Tiến Dũng^{2,*}

TÓM TẮT

Phân tích ảnh hưởng chế độ cắt tới mòn dụng cụ cắt khi phay cao tốc là một phương pháp hiệu quả nhằm nâng cao tuổi bền dụng cụ cắt qua đó giảm giá thành gia công. Để nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ cắt tới mòn dao khi phay cao tốc, mô hình thực nghiệm theo Taguchi L9 được thiết lập kết hợp với thuật toán phân tích mối quan hệ mờ xám được trình bày trong bài viết này. Kết quả phân tích ANOVA cho thấy quá trình phay khô so với phay ướt có sự khác biệt đáng kể, khi phay ướt phương án cho lượng mòn mặt sau nhỏ nhất tương ứng với chiều sâu cắt $t = 0,1\text{mm}$, bước tiến dao $S = 955$ (mm/phút), vận tốc cắt $V = 300$ (m/phút), trong khi phay khô tương ứng với các thông số công nghệ chiều sâu cắt $t = 0,3\text{mm}$, bước tiến dao $S = 955$ (mm/phút), vận tốc cắt $V = 300$ (m/phút). Kết quả phân tích mờ xám cho thấy khi phay cao tốc vật liệu có độ cứng cao cả trong quá trình phay ướt và phay khô chiều sâu cắt có ảnh hưởng nhiều nhất tới mòn dụng cụ cắt, tiếp theo là vận tốc cắt và cuối cùng lượng tiến dao có ảnh hưởng nhỏ nhất tới mòn dụng cụ.

Từ khóa: Phân tích mối quan hệ mờ xám; ANOVA; Taguchi L9; mòn dao; phay cao tốc.

ABSTRACT

Analysis of the influence of cutting parameters on tool wear during high-speed milling is a highly effective method to improve tool life and thereby reduce machining costs. To study the influence of cutting parameters on tool wear during high-speed milling, experimental models according to Taguchi L9 were established in combination with the fuzzy grey relationship analysis (FGRA) algorithm presented in this study. The results of ANOVA analysis show that there is a significant difference between the dry compared to the wet milling process, when milling with a cooling fluid, the option for the smallest flank wear corresponding to depth of cut $t = 0.1\text{mm}$, feed rate $S = 955$ (mm/min), cutting speed $V = 300$ (m/min), while dry milling corresponds with parameters depth of cut $t = 0.3\text{mm}$, feed rate $S = 955$ (mm/min), cutting speed $V = 300$ (m/min). The results of the FGRA analysis show that when high-speed milling of hardened steel in wet milling and dry milling processes both show the depth of cut has the most influence on tool wear, followed by cutting speed and lastly the feed rate has the smallest effect on tool wear.

Keywords: Fuzzy grey relationship analysis; ANOVA; Taguchi L9; Tool wear; High-speed milling.

¹Trường Cao đẳng nghề Công nghệ Cao Hà Nội

²Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: tiendung@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/5/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/6/2022

Ngày chấp nhận đăng: 27/6/2022

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay với sự cạnh tranh khốc liệt trong ngành sản xuất toàn cầu, việc nâng cao hơn nữa hiệu quả sản xuất, chất lượng sản phẩm và giảm chi phí sản xuất trở nên cấp bách. Trong đó công nghệ gia công cao tốc có một vai trò cực kỳ quan trọng trong hầu hết các ngành công nghiệp sản xuất và được các nhà nghiên cứu quan tâm như một vấn đề kỹ thuật tiên tiến. Đây là một phương pháp hiệu quả để tăng năng suất do tốc độ loại bỏ vật liệu cao trong khi không cần số lượng và kích thước máy móc lớn [1-3]. Trong quá trình sản xuất bởi các trung tâm gia công CNC tốc độ cao thì chi phí cho dụng cụ cắt là một trong những chi phí sản xuất chính. Trong đó mòn dụng cụ là một vấn đề không thể tránh khỏi và phổ biến, ảnh hưởng trực tiếp đến chi phí sản xuất, chất lượng sản phẩm và độ chính xác gia công. Do đó phân tích ảnh hưởng của một số yếu tố công nghệ tới mòn dụng cụ cắt trở nên rất cần thiết.

Taguchi là một phương pháp tối ưu hóa thực nghiệm được đưa ra bởi Taguchi [4, 5]. Hiện nay phương pháp được sử dụng rộng rãi trong thiết kế công nghiệp. Theo phương pháp Taguchi một loạt các thí nghiệm được thực hiện theo các bảng trực giao được Taguchi đưa ra dựa trên nguyên tắc là cặp trạng thái của các yếu tố điều khiển trong hai cột bất kỳ có xác suất xuất hiện như nhau. Với một bộ tham số chế độ cắt khi gia công vật liệu, đo đạc một số yếu tố đầu ra quan tâm là lượng mòn dụng cụ trong đó mỗi yếu tố quan tâm được đo đạc nhắc lại nhiều lần để đảm bảo sự phản ánh chính xác mức ảnh

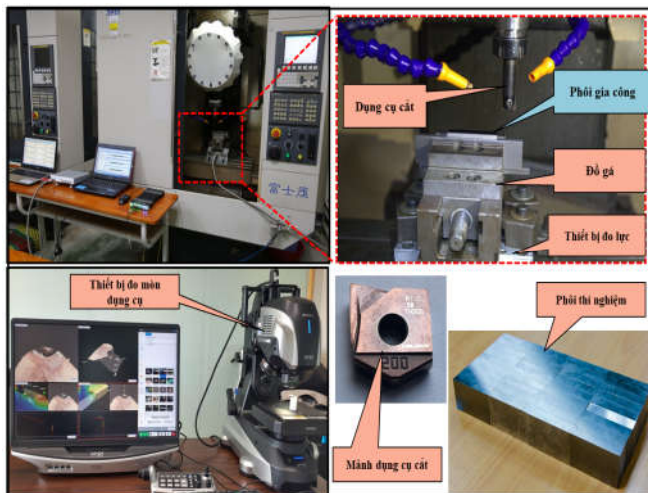
hưởng của các yếu tố công nghệ đến đầu ra quan tâm. Một số tác giả đã sử dụng phân tích Taguchi [6, 7] xác định mức độ ảnh hưởng của các yếu tố chế độ cắt đến hàm mục tiêu nhưng các hàm mục tiêu và hàm biên lại được xây dựng bằng các phương pháp truyền thống.

Xuất phát từ những phân tích trên, bài báo đưa ra nhằm tìm ra những nhân tố tác động chính tới mòn dụng cụ trong kỹ thuật phay cao tốc. Dựa trên thuật toán phân tích mờ xám kết hợp với phân tích Taguchi ứng dụng trong phân tích mòn dụng cụ khi phay cao tốc thép cứng. Bài báo được thiết lập gồm Phần 2: Thiết lập thực nghiệm cho phay tốc độ cao vật liệu có độ cứng cao; Phần 3: Kết quả phân tích ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến mòn dụng cụ khi phay cao tốc vật liệu có độ cứng cao; Phần 4: Các kết luận chính trong nghiên cứu được đưa ra.

2. THIẾT LẬP THỰC NGHIỆM CHO PHAY TỐC ĐỘ CAO VẬT LIỆU CÓ ĐỘ CỨNG CAO

Quá trình phay cao tốc được thực hiện trên trung tâm gia công tốc độ cao HS Super MC500, tốc độ quay trục chính: $100 \div 30000$ (v/p), tốc độ dịch chuyển của bàn máy cắt gọt: $1 \div 30000$ (mm/p), tốc độ chạy không lớn nhất: 48000(mm/p). Hành trình dịch chuyển của bàn máy: XxYxZ = 500x400x300(mm). Quá trình phay cao tốc được thực hiện trên trung tâm gia công tốc độ cao HS Super MC500 để phay mặt như hình 1.

Các thực nghiệm được tiến hành với vật liệu gia công thép SKD 61 sau nhiệt luyện đạt độ cứng 53HRC kích thước mẫu thí nghiệm LxWxH = 70x40x15 (mm); Dụng cụ cắt gồm 2 răng cắt: TH308 ZCFG200SW-R1.0 - Hitachi, đường kính Ø 20mm. Lượng mòn dụng cụ cắt được thực hiện trên thiết bị đo quang học Kenyence-VHX-7000.



Hình 1. Hình ảnh thiết bị thí nghiệm khi phay cao tốc vật liệu có độ cứng cao

Thiết kế thực nghiệm Taguchi là một phương pháp được sử dụng phổ biến trong điều tra các thông số đầu ra của quá trình công nghệ thu được từ các thông số đầu vào theo nhiều yếu tố và mức. Phương pháp này được áp dụng thành công cho nhiều lĩnh vực khác nhau nhằm mục đích tiết kiệm thời gian, tiền bạc và thu được các thông số tối ưu [8, 9]. Chia khóa của cách tiếp cận này là tạo ra một bảng

thiết kế trực giao trên cơ sở các yếu tố và mức tác động được điều tra. Các yếu tố được xem xét trong quá trình đánh bóng bao gồm tốc độ cắt, chiều sâu cắt, lượng chạy dao răng, tốc độ trục chính, lượng chạy dao như được mô tả trên

Bảng 1. Các thông số thực nghiệm khi phay cao tốc vật liệu có độ cứng cao

Cấp độ	Tốc độ cắt V (m/phút)	Chiều sâu cắt t (mm)	Lượng chạy dao S (mm/phút)
1	300	0,1	478
2	450	0,3	955
3	600	0,5	1433

Phương pháp Taguchi đã chọn giải pháp tối ưu dựa trên phân tích phương sai (ANOVA) và tỷ số tín tạp (tỷ số S/N). Mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến các thông số đầu ra được đánh giá thông qua tỷ số S/N. Chỉ số này được xác định bởi công thức:

$$(S/N)_i = 10 \log \left[\frac{y_i^{-2}}{s_i^2} \right] \quad (1)$$

Trong đó:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N y_{i,u} \text{ là tín hiệu, } s_i^2 = \frac{1}{1-N} \sum_{u=1}^N (y_{i,u} - \bar{y}_i)^2 \text{ là nhiễu, } i \text{ là số}$$

thứ tự thí nghiệm, u là số thứ tự và Ni là số phép đo. Giá trị của tỷ số S/N lớn (tín hiệu lớn, nhiễu nhỏ) khi tham số đầu ra này gần với giá trị tối ưu. Trong bài toán tối thiểu (càng nhỏ càng tốt), công thức (1) được biểu diễn như sau:

$$(S/N)_i = -10 \log \left[\frac{\sum_{u=1}^N y_i^2}{N_i} \right] \quad (2)$$

Trong nghiên cứu này, thiết kế thí nghiệm được thiết lập theo phương pháp Taguchi L9 (3³), như được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. Thiết kế thực nghiệm theo phương pháp Taguchi L9 (3³)

Số thứ tự	Sự kết hợp yếu tố và mức độ		
	Chiều sâu cắt (t)	Tốc độ cắt (V)	Lượng chạy dao (S)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	2	2
5	2	3	3
6	2	1	1
7	3	3	3
8	3	1	1
9	3	2	2

Trong bài toán tối thiểu (càng lớn càng tốt), công thức (4) được viết như sau:

$$(S/N)_i = -10 \log \left[\frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^N \frac{1}{y_u^2} \right] \quad (3)$$

3. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN MÒN DỤNG CỤ KHI PHAY CAO TỐC VẬT LIỆU CÓ ĐỘ CỨNG CAO

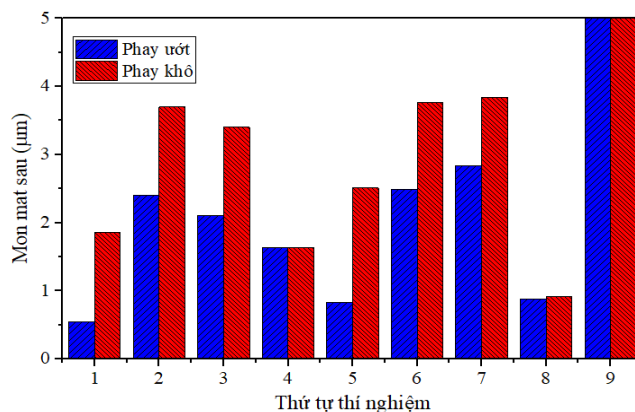
Kết quả thực nghiệm Taguchi L9 (33) như thể hiện trên bảng 3 cho thấy lượng mòn mặt trước và mặt sau khi phay cao tốc vật liệu có độ cứng cao. Hình 2 và 3 trình bày kết quả so sánh các trường hợp mòn dụng cụ theo các điều kiện gia công khác nhau tương ứng với phương pháp phay ướt và phay khô. Kết quả cho thấy khi phay ướt và phay khô cho ra các thông số mòn tương ứng với các điều kiện chế độ cắt khác nhau là khác nhau. Khi so sánh giữa phay khô và phay ướt nhận thấy trong cùng một điều kiện gia công với các thông số công nghệ khác nhau đều cho thấy lượng mòn mặt trước và mặt sau khi phay khô lớn hơn lượng mòn mặt trước và mặt sau khi phay ướt.

Bảng 3. Kết quả đo mòn theo các điều kiện công nghệ khác nhau khi phay ướt và phay khô

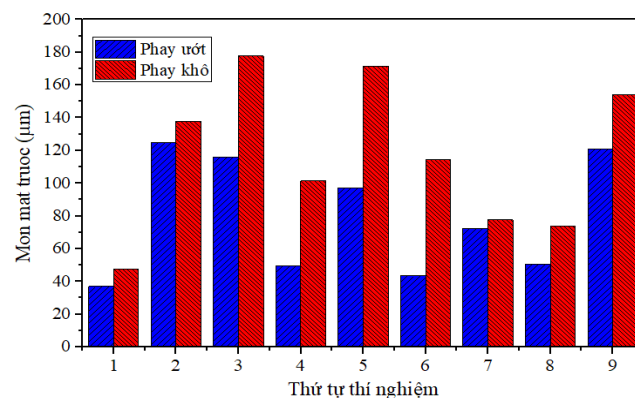
Số thứ tự	Biến mã hóa			Mòn khi phay ướt (Sau 10 hành trình cắt)		Mòn khi phay khô (Sau 10 hành trình cắt)	
	t	S	V	Mặt sau (µm)	Mặt trước (µm)	Mặt sau (µm)	Mặt trước (µm)
1	1	1	1	0,55	36,94	1,86	47,41
2	1	2	2	2,4	124,7	3,7	137,72
3	1	3	3	2,11	116,06	3,4	177,64
4	2	1	2	1,64	49,45	1,64	101,32
5	2	2	3	0,83	97,3	2,51	171,44
6	2	3	1	2,49	43,3	3,76	114,36
7	3	1	3	2,84	72,53	3,84	77,58
8	3	2	1	0,88	50,75	0,91	73,61
9	3	3	2	51,16	120,82	101,31	154,07

Kết quả phân tích ANOVA về mòn mặt sau từ kết quả thực nghiệm phay ướt được thể hiện trên hình 4. Từ kết quả cho thấy chiều sâu cắt cung cấp tỷ số S/N lớn nhất (-2,97) tương ứng với mức 1, tiếp theo là bước tiến dao với Tỷ số S/N lớn nhất (-1,63) tương ứng với mức 2, cuối cùng vận tốc cắt cung cấp tỷ số S/N lớn nhất (-0,54) tương ứng với mức 1. Phân tích ANOVA được sử dụng cho phay ướt tốc độ cao khi gia công vật liệu có độ cứng cao nhằm tìm ra phương án cho lượng mòn mặt sau nhỏ nhất tương ứng với trường hợp 121 (chiều sâu cắt t = 0,1mm, bước tiến dao S = 955 (mm/phút), vận tốc cắt V = 300 (m/phút)).

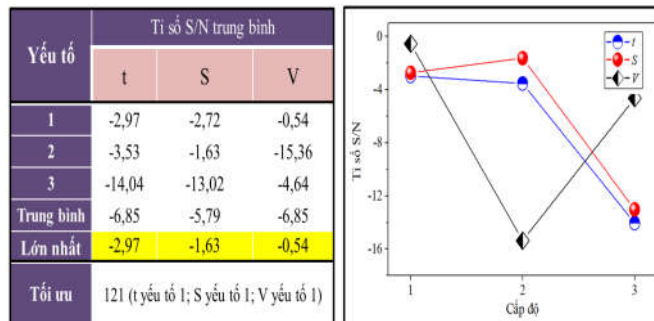
Kết quả phân tích ANOVA mòn mặt sau khi phay khô như mô tả trên hình 5. Từ kết quả cho thấy chiều sâu cắt cung cấp tỷ số S/N lớn nhất (-7,93) tương ứng với mức 2, tiếp theo là bước tiến dao với Tỷ số S/N lớn nhất (-6,16) tương ứng với mức 2, cuối cùng vận tốc cắt cung cấp tỷ số S/N lớn nhất (-5,36) tương ứng với mức 1. Có sự khác biệt đáng kể trong kết quả phân tích ANOVA so với quá trình phay ướt, phương án cho lượng mòn nhỏ nhất khi phay khô tương ứng với trường hợp 221 với các thông số (chiều sâu cắt t = 0,3mm, bước tiến dao S = 955 (mm/phút), vận tốc cắt V = 300 (m/phút)).



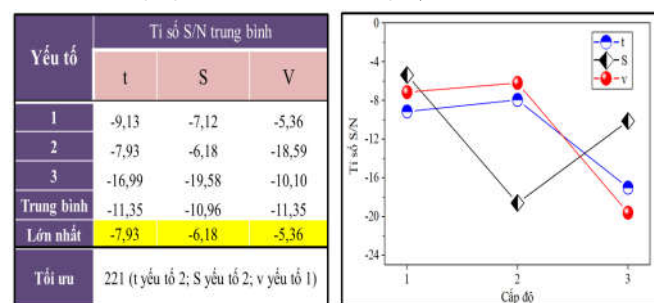
Hình 2. Biểu đồ so sánh mòn mặt sau khi phay ướt và phay khô



Hình 3. Biểu đồ so sánh mòn mặt trước khi phay ướt và phay khô



Hình 4. Kết quả phân tích ANOVA mòn khi phay ướt



Hình 5. Kết quả phân tích ANOVA mòn khi phay khô

Phân tích quan hệ xám (GRA) là một phương pháp thống kê hiệu quả để đo mức độ gần đúng giữa các đối tượng bằng cách sử dụng cấp quan hệ xám. Nó được phát triển bởi Deng và các cộng sự và đã được ứng dụng thành công trong nhiều lĩnh vực khác nhau [10-12]. Mức độ thông

tin trong phân tích mối quan hệ xám giúp quá trình ra quyết định được dễ dàng hơn trong các tình huống khó khăn [13-25]. Phương pháp này đã được cải tiến và phát triển thành phân tích mối quan hệ mờ xám (FGRA). Đây là một phương pháp tiếp cận dựa trên một hệ thống mờ được phát triển dựa trên các hệ số và mức quan hệ xám. Mô hình này xem xét tất cả các tiêu chí khác nhau, bao gồm cả sự không chắc chắn về trọng số và tầm quan trọng của các tiêu chí. Trong công việc này, phân tích mối quan hệ mờ xám được sử dụng để đánh giá tác động của các yếu tố khác nhau lên chất lượng bề mặt gia công, rung động, mòn và tuổi bền dụng cụ cắt. FGRA được áp dụng để xác định các yếu tố tác động chính tới mòn dụng cụ cắt được thể hiện qua các bước sau:

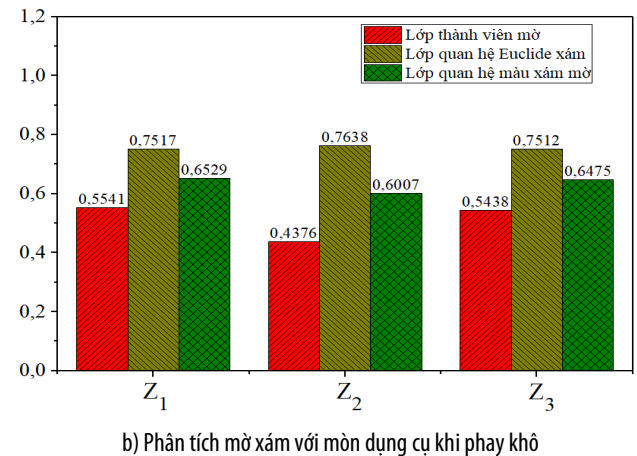
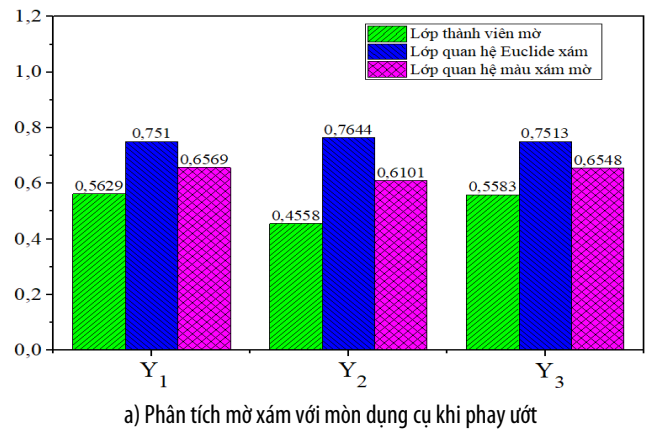
Bước thứ nhất: Mòn dụng cụ cắt trong các điều kiện gia công khác nhau có ma trận tham chiếu là $Y(x)$ và $Z(y)$ lần lượt tương ứng với quá trình phay ướt và phay khô. Chiều sâu cắt, bước tiến dao và vận tốc cắt được lấy dưới dạng phần tử lần lượt là $Y_1(x), Y_2(x), Y_3(x)$ và $Z_1(x), Z_2(x), Z_3(x)$ trong ma trận so sánh với phay ướt và phay khô. Ma trận tham chiếu và so sánh được mô tả như sau:

$$\begin{bmatrix} Y_1(x) \\ Y_2(x) \\ Y_3(x) \\ Y(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 1 & 3 & 1 & 2 \\ 0,55 & 2,4 & 2,11 & 1,64 & 0,83 & 2,49 & 2,84 & 0,88 & 51,16 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} Z_1(x) \\ Z_2(x) \\ Z_3(x) \\ Z(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 1 & 3 & 1 & 2 \\ 1,86 & 3,7 & 3,4 & 1,64 & 2,51 & 3,76 & 3,84 & 0,91 & 101,31 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Bước thứ hai: Giá trị Cosine của hàm liên thuộc mờ như trên Hình 6 minh họa các lớp thành viên mờ của bốn yếu tố đối với biên độ rung động khi phay ướt và phay khô. Các lớp thành viên mờ của các yếu tố ảnh hưởng bởi chiều sâu cắt và bước tiến dao đến quá trình phay khô có sự khác biệt đáng kể so với quá trình phân tích rung động và lực cắt. Kết quả phân tích cho thấy khi phay ướt, sự thay đổi vận tốc cắt được giữ ở mức cao nhất (0,5629), tiếp theo là vận tốc cắt (0,5583) và cuối cùng là bước tiến dao (0,4558). Kết quả phân tích khi phay khô cho thấy có sự khác biệt không đáng kể so với phay ướt, sự thay đổi chiều sâu cắt giữ ở mức cao nhất (0,5541), tiếp theo là vận tốc cắt (0,5438), cuối cùng là bước tiến dao (0,4376). Như vậy, khi khảo sát với phay ướt và phay khô ảnh hưởng của chiều sâu cắt đến mòn dụng cụ cắt là nhiều nhất, ảnh hưởng của bước tiến dao là nhỏ nhất.

Bước thứ ba: Các mức quan hệ Euclide màu xám được mô tả trong hình 6. Trong phân tích này khi khảo sát quá trình phay ướt cho tỷ số tương đương màu xám Euclide của các yếu tố khác nhau không nhiều. Nhưng vẫn nhận thấy chiều sâu cắt có ảnh hưởng nhiều nhất tới mòn dụng cụ cắt. Khi khảo sát quá trình phay khô, tỷ số tương đương màu xám Euclide có tương đồng với quá trình phay ướt. Kết quả phân tích cho thấy ảnh hưởng của chiều sâu cắt là nhiều nhất tới mòn dụng cụ cắt.



Hình 6. Kết quả phân tích mối quan hệ màu xám mờ

Cuối cùng: Điểm quan hệ xám mờ của các yếu tố phay cao tốc được đưa ra như trong hình 6. Phân tích cung cấp một cách toàn diện để đánh giá tác động của các yếu tố khảo sát đến biên độ dao động khi phay ướt và phay khô. Do đó, các điểm liên quan đến màu xám mờ đối với biên độ dao động khi phay ướt và phay khô của ba yếu tố (chiều sâu cắt t , bước tiến dao S , vận tốc cắt v) tương ứng là 0,6569; 0,6101; 0,6548 và 0,6529, 0,6007; 0,6475. Như vậy, với quá trình phay cao tốc vật liệu có độ cứng cao khi phay ướt và phay khô chiều sâu cắt có ảnh hưởng nhiều nhất tới mòn dụng cụ cắt, tiếp theo là vận tốc cắt và cuối cùng lượng tiến dao có ảnh hưởng nhỏ nhất tới mòn dụng cụ.

4. KẾT LUẬN

Từ các kết quả phân tích phương sai (ANOVA) và phân tích mối quan hệ mờ xám (FGRA), các kết luận đã được rút ra về ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến mòn dụng cụ khi phay cao tốc vật liệu có độ cứng cao như sau:

Kết quả phân tích ANOVA về mòn mặt sau từ kết quả thực nghiệm phay ướt cho thấy chiều sâu cắt cung cấp tỷ số S/N lớn nhất (-2,97) tương ứng với mức 1, tiếp theo là bước tiến dao với tỷ số S/N lớn nhất (-1,63) tương ứng với mức 2, cuối cùng vận tốc cắt cung cấp tỷ số S/N lớn nhất (-0,54) tương ứng với mức 1. Trong khi đó kết quả phân tích ANOVA mòn mặt sau khi phay khô cho thấy chiều sâu cắt cung cấp tỷ số S/N lớn nhất (-7,93) tương ứng với mức 2, tiếp theo là bước tiến dao với Tỷ số S/N lớn nhất (-6,16)

tương ứng với mức 2, cuối cùng vận tốc cắt cung cấp tỷ số S/N lớn nhất (-5,36) tương ứng với mức 1. Có thể thấy có sự khác biệt trong kết quả phân tích ANOVA giữa quá trình phay ướt và phay khô, phương án cho lượng mòn nhỏ nhất khi phay ướt tương ứng với chiều sâu cắt $t = 0,1\text{mm}$, bước tiến dao $S = 955\text{ (mm/phút)}$, vận tốc cắt $V = 300\text{ (m/phút)}$ với phay khô thông số công nghệ chiều sâu cắt $t = 0,3\text{mm}$, bước tiến dao $S = 955\text{ (mm/phút)}$, vận tốc cắt $V = 300\text{ (m/phút)}$.

Điểm quan hệ xám mờ của các yếu tố phay cao tốc cung cấp một cách toàn diện để đánh giá tác động của các yếu tố khảo sát đến biên độ dao động khi phay ướt và phay khô. Các điểm liên quan đến màu xám mờ đối với biên độ dao động khi phay ướt và phay khô của ba yếu tố (chiều sâu cắt t , bước tiến dao S , vận tốc cắt v) tương ứng là 0,6569; 0,6101; 0,6548 và 0,6529, 0,6007; 0,6475. Như vậy, với quá trình phay cao tốc vật liệu có độ cứng cao khi phay ướt và phay khô chiều sâu cắt có ảnh hưởng nhiều nhất tới mòn dụng cụ cắt, tiếp theo là vận tốc cắt và cuối cùng lượng tiến dao có ảnh hưởng nhỏ nhất tới mòn dụng cụ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. D. H. Tien, Q. T. Duc, T. N. Van, N.T. Nguyen, T. Do Duc, T. N. Duy, 2021. *Online monitoring and multi-objective optimisation of technological parameters in high-speed milling process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 112, pp. 2461-2483.
- [2]. T.H. Le, V.-B. Pham, D. Tien, 2022. *Surface Finish Comparison of Dry and Coolant Fluid High-Speed Milling of JIS SDK61 Mould Steel*. Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 12.
- [3]. L. Wang, H. Liu, C. Huang, J. Niu, X. Liu, P. Yao, 2021. *Three-dimensional transient cutting tool temperature field model based on periodic heat transfer for high-speed milling of compacted graphite iron*. Journal of Cleaner Production, vol. 322, p. 129106.
- [4]. D. Nguyen, S. Yin, Q. Tang, P. X. Son, L. A. Duc, 2019. *Online monitoring of surface roughness and grinding wheel wear when grinding Ti-6Al-4V titanium alloy using ANFIS-GPR hybrid algorithm and Taguchi analysis*. Precision Engineering, vol. 55, pp. 275-292.
- [5]. H. Thakare, A. Parekh, A. Upletawala, B. Behede, 2022. *Application of mixed level design of Taguchi method to counter flow vortex tube*. Materials Today: Proceedings.
- [6]. J. Lunagariya, K. Chabhadiya, P. Pathak, D. Mashru, 2022. *Application of Taguchi method in activated carbon adsorption process of phenol removal from ceramic gasifier wastewater*. Environmental Challenges, vol. 6, p. 100450.
- [7]. A. A. El-Waseif, T. Y. Roshdy, M. O. Abdel-Monem, M. G. Hassan, 2021. *Taguchi design Analysis for optimization of probiotics cholesterol assimilation*. Materials Today: Proceedings.
- [8]. E. Arıcı, E. Çelik, O. Keleştemur, 2021. *An analysis of the engineering properties of mortars containing corn cob ash and polypropylene fiber using the Taguchi and Taguchi-based Grey Relational Analysis methods*. Case Studies in Construction Materials, vol. 15, p. e00652.

[9]. K. R, P. G M, N. T, E. M, 2022. *Machining parameters in WEDM of EN31 steel using Taguchi technique optimization*. Materials Today: Proceedings, vol. 50, pp. 1781-1785.

[10]. D. Nguyen, J. Wu, N. M. Quang, L. A. Duc, P. X. Son, 2021. *Applying fuzzy grey relationship analysis and Taguchi method in polishing surfaces of magnetic materials by using magnetorheological fluid*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 112, pp. 1675-1689.

[11]. S. Rawat, Y. X. Zhang, C. K. Lee, 2022. *Multi-response optimization of hybrid fibre engineered cementitious composite using Grey-Taguchi method and utility concept*. Construction and Building Materials, vol. 319, p. 126040.

[12]. S. Guha, P. Protim Das, B. Chandra Routara, 2021. *Parametric optimization of wire electric discharge machining on AISI4140 alloy steel using regression analysis and grey-fuzzy approach*. Materials Today: Proceedings, vol. 46, pp. 4734-4740.

[13]. N. Duy Trinh, N. Nhat Tan, N. M. Quang, P. Thi Thieu Thoa, L. A. Duc, 2021. *Application of magnetic liquid slurries and fuzzy grey analysis in polishing nickel-phosphorus coated SKD11 steel*. Particulate Science and Technology, pp. 1-14.

[14]. O. M. Olabanji, K. Mpofo, 2021. *Appraisal of conceptual designs: Coalescing fuzzy analytic hierarchy process (F-AHP) and fuzzy grey relational analysis (F-GRA)*. Results in Engineering, vol. 9, p. 100194.

[15]. Y. Wu, M. Liao, M. Hu, C. Xu, Y. Tao, J. Zhou, 2021. *Effectiveness assessment of air pollution prevention and control under collaborative supervision in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on combination weights and grey fuzzy synthetic evaluation analysis*. Sustainable Cities and Society, vol. 64, p. 102543, 2021/01/01/ 2021.

AUTHORS INFORMATION

Le The Hung¹, Pham Van Bong², Chu Khắc Trung², Hoang Tien Dung²

¹Hanoi Vocational College of High Technology

²Hanoi University of Industry