

DỰ ĐOÁN ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ CẮT, LƯU LƯỢNG VÀ ÁP SUẤT BÔI TRƠN TỐI THIỂU ĐẾN LỰC CẮT VÀ NHÁM BỀ MẶT KHI PHAY VẬT LIỆU THÉP S50C TÔI TRÊN TRUNG TÂM GIA CÔNG CNC 5 TRỤC

PREDICTING THE EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS AND FLOW RATES, PRESSURES OF MINIMUM QUANTITY LUBRICATION (MQL) ON CUTTING FORCE AND SURFACE ROUGHNESS IN MILLING OF HARDENED STEEL S50C ON 5-AXIS CNC MACHINING CENTER

Nguyễn Thành Công¹, Nguyễn Chí Bảo¹, Nguyễn Như Tùng¹,
Phạm Thị Thiều Thoa¹, Nguyễn Văn Cảnh¹, Hoàng Tiến Dũng^{1,*}

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phân tích và đánh giá ảnh hưởng đồng thời thông số chế độ cắt, lưu lượng và áp suất dung dịch trong bôi trơn tối thiểu đến lực cắt, nhám bề mặt trong quá trình phay vật liệu thép S50C sau nhiệt luyện (đạt độ cứng 52 HRC). Phương pháp Taguchi, một trong những phương pháp quy hoạch thực nghiệm hiệu quả hiện nay, được sử dụng trong nghiên cứu này và phần mềm phân tích thống kê Minitab 19 được ứng dụng để xây dựng mô hình toán hồi quy giữa thông số chế độ cắt, lưu lượng và áp suất dung dịch bôi trơn tối thiểu đến lực cắt và nhám bề mặt chi tiết khi gia công trên máy phay CNC 5 trục. Qua đó phân tích và dự đoán ảnh hưởng của chế độ cắt và chế độ bôi trơn tối thiểu đến độ nhám bề mặt cũng như lực cắt trong quá trình gia công và ứng dụng phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) để phân tích mức độ ảnh hưởng của thông số chế độ cắt và chế độ bôi trơn tối thiểu đến lực cắt khi phay. Kết quả này có thể là tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo và ứng dụng trong công nghiệp chế tạo.

Từ khóa: Chế độ cắt, bôi trơn tối thiểu, nhám bề mặt, lực cắt, quá trình phay, vật liệu thép carbon S50C.

ABSTRACT

The paper analyses and evaluates the effect of cutting parameters, flow rates, and pressures in minimum quantity lubrication system on cutting force and surface roughness in the milling process of S50C carbon steel materials after heat treatment (reaching a hardness of 52 HRC). The Taguchi method, one of the most effective experimental planning methods nowadays, is used in this study, and the statistical analysis software, namely Minitab 19, is utilized to build a regression model between parameters of the cutting process, flow rates and pressures of the minimum quantity lubrication system and the cutting force, surface roughness of the part when machining on a 5-axis CNC milling machine. Thereby analyzing and predicting the effect of cutting parameters and minimum quantity lubrication conditions on the surface roughness and cutting force during machining, also applying analysis of variance (ANOVA) to determine the influence level of parameters milling process as well as minimum quantity lubrication system to the cutting force and surface roughness when milling. This study provides the foundation for future research as well as an application in the field of machining.

Keywords: Cutting parameters, minimum quantity lubrication (MQL), surface roughness, cutting force, milling process, S50C steel.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: tiendung@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/3/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/4/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/10/2021

1. GIỚI THIỆU

Vật liệu thép S50C là một loại thép cường độ cao, có hàm lượng carbon trung bình, có khả năng chịu oxi hoá mạnh, chống gỉ cao, chống nhiệt cao và đánh bóng tốt, vì lý do này nên thép S50C được sử dụng rất rộng rãi trong ngành khuôn mẫu trong chế tạo vỏ khuôn, các khuôn nhựa, ngoài ra còn được dùng trong ngành đóng tàu, thuyền, kết cấu nhà xưởng và các chi tiết cơ khí khác,... Có nhiều phương pháp khác nhau để gia công các chi tiết, sản phẩm vật liệu thép S50C các phương pháp gia công áp lực, đúc, gia công cắt gọt... Trong đó phương pháp gia công cắt gọt chiếm tỷ lệ khá cao trong nền công nghiệp sản xuất ô tô, chế tạo máy.

Đối với các doanh nghiệp chế tạo vấn đề liên quan đến hiệu quả kinh tế là cần thiết và cấp thiết phải nghiên cứu. Để đáp ứng được điều kiện phát triển và nhu cầu của thị trường mang tính cạnh tranh cao như ngày nay, việc áp dụng một phương án gia công hợp lý trong quá trình gia công là rất cần thiết.

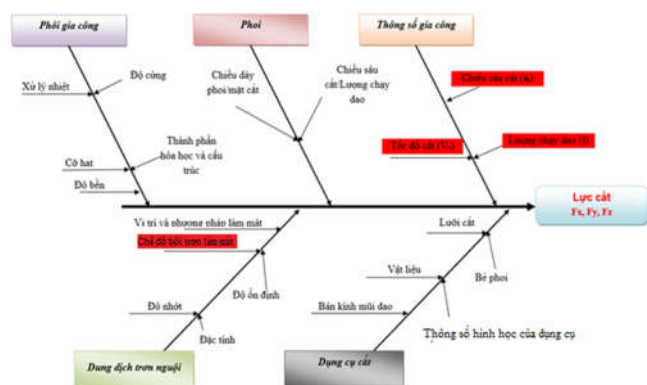
Thép cứng nhìn chung là một vật liệu khó gia công cắt gọt, tuy nhiên công nghệ gia công loại vật

liệu này bằng dụng cụ có lưỡi cắt, điển hình là phay cứng đã và đang thu hút được sự chú ý đáng kể. Trong gia công, sản xuất các loại khuôn mẫu, phay cứng nổi lên như là một phương pháp gia công có thể thay thế cho phương pháp gia công tia lửa điện chi phí cao đang được sử dụng hiện nay [1-2]. Để áp dụng phay vào gia công vật liệu cứng, cần có các thiết bị cũng như phương án phù hợp và áp dụng công nghệ bôi trơn tối thiểu là giải pháp hiện nay đang được quan tâm nghiên cứu [3-4]. Trong bài báo này, nhóm tác giả tập trung nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời thông số chế độ cắt, thông số lưu lượng và áp suất phun của hệ thống bôi trơn tối thiểu đến nhám bề mặt và lực cắt khi phay vật liệu thép S50C sau nhiệt luyện.

Mục đích của nghiên cứu này nhằm xây dựng mô hình toán học hồi quy giữa các thông số đầu vào: tốc độ cắt (V_c), lượng tiến dao răng (f_z), chiều sâu cắt theo phương hướng trục (a_p), áp suất phun (P) và lưu lượng phun (Q) với thông số đầu ra độ nhám bề mặt, lực cắt khi phay vật liệu thép S50C sau nhiệt.

Trong quá trình gia công vật liệu cứng bằng dao phay gắn mảnh hợp kim cứng, lực cắt thay đổi liên tục trong suốt quá trình cắt. Trong quá trình gia công có rất nhiều yếu tố khác nhau trong và ngoài hệ thống gia công ảnh hưởng trực tiếp hay gián tiếp tới lực trong quá trình gia công cắt gọt, một số thông số điển hình được tổng hợp bằng biểu đồ xương cá hình 1 [5-6].

Ngoài ra, nhám bề mặt của chi tiết cũng là một trong những chỉ tiêu quan trọng để đánh giá sản phẩm. Những nghiên cứu gần đây cho thấy việc sử dụng bôi trơn tối thiểu vào gia công phay có những kết quả tích cực về chất lượng và môi trường [7-9].



Hình 1. Biểu đồ xương cá các khía cạnh tác động tới lực cắt trong quá trình gia công

Nghiên cứu này hướng tới việc đánh giá tác động vào các thông số đầu ra từ các yếu tố đầu vào bằng cách áp dụng phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) được tích hợp trên phần mềm ứng dụng thống kê Minitab 19, đồng thời tiến hành xây dựng mô hình toán học hồi quy và dự đoán độ nhám bề mặt của sản phẩm và lực cắt trong quá trình gia công. Có một mối quan hệ tương quan giữa lực cắt khi phay và nhám bề mặt của chi tiết gia công, do

đó thông số lực cắt có thể để dự đoán được quy luật của chất lượng bề mặt của chi tiết gia công [10]. Việc nghiên cứu quan tâm cùng lúc tới lực cắt và nhám bề mặt trong gia công là rất quan trọng đối với các nhà nghiên cứu. Qua đó hướng tới giải bài toán giám sát trực tuyến và tối ưu hóa đa mục tiêu các chỉ tiêu về chất lượng và kỹ thuật giúp tăng hiệu quả kinh tế và chất lượng sản phẩm khi gia công [11].

2. KHẢO SÁT LỰC CẮT VÀ NHÁM BỀ MẶT KHI PHAY CỨNG THÉP S50C

2.1. Điều kiện khảo sát

Trung tâm gia công CNC 5 trục đồng thời (DMU50) hệ điều khiển Siemens 840D: Hành trình trục X/Y/Z = 500/450/400; hành trình trục B: -5 độ đến +110 độ; hành trình trục C: 360 độ; Động cơ trục chính: tốc độ trục chính từ 20 đến 14.000 (vòng/phút), công suất động cơ trục chính: 20,3kW, côn trục chính SK40 tiêu chuẩn DIN69871. Bàn làm việc: tốc độ quay trục B và C tối đa: 20(vòng/phút); dài dao: số dao: 16 vị trí; chiều dài dao tối đa: 300; trọng lượng dao tối đa: 6kg; tốc độ di chuyển các trục; tốc độ gia công tối đa theo các trục X/Y/Z: 30.000mm/phút; tốc độ chạy dao nhanh theo các trục X/Y/Z: 30.000mm/phút



Hình 2. Trung tâm gia công 5 trục

Thiết bị bôi trơn tối thiểu MQL: Hệ thống bôi trơn tối thiểu cho gia công kim loại của hãng TOPSET, Bắc Kinh, Trung Quốc. Có thông số kỹ thuật như sau: Kích thước đầu phun: 6 mm, số đầu phun tối đa: 2 vòi phun. Dung dịch bôi trơn của hệ thống bôi trơn tối thiểu trong nghiên cứu này là dầu phộng.



Hình 3. Hệ thống bôi trơn tối thiểu

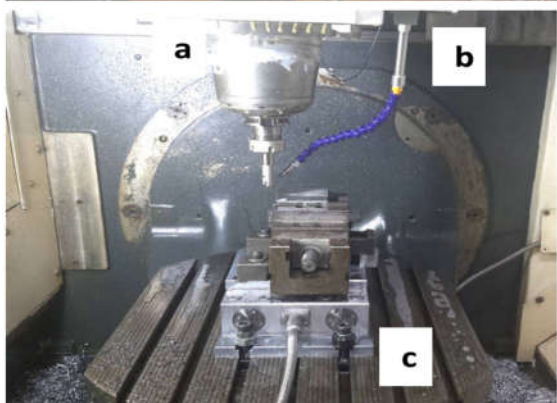
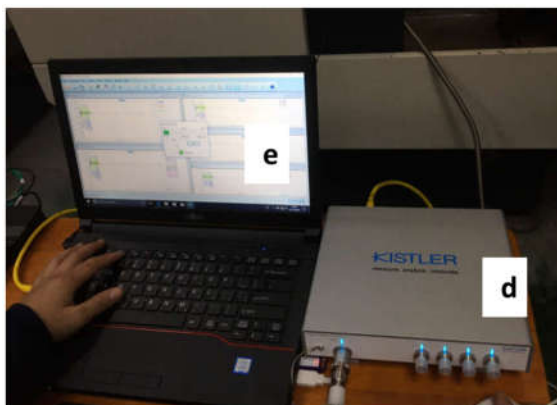
Dụng cụ cắt: Sử dụng dụng cụ cắt gắn mảnh hợp kim, vật liệu cán dao: hợp kim cứng, EGO^o của Đài Loan. Đường

kính cắt gọt (d) = 16mm, đường kính cán (D) = 17mm. Số vị trí lắp mảnh cắt: 2, chiều dài: 150mm. Mảnh cắt hợp kim cứng của hãng WIDA có mã APMT1135PDR-SPTIEH, có phủ TiAlN, bán kính mũi dao $R = 0,8\text{mm}$ (hình 4).



Hình 4. Dụng cụ cắt sử dụng trong thí nghiệm

Thiết bị đo lực:Thực nghiệm sử dụng thiết bị đo lực 3 thành phần mã số Kistler Type 9139AA: dải đo (-3kN ÷ 3kN), hộp xử lý dữ liệu và một máy tính cùng với phần mềm DynoWare để đo và xử lý dữ liệu thông tin như hình 5.

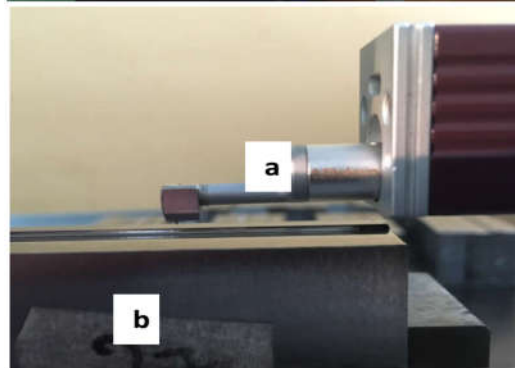
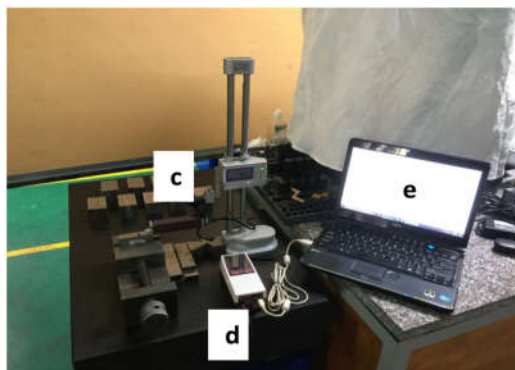


Hình 5. Hệ thống thiết bị đo lực cắt

a. Máy CNC 5 trục; b. Đầu phun MQL; c. Thiết bị đo lực; d. Trung tâm xử lý dữ liệu; e. Hệ thống máy tính và phần mềm tích hợp

Thiết bị đo nhám: Nhám bề mặt R_a được đo bằng máy đo độ nhám MITUTOYO-Surftest SJ-210 Portable Surface Roughness Tester. Phần mềm SurfTest SJ USB

Communication Tool Ver 5.007 sử dụng để hiển thị và lưu trữ các thông số R_a theo tiêu chuẩn ISO 1997 (hình 6). Mỗi mẫu thí nghiệm được đo 3 lần, giá trị trung bình của 3 lần đo sẽ được sử dụng để phân tích và tính toán cho kết quả thí nghiệm.



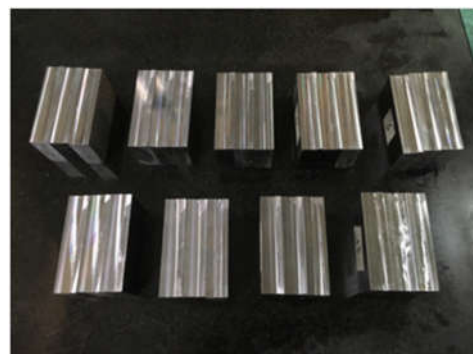
Hình 6. Hệ thống thiết bị đo nhám

a. Đầu đo nhám; b. Mẫu thí nghiệm; c. Hệ thống giá; d. Trung tâm xử lý dữ liệu; e. Hệ thống máy tính và phần mềm tích hợp

Chi tiết gia công: Vật liệu gia công thép S50C sau nhiệt kích thước mẫu thí nghiệm $L \times W \times H = 70 \times 30 \times 15$ (mm) (hình 7). Thành phần hóa học của thép S50C trong bảng 1 và đặc tính kỹ thuật của thép carbon S50C được thể hiện trên bảng 2.

Bảng 1. Thành phần hóa học của thép S50C

Ni + Cr ≤ 0,35%							
C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Ni (%)	Cr (%)	Cu (%)
0,47 - 0,53	0,15 - 0,35	0,6 - 0,9	Max 0,03	Max 0,035	Max 0,2	Max 0,2	Max 0,3



Hình 7. Phôi thép carbon S50C

Bảng 2. Đặc tính kỹ thuật của thép S50C

Đặc tính	Giá trị	Đặc tính	Giá trị
Khối lượng riêng(kg/m ³)	8000	Độ dẫn nhiệt (W/m-k)	47,2
Hệ số poisson	0,27 - 0,30	Nhiệt dung riêng (J/kg-k)	477
Modun đàn hồi (GPa)	190 - 210	Hệ số giãn nở nhiệt (1e-6/K)	16
Độ bền kéo (MPa)	1588	Nhiệt độ nóng chảy (°C)	1370 - 1400
Độ bền uốn (MPa)	1034	Nhiệt độ làm việc (°C)	0 - 500

2.2. Phân tích và đánh giá kết quả thực nghiệm

Qua mô hình nghiên cứu tiến hành thí nghiệm với V_c , f_z , a_p , P và Q. Ứng dụng phương pháp thực nghiệm Taguchi L_{27} trực giao với 3 mức khác nhau để thực nghiệm phân tích dự đoán lực cắt khi phay biên dạng. Trên cơ sở khuyến cáo của nhà sản xuất dụng cụ cắt đối với vật liệu dụng cụ cắt hợp kim cứng EGO[®] của Đài Loan các thông số cắt khi gia công tinh vật liệu thép S50C sau nhiệt trong khoảng giới hạn như sau:

- Vận tốc cắt v trên máy phay cao tốc nằm trong khoảng: 120 ÷ 300m/phút;
- Chiều sâu cắt theo phương hướng trục a_p : 0,1 ÷ 0,9mm;
- Bước tiến f_z nằm trong khoảng: 0,02 ÷ 0,1mm/răng;
- Áp suất P của hệ thống bôi trơn tối thiểu: 2 ÷ 6MPa;
- Lưu lượng Q của hệ thống bôi trơn tối thiểu trong khoảng: 50 ÷ 150ml/h.

Bảng 4. Bảng thông số đầu vào của thực nghiệm

TT	Thông số	Mức 1	Mức 2	Mức 3
		-1	0	1
1	Vận tốc cắt (V_c) [m/phút]	120	210	300
2	Lượng tiến răng (f_z) [mm/răng]	0,02	0,06	0,1
3	Chiều sâu cắt hướng trục (a_p) [mm]	0,1	0,5	0,9
4	Áp suất (P) [MPa]	2	4	6
5	Lưu lượng (Q) [ml/h]	50	100	150

Bảng 3. Kết quả đo độ nhám bề mặt và lực cắt

STT	Biến mã hoá					Thông số thực nghiệm					Nhám bề mặt (R_a)	Lực cắt (F)
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	P [MPa]	Q [ml/h]	V_c [m/phút]	f_z [mm/răng]	a_p [mm]		
1	-1	-1	-1	-1	-1	2	50	120	0,02	0,1	0,1123	242,5857
2	-1	-1	-1	-1	0	2	50	120	0,02	0,5	0,1673	319,6112
3	-1	-1	-1	-1	1	2	50	120	0,02	0,9	0,1317	261,8555
4	-1	0	0	0	-1	2	100	210	0,06	0,1	0,1240	291,2619
5	-1	0	0	0	0	2	100	210	0,06	0,5	0,1300	600,3795
6	-1	0	0	0	1	2	100	210	0,06	0,9	0,1280	747,9208
7	-1	1	1	1	-1	2	150	300	0,1	0,1	0,1417	386,3822
8	-1	1	1	1	0	2	150	300	0,1	0,5	0,1560	694,0772
9	-1	1	1	1	1	2	150	300	0,1	0,9	0,1610	1091,7684
10	0	-1	0	1	-1	4	50	210	0,1	0,1	0,0980	234,2903
11	0	-1	0	1	0	4	50	210	0,1	0,5	0,1170	596,4672
12	0	-1	0	1	1	4	50	210	0,1	0,9	0,1650	883,1737
13	0	0	1	-1	-1	4	100	300	0,02	0,1	0,0723	296,3350
14	0	0	1	-1	0	4	100	300	0,02	0,5	0,0800	420,5361
15	0	0	1	-1	1	4	100	300	0,02	0,9	0,0930	629,3605
16	0	1	-1	0	-1	4	150	120	0,06	0,1	0,1367	259,0606
17	0	1	-1	0	0	4	150	120	0,06	0,5	0,1553	487,9602
18	0	1	-1	0	1	4	150	120	0,06	0,9	0,2423	834,1574
19	1	-1	1	0	-1	6	50	300	0,06	0,1	0,1667	234,6851
20	1	-1	1	0	0	6	50	300	0,06	0,5	0,2240	494,2717
21	1	-1	1	0	1	6	50	300	0,06	0,9	0,2400	931,3188
22	1	0	-1	1	-1	6	100	120	0,1	0,1	0,1350	239,1861
23	1	0	-1	1	0	6	100	120	0,1	0,5	0,2100	500,2546
24	1	0	-1	1	1	6	100	120	0,1	0,9	0,2770	843,2801
25	1	1	0	-1	-1	6	150	210	0,02	0,1	0,0933	162,7148
26	1	1	0	-1	0	6	150	210	0,02	0,5	0,0987	358,4126
27	1	1	0	-1	1	6	150	210	0,02	0,9	0,0900	511,9236

Bảng 5. Kết quả phân tích ANOVA nhám bề mặt

Number of obs:	27		R-squared:		93,12%	
			Adj R-squared:		85,08%	
Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	Prob > F	Percent contribution (%)
Model	0,068560	14	0,004897	11,59	0,000	93,12%
P	0,004439	1	0,004439	10,51	0,007	6,03%
Q	0,001201	1	0,001201	2,84	0,118	1,63%
V _c	0,003016	1	0,003016	7,14	0,020	4,10%
f _z	0,015138	1	0,015138	35,84	0,000	20,56%
a _p	0,011150	1	0,011150	26,40	0,000	15,14%
P*P	0,004044	1	0,004044	9,57	0,009	5,49%
Q*Q	0,000728	1	0,000728	1,72	0,214	0,99%
V _c *V _c	0,012280	1	0,012280	29,07	0,000	16,68%
f _z *f _z	0,008936	1	0,008936	21,16	0,001	12,14%
a _p *a _p	0,000087	1	0,000087	0,21	0,657	0,12%
P*a _p	0,002389	1	0,002389	5,66	0,035	3,25%
Q*a _p	0,000120	1	0,000120	0,28	0,603	0,16%
V _c *a _p	0,001968	1	0,001968	4,66	0,052	2,67%
f _z *a _p	0,003061	1	0,003061	7,25	0,020	4,16%
Error	0,005069	12	0,000422			6,88%
Total	0,073629	26				100,00%

Theo lý thuyết quy hoạch thực nghiệm trực giao Taguchi lựa chọn thực nghiệm với 3 mức và được xác định như bảng 3.

Trong nghiên cứu thực nghiệm, với 5 thông số đầu vào, mỗi thông số gồm có 3 mức khác nhau. Ma trận thí nghiệm phù hợp nhất là [6] (L₂₇ - 3¹³) bao gồm 27 thí nghiệm được lựa chọn để tiến hành nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của 5 thông số chế độ cắt là vận tốc cắt, lượng tiến răng, chiều sâu cắt hướng trục, áp suất và lưu lượng bôi trơn tối thiểu đến lực cắt và nhám bề mặt khi phay. Kết quả đo độ nhám bề mặt và lực cắt như thể hiện trong bảng 4.

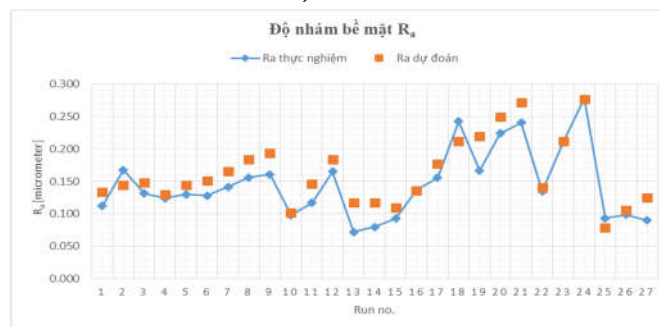
2.2.1. Phân tích kết quả nhám bề mặt chi tiết

Kết quả phân tích phương sai cho độ nhám bề mặt khi gia công thép carbon S50C sau nhiệt bằng dao phay gắn mảnh hợp kim được thống kê trong bảng 5. Kết quả phân tích ở các bảng này chỉ ra rằng: lượng tiến dao (f_z) ảnh hưởng lớn nhất đến nhám bề mặt chi tiết sau khi gia công 20,56%, ảnh hưởng của tốc độ cắt (V_c) chiếm 4,10%, chiều sâu cắt hướng trục (a_p) chiếm 15,14%, áp suất của hệ thống bôi trơn tối thiểu (P) chiếm 6,03%, ngoài ra còn có tác động của bình phương lực cắt (V_c*V_c) là 16,68%, bình phương lượng chạy dao răng (f_z*f_z) là 12,14%; còn các thông số khác ảnh hưởng ít hơn 6% được tính toán bằng phân tích ANOVA.

Phương trình hồi quy ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt và chế độ bôi trơn tối thiểu đến độ nhám bề mặt chi tiết sau khi gia công có mức độ ảnh hưởng của từng thông số riêng lẻ và sự ảnh hưởng lẫn nhau thông số đầu vào tới độ nhám bề mặt được đánh giá bằng phân tích ANOVA

bảng 5. So sánh kết quả đo được từ thực nghiệm và độ nhám bề mặt chi tiết sau khi gia công được mô tả hình 8. Qua hình mô tả cho thấy, kết quả dự đoán rất gần với kết quả đo được. Giá trị R² của phương trình hồi quy của độ nhám bề mặt đạt 93,12%. Vì vậy, mô hình hồi quy toán học này là mô hình hồi quy phù hợp nhất với 5 thông số đầu vào (vận tốc cắt, chiều sâu cắt theo phương dọc trục, lượng chạy dao, lưu lượng và áp suất vòi phun) và thông số đầu ra là giá trị độ nhám bề mặt.

$$\begin{cases}
 R_a = 0,3815 - 0,0529 * P - 0,000966 * Q \\
 - 0,002312 * V_c + 3,120 * f_z + 0,0461 * a_p \\
 + 0,00649 * P^2 + 0,000004 * Q^2 \\
 + 0,000006 * V_c^2 - 24,12 * f_z^2 - 0,0238 * a_p^2 \\
 + 0,01764 * P * a_p - 0,000158 * Q * a_p \\
 - 0,000356 * V_c * a_p + 0,998 * f_z * a_p \\
 R^2 = 93,12\%, \quad R^2_{Adj} = 85,08\%
 \end{cases} \quad (1)$$



Hình 8. So sánh kết quả đo từ thực nghiệm và dự đoán độ nhám R_a

Bảng 6. Kết quả phân tích ANOVA biên độ lực cắt

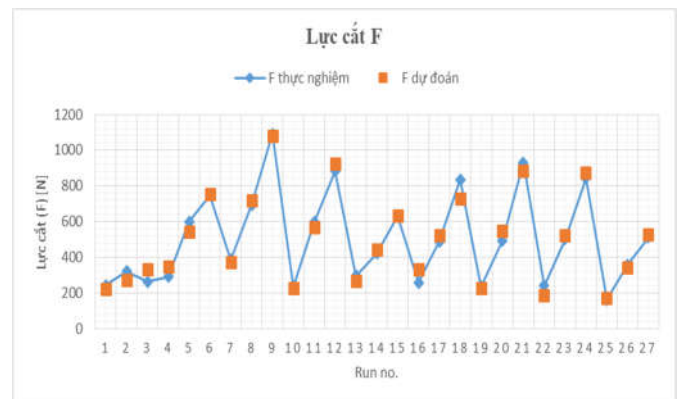
Number of obs:	27	R-squared:		97,63%	Adj R-squared:		94,86%
Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	Prob > F	Percent contribution (%)	
Model	1668132	14	119152	35,26	0,000	97,63%	
P	7192	1	65	0,02	0,892	0,42%	
Q	19221	1	531	0,16	0,699	1,12%	
V _c	78776	1	2208	0,65	0,435	4,61%	
f _z	285150	1	18496	5,47	0,037	16,69%	
a _p	1069822	1	10509	3,11	0,103	62,61%	
P*P	2546	1	2546	0,75	0,402	0,15%	
Q*Q	430	1	430	0,13	0,728	0,03%	
V _c *V _c	2869	1	2869	0,85	0,375	0,17%	
f _z *f _z	21994	1	21994	6,51	0,025	1,29%	
a _p *a _p	349	1	349	0,10	0,753	0,02%	
P*a _p	18301	1	18301	5,42	0,038	1,07%	
Q*a _p	5848	1	5848	1,73	0,213	0,34%	
V _c *a _p	23994	1	23994	7,10	0,021	1,40%	
f _z *a _p	131641	1	131641	38,96	0,000	7,70%	
Error	40547	12	3379			2,37%	
Total	1708679	26				100,00%	

2.2.2. Phân tích lực cắt

Sử dụng phương pháp ANOVA phân tích mức độ ảnh hưởng của các thông số thông qua bảng 6 cho thấy chiều sâu cắt hướng trục (a_p) ảnh hưởng lớn nhất đến lực cắt 62,61%, lượng tiến dao răng (f_z) 16,69%, tốc độ cắt (V_c) 4,61%, còn các thông số khác được thể hiện bằng phân tích ANOVA (bảng 6).

Phương trình toán học hồi quy ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt và chế độ bôi trơn tối thiểu đến lực cắt khi phay có mức độ ảnh hưởng của từng thông số riêng lẻ và sự ảnh hưởng lẫn nhau thông số đầu vào tới lực cắt được đánh giá như bằng phân tích phương sai ANOVA bảng 6. So sánh kết quả đo được từ thực nghiệm và giá trị dự đoán biên độ lực cắt được mô tả hình 9. Qua hình mô tả cho thấy kết quả dự đoán rất gần với kết quả đo được. Giá trị R² của phương trình hồi quy của giá trị lực cắt đạt được 97,63%. Vì vậy, mô hình hồi quy toán học này là mô hình hồi quy phù hợp nhất với 5 thông số đầu vào (vận tốc cắt, chiều sâu cắt theo phương dọc trục, lượng chạy, lưu lượng và áp suất vòi phun) và thông số đầu ra là giá trị lực cắt khi phay.

$$\begin{cases}
 F = 227 + 6,8 * P + 0,78 * Q - 1,02 * V_c \\
 \quad + 4414 * f_z - 397 * a_p - 5,15 * P^2 \\
 - 0,00338 * Q^2 + 0,00270 * V_c^2 - 37841 * f_z^2 \\
 \quad + 48 * a_p^2 + 48,8 * P * a_p + 1,104 * Q * a_p \\
 \quad + 1,242 * V_c * a_p + 6546 * f_z * a_p \\
 R^2 = 97,63\%, \quad R_{Adj}^2 = 94,86\%
 \end{cases} \quad (2)$$



Hình 9. So sánh kết quả đo từ thực nghiệm và dự đoán lực cắt F

3. PHÂN TÍCH MỨC ĐỘ ẢNH HƯỞNG CỦA THÔNG SỐ ĐẦU VÀO ĐỐI VỚI THÔNG SỐ ĐẦU RA

3.1. Thông số đầu ra nhám bề mặt chi tiết (R_a)

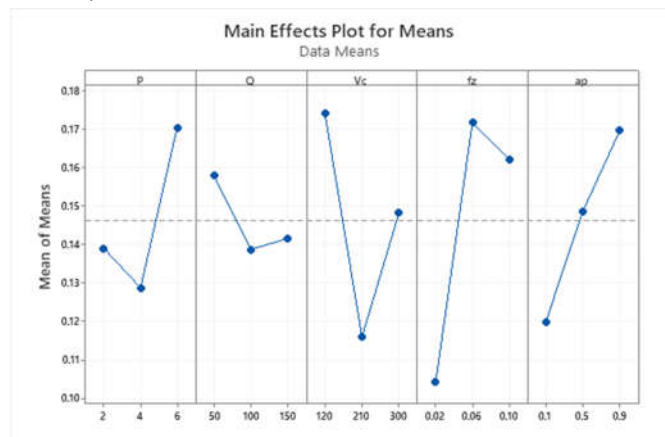
Sử dụng phương pháp phân tích Taguchi của phần mềm Minitab để tìm ra mức độ ảnh hưởng của áp suất (P), lưu lượng (Q), tốc độ cắt V_c, lượng tiến dao (f_z) và chiều sâu cắt hướng trục (a_p) đến nhám bề mặt (R_a) như trong bảng 7. Từ đó ta có biểu đồ đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt và thông số bôi trơn tối thiểu đến độ nhám bề mặt gia công như hình 10. Qua biểu đồ cho thấy độ nhám có xu hướng giảm nhẹ từ 0,14μm đến dưới 0,13μm khi tăng áp suất (P) từ mức 1 lên mức 2 và có một sự tăng đáng kể đã được nhìn thấy khi P chuyển lên mức 3, tăng lên đến hơn 0,17μm. Khi tăng lưu lượng (Q) từ mức 1 (50ml/h) đến mức 2 (100ml/h) thì nhám bề mặt giảm từ

0,14 μ m xuống 0,1 μ m. Tuy nhiên, sau đó giá trị này lại có xu hướng tăng nhẹ lên hơn 0,14 μ m ở mức 3 khi lưu lượng tiếp tục tăng.

Bảng 7. Mức độ ảnh hưởng của các thông số khảo sát đến nhám bề mặt R_a

Level	P	Q	V_c	f_z	a_p
1	0,1391	0,1580	0,1742	0,1043	0,1200
2	0,1289	0,1388	0,1160	0,1719	0,1487
3	0,1705	0,1417	0,1483	0,1623	0,1698
Delta	0,0417	0,0192	0,0582	0,0676	0,0498
Rank	4	5	2	1	3

Thông số vận tốc cắt (V_c) có xu hướng tác động gần tương tự như áp suất (P) và lưu lượng (Q) nhưng V_c cho thấy ảnh hưởng rõ ràng hơn. Tốc độ cắt từ mức 1 (120m/phút) lên mức 2 (200 m/phút) độ nhám bề mặt R_a đã có một sự cải thiện đáng kể, giá trị R_a từ gần 0,18 μ m giảm xuống xấp xỉ 0,11 μ m. Thông số lượng tiến dao (f_z) có tác động lớn nhất đến độ nhám bề mặt. Cụ thể qua đồ thị cho thấy độ nhám bề mặt đã tăng mạnh khi lượng chạy dao tăng từ mức 1 lên mức 2 thì giá trị độ nhám tăng từ 0,07 μ m lên 0,18 μ m, lượng tăng này không tiếp tục mà giảm nhẹ xuống khoảng 0,16 μ m khi điều chỉnh lượng chạy dao lên mức độ 3. Thông số có tác động tới nhám bề mặt lớn thứ 3 là chiều sâu cắt hướng trục (a_p), qua đồ thị hình 10 cho thấy chiều sâu cắt tăng từ mức 1 (0,1mm) lên mức 2 (0,5mm), mức 3 (0,9mm) thì độ nhám trải qua một quá trình tăng nhanh đến 0,15 μ m và 0,17 μ m.



Hình 10. Biểu đồ thể hiện ảnh hưởng của từng thông số đến độ nhám bề mặt R_a

3.2. Thông số đầu ra lực cắt (F)

Tương tự ta phân tích để tìm ra mức độ ảnh hưởng của áp suất (P), lưu lượng (Q), tốc độ cắt (V_c), lượng tiến dao (f_z) và chiều sâu cắt hướng trục (a_p) đến lực cắt khi phay như trong bảng 8. Từ đó ta có biểu đồ đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số cắt và thông số bôi trơn tối thiểu đến lực cắt khi gia công như hình 11. Ảnh hưởng lớn nhất tới lực cắt trong các thông số khảo sát thuộc về chiều sâu cắt hướng trục (a_p), lực cắt tăng lên nhanh chóng từ khoảng 280N ở mức 1 (0,1mm) và lên tới gần 800N ở mức 3 (0,9mm). Xếp sau đó theo mức độ ảnh hưởng tới lực cắt F là

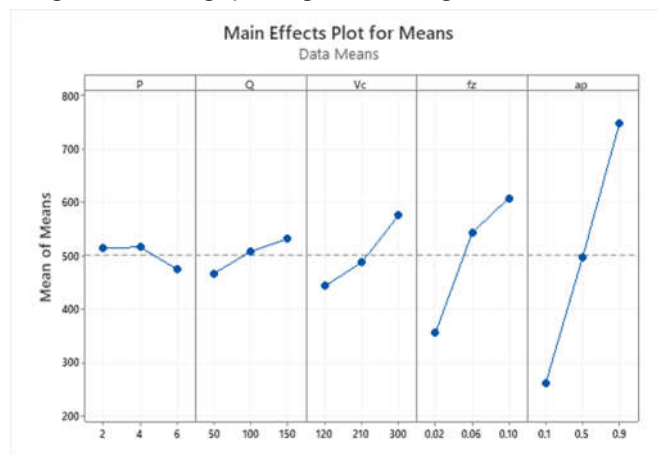
các thông số lượng tiến dao răng (f_z) và chiều sâu cắt hướng trục (a_p), lần lượt xếp thứ 2 và thứ 3. Cả hai thông số này đều có xu hướng làm cho lực cắt F tăng lên. Một khoảng tăng khá lớn của lực cắt (F), khoảng 300N, đã được báo cáo trong hình 11. Lượng tăng đó làm cho lực cắt (F) đạt tới giá trị hơn 600N tại mức thứ 3 (0,1mm/răng) của lượng tiến dao răng (f_z), từ chỉ khoảng hơn 300N tại mức 1 (0,02mm/răng).

Bảng 8. Mức độ ảnh hưởng của các thông số khảo sát đến lực cắt F

Level	P	Q	V_c	f_z	a_p
1	515,1	466,5	443,1	355,9	260,7
2	515,7	507,6	487,4	542,3	496,9
3	475,1	531,8	575,4	607,7	748,3
Delta	40,6	65,4	132,3	251,7	487,6
Rank	5	4	3	2	1

Tốc độ cắt (V_c) có cùng xu hướng ảnh hưởng tới lực cắt F giống như lượng tiến dao răng (f_z), tại giá trị khoảng 450N ở mức thứ 1, lực cắt F đã tăng lên 500N ở mức thứ 2 (210m/phút) và tiếp tục tăng lên khi điều chỉnh tốc độ cắt (V_c) lên mức thứ 3 (300m/phút) đạt giá trị gần 600N.

Trong khi ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt ảnh hưởng tới lực cắt khi gia công cho thấy một tác động lớn và rõ rệt thì ảnh hưởng của hai thông số là áp suất vòi phun (P) và lưu lượng dầu phun (Q) trong hệ thống bôi trơn tối thiểu tới lực cắt (F) là không đáng kể. Lực cắt khi gia công (F) thay đổi qua các mức khảo sát của áp suất (P) và lưu lượng (Q) là không nhiều, trải qua 3 mức độ của lưu lượng (Q) ta thấy lực cắt gọt (F) tăng lên và điều ngược lại đã xảy ra khi đo lực cắt (F) tại các mức của áp suất (P), tuy nhiên trong các trường hợp đó, giá trị của lực cắt khi gia công (F) cũng chỉ dao động quanh giá trị khoảng 500N.



Hình 11. Biểu đồ thể hiện ảnh hưởng của từng thông số đến lực cắt F

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã tiến hành thực nghiệm khảo sát và phân tích ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt cũng như thông số của chế độ bôi trơn tối thiểu (V_c, f_z, a_p, Q, P) khi phay thép cứng S50C sau nhiệt luyện. Nghiên cứu đã ứng dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi để thiết kế

và đánh giá thí nghiệm, ngoài ra phần mềm Minitab 19 được sử dụng như một công cụ để xây dựng mô hình toán học hồi quy thực nghiệm giữa thông số đầu vào (chế độ cắt và chế độ bôi trơn tối thiểu) và thông số đầu ra là độ nhám bề mặt của sản phẩm và lực cắt trong khi gia công, tương ứng với các phương trình (1) và (2).

Kết quả cho thấy độ nhám bề mặt R_a tương ứng với mức độ ảnh hưởng của thông số lượng tiến dao răng f_z (20,56%), tốc độ cắt V_c (4,10%), chiều sâu cắt hướng trục a_p (15,14%), áp suất của hệ thống bôi trơn tối thiểu P (6,03%), lưu lượng dầu phun Q (1,63%) và bình phương của tốc độ cắt $V_c * V_c$ (16,68%), bình phương của lượng tiến dao răng $f_z * f_z$ (12,14%). Lực cắt khi gia công F tương ứng với các mức độ ảnh hưởng của chiều sâu cắt hướng trục a_p (62,61%), lượng tiến dao răng f_z (16,69%), tốc độ cắt V_c (4,61%), lưu lượng dầu phun Q (1,12%), áp suất phun P (0,42%) và tác động chéo giữa lượng tiến dao f_z và chiều sâu cắt a_p (7,70%).

Dựa trên các phân tích trong nghiên cứu này, các phương án gia công và chế độ gia công hợp lý có thể được ứng dụng trong công nghiệp gia công các sản phẩm từ các vật liệu tương tự. Kết quả cũng cho thấy bôi trơn tối thiểu đã có những tác động nhất định đến các thông số đầu ra, tuy nhiên những ảnh hưởng này là không đáng kể có thể là do giới hạn của miền được khảo sát. Tuy nhiên, với những khía cạnh tích cực của phương pháp bôi trơn tối thiểu như ít độc hại với môi trường và sức khỏe con người, việc nghiên cứu ứng dụng phương pháp này vào quá trình gia công để thay thế các phương pháp bôi trơn tưới nguội truyền thống là cần thiết trong các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Grzesik W., 2008. *Machining of hard materials*. Machining, Springer, pp. 97-126.
- [2]. Astakhov V. P., 2011. *Machining of hard materials—definitions and industrial applications*. Machining of Hard Materials, Springer, pp. 1-32.
- [3]. Al Bashir M., et al., 2015. *Effect of pulse Jet MQL in surface milling of hardened steel*. Journal of Mechanical Engineering, 45 (2), pp.67-72.
- [4]. Kang M., et al., 2008. *Effect of the minimum quantity lubrication in high-speed end-milling of AISI D2 cold-worked die steel (62 HRC) by coated carbide tools*. Surface and Coatings Technology, 202 (22-23), pp.5621-5624.
- [5]. Routara B., et al., 2009. *Roughness modeling and optimization in CNC end milling using response surface method: effect of workpiece material variation*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 40 (11-12), pp.1166-1180.
- [6]. Benardos P., et al., 2003. *Predicting surface roughness in machining: a review*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43 (8), pp.833-844.
- [7]. Mia M., et al., 2017. *Optimization of MQL flow rate for minimum cutting force and surface roughness in end milling of hardened steel (HRC 40)*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89 (1-4), pp.675-690.

[8]. Raza M. H., et al., 2020. *Investigation of surface roughness in face milling processes*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 111 (9), pp.2589-2599.

[9]. Babu M. N., et al., 2019. *End milling of AISI 304 steel using minimum quantity lubrication*. Measurement, 138, pp.681-689.

[10]. Hoang T. D., et al., 2019. *Cutting Forces and Surface Roughness in Face-Milling of SKD61 Hard Steel*. Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, 65 (6).

[11]. Tien D. H., et al., 2021. *Online monitoring and multi-objective optimization of technological parameters in high-speed milling process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 112 (9), pp.2461-2483.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Thanh Cong, Nguyen Chi Bao, Nguyen Nhu Tung, Pham Thi Thieu Thoa, Nguyen Van Canh, Hoang Tien Dung

Hanoi University of Industry