

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ CẮT ĐẾN NHÁM BỀ MẶT KHI PHAY CAO TỐC THÉP P20 TRÊN MÁY PHAY CNC SK-V85

RESEARCH ON EFFECT OF CUTTING MODE ON SURFACE ROUGHNESS WHEN HIGH-SPEED MILLING STEEL P20 WITH SK-V85 CNC MILLING MACHINE

Lê Như Trang

Trường Đại học Kinh tế Kỹ thuật Công nghiệp

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt (V , S , t) đến độ nhám bề mặt gia công (R_a) được xác định khi phay cao tốc thép P20 bằng dao phay ngón của hãng SKEYE trên máy phay CNC SK-V85 đã được trình bày. Bằng nghiên cứu thực nghiệm, mô hình hồi quy của độ nhám đã được xây dựng là một hàm mũ của các thông số chế độ cắt (vận tốc cắt, chiều sâu cắt, lượng tiến dao). Mô hình hồi quy này đã được kiểm tra bằng công cụ thống kê toán học với độ tin cậy lớn hơn 94,8%. Ngoài ra, ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đến độ nhám bề mặt khi gia công cũng đã được xác định. Trong đó, khi tăng lượng chạy dao (S) và chiều sâu cắt (t) thì độ nhám (R_a) tăng, còn khi tăng vận tốc cắt (V) thì độ nhám (R_a) giảm. Mô hình được đề xuất trong nghiên cứu này có thể được ứng dụng để nâng cao chất lượng bề mặt gia công khi phay cao tốc thép P20.

Từ khóa: Chế độ cắt; Độ nhám bề mặt; Phay tốc độ; Thép P20.

ABSTRACT

In this study, the influence of cutting mode parameters (V , S , t) on the machined surface roughness (R_a) was determined when high-speed milling of steel P20 with SKEYE end mills on milling machines CNC SK-V85 was presented. By experimental research, the regression model of roughness has been built which is an exponential function of the parameters of the cutting mode (cutting speed, depth of cut, feedrate). This regression model has been tested by mathematical statistical tools with confidence greater than 94.8%. In addition, the effect of cutting mode parameters on surface roughness during machining has also been determined. In particular, when increasing the amount of feed (S) and cutting depth (t), the roughness (R_a) increases, and when increasing the cutting speed (V), the roughness (R_a) decreases. The model proposed in this study can be applied to improve the quality of the machined surface when high-speed milling of P20 steel.

Keywords: Cutting mode; Surface roughness; Speed milling; Steel P20.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong gia công cao tốc, năng suất và chất lượng gia công phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố, ảnh hưởng của các yếu tố vật liệu dụng cụ cắt và thông số hình học của dụng cụ đã được hãng chế tạo dụng cụ cắt nghiên cứu và chứng minh [1]. Đối với một hệ thống công nghệ nhất định thì năng suất hay chất lượng bề mặt phụ thuộc chủ yếu vào thông số chế độ cắt là phương pháp cơ bản và hiệu quả để kiểm soát chất lượng gia công và nâng cao hiệu quả sử dụng thiết bị. Đặc biệt hơn nữa bề mặt chi tiết sau khi gia công cao tốc có thể đạt độ bóng bề mặt tương đương với phương pháp gia công mài, thời gian đánh bóng bề mặt sau khi gia công cao tốc nhỏ hơn rất nhiều so với phương pháp gia công truyền thống, năng suất bóc tách vật liệu cao hơn phương pháp gia công truyền thống [2].

Thực tế cho thấy chất lượng của bề mặt gia công của chi tiết không những phụ thuộc vào tính chất cơ lý của vật liệu, mà còn phụ thuộc vào trạng thái của lớp bề mặt, các chi tiết được chế tạo từ một loại vật liệu như nhau nhưng theo các phương pháp công nghệ và chế độ cắt khác nhau sẽ có tính chất của lớp bề mặt khác nhau, và độ nhám bề mặt là một trong các chỉ tiêu đánh giá chất lượng bề mặt đặc trưng cho tính chất hình học của bề mặt gia công [3]. Phay cao tốc là một phương pháp gia công đặc biệt nâng cao khả năng cắt vật liệu, chất lượng bề mặt và độ bền của dụng cụ cắt nhờ việc tăng tốc độ cắt, giảm tiết diện phoi cũng như lực ma sát. Ở vận tốc cắt thường, khi tăng tốc độ cắt lực cắt cũng tăng theo. Tuy nhiên, khi tốc độ cắt vượt quá một giới hạn nhất định, các lực cắt bắt đầu giảm [4].

Trong công nghệ chế tạo máy, việc

nghiên cứu về độ nhám bề mặt luôn là một vấn đề cấp thiết mà rất nhiều các nhà khoa học quan tâm vì mỗi điều kiện gia công và vật liệu gia công khác nhau thì độ nhám bề mặt lại có các kết quả không giống nhau. Các nghiên cứu của các tác giả Nguyễn Thanh Bình (và các cộng sự) [5], Phạm Minh Huệ (và cộng sự) [6] đã tìm ra được mô hình hồi quy của độ nhám và đánh giá được ảnh hưởng của chế độ cắt đến nhám bề mặt khi phay và tiện thép không gỉ SUS 304. Nghiên cứu của tác giả Nguyễn Thanh Bình (và các cộng sự) [7] cũng đã khảo sát được ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt (V, S, t) đến độ nhám bề mặt khi phay cao tốc thép làm khuôn SKD₁₁.

Để đánh giá ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đến độ nhám bề mặt khi phay cao tốc, nghiên cứu đã được tiến hành trên mẫu thép P20, máy phay CNC SK-V85 và sử dụng dụng cụ đo độ nhám chuyên dùng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết bị, dụng cụ và phối thực nghiệm

Để xác định sự ảnh hưởng của ba thông số chế độ cắt là vận tốc cắt (V), lượng chạy dao (S) và chiều sâu cắt (t) đến độ nhám bề mặt khi phay cao tốc thép P20 thì quá trình thực nghiệm được tiến hành trên máy phay CNC SK-V85 của hãng “Skeye” với hệ điều khiển FANUC 0i có tốc độ di chuyển trục X/Y/Z là 48/48/48 m/ph và tốc độ trục chính là 100-10.000 vòng/phút.

Dụng cụ cắt được sử dụng là dao phay ngón có gắn mảnh hợp kim cứng của hãng YG với các thông số của dao được thể hiện ở trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số của dụng cụ cắt

Tên gọi	Ký hiệu
Cán dao	32x150L
Mảnh lưỡi cắt	R390-11 T3 08M-PL 4220
Đường kính dao	32

Trong quá trình phay cao tốc, dụng cụ cắt được bôi trơn làm mát bằng cách dùng dung dịch tưới nguội Emunxi 4%, lưu lượng 20 lít/phút phun trực tiếp vào vùng đang gia công.

Thiết bị đo nhám bề mặt MITUTOYO – Surftest SJ – 210 của Nhật tại Phòng Kỹ thuật Đo lường Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội.

- Thang đo: Ra/Rq/Rz/Ry/Rp/Rt/R_z/Sm/...;
- Chiều dài tiêu chuẩn khi đo: 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8mm;
- Khoảng cách dịch chuyển tối đa: Trục X: 25mm, trục Z: 800mm;

- Đầu đo loại tiếp xúc dựa trên độ chênh lệch điện cảm, áp lực đo 0,75N;
- Loại đầu đo: Kim cương (r = 2);
- Tốc độ: 0,05; 0,1; 0,5; 1 mm/s khi đo;
- Tiêu chuẩn độ nhám: JIS, DIN, ISO, ANSI;
- Phần mềm điều khiển và xử lý số liệu: Matlab, Excel.

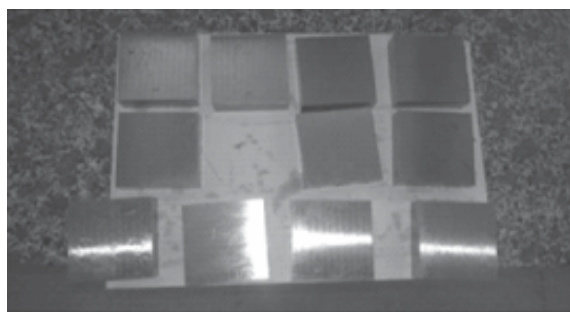


Vật liệu và phôi thực nghiệm: Vật liệu được chuẩn, có thành phần hóa học của thép khi ra lò sử dụng trong thí nghiệm là thép P20 phù hợp với các chỉ tiêu ghi trong bảng 2.

Bảng 2. Thành phần hóa học của thép P20 [8]

Mác thép	Thành phần hóa học (%)						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
P20	0.28-0.4	0.6-1.0	≤0.03	≤0.03	0.2-0.8	1.4-2.0	0.3-0.55

Phôi thí nghiệm có kích thước dài x rộng x cao là: 90 x 90 x 35 (mm) và số lượng phôi là 11 như trên hình 2.



Hình 2. Hình ảnh của phôi thực nghiệm

2.2. Thiết kế ma trận thực nghiệm

Sử dụng phương pháp phay mặt phẳng bằng dao phay ngón để làm thực nghiệm, căn cứ vào chế độ cắt khi gia công [3, 9], ta lựa chọn chế độ cắt thực nghiệm như sau:

- Vận tốc cắt khi gia công cao tốc trên máy phay CNC ứng với vật liệu làm dao và vật liệu gia công là: $V = 800-1000$ (m/phút).

- Chiều sâu cắt tinh lấy trong khoảng: 0,1-0,5 (mm).



- Bước tiến dao: 0,05-0,15 (mm/răng).

Theo quy hoạch thực nghiệm [6], ta chọn miền nghiên cứu thực nghiệm là:

$V_{\max} = 1000$ (m/phút); $S_{\max} = 0,15$ (mm/răng); $t_{\max} = 0,5$ (mm).

$V_{\min} = 800$ (m/phút); $S_{\min} = 0,05$ (mm/răng); $t_{\min} = 0,1$ (mm).

Bảng 3. Bảng tính toán thông số công nghệ

Các yếu tố	X1 (V)	X2 (s)	X3 (t)
Mức trên +1	1000	0,15	0,5
Mức dưới -1	800	0,05	0,1
Mức cơ sở 0	900	0,1	0,3
Khoảng biến thiên	100	0,05	0,2

Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm để nghiên cứu và xử lý số liệu thực nghiệm, khi đó các thông số đầu vào được viết lại dưới dạng bảng 3.

Chuyển các biến từ tự nhiên sang các biến mã hóa không thứ nguyên với thực nghiệm ba biến đầu vào, làm thí nghiệm với 08 thí nghiệm tại các đỉnh đơn hình đều và ba thí nghiệm trung tâm. Sau khi phay thực nghiệm, tiến hành đo độ nhám bề mặt ứng với từng thí nghiệm, ta có các thông số đầu vào và đầu ra của ma trận thực nghiệm như trong bảng 4.

Bảng 4. Các thông số đầu vào và đầu ra của ma trận thực nghiệm

STT	Biến mã hóa				Biến thực nghiệm S (mm/r)	t (mm)	Giá trị đo độ nhám Ra (gm)
	X1	X2	X3	V (m/ph)			
1	-1	-1	-1	800	0,05	0,1	0,12
2	+1	-1	-1	10000	0,05	0,1	0,15
3	-1	+1	-1	800	0,15	0,1	0,19
4	+1	+1	-1	1000	0,15	0,1	0,16
5	-1	-1	+1	800	0,05	0,5	0,17
6	+1	-1	+1	1000	0,05	0,5	0,13
7	-1	+1	+1	800	0,15	0,5	0,21
8	+1	+1	+1	1000	0,15	0,5	0,17
9	0	0	0	900	0,1	0,3	0,17
10	0	0	0	900	0,1	0,3	0,19
11	0	0	0	900	0,1	0,3	0,18

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả xây dựng mô hình hồi quy của độ nhám bề mặt gia công

- Xác định các hệ số của phương trình hồi quy:

Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao [9] để xác định ảnh hưởng đồng thời của vận tốc cắt (V), lượng chạy dao (S) và chiều sâu cắt (t) đến độ nhám bề mặt thép C45 khi phay cao tốc. Đồng thời, theo các nghiên cứu [5-7] cũng đã chỉ ra mối quan hệ giữa các yếu tố của chế độ cắt với độ nhám bề mặt khi gia công là một hàm số mũ có dạng:

$$Ra = C1.Va.Sb.tc \quad (1)$$

Logarit cơ số e cả hai vế phương trình, ta có:

$$\ln(Ra) = \ln(C1) + a.\ln(V) + b.\ln(S) + c.\ln(t) \quad (2)$$

Đặt $\ln(Ra) = y$; $a0 = \ln(C1)$; $a = a1$; $b = a2$; $c = a3$; $\ln(V) = x1$;

$\ln(S) = x2$; $\ln(t) = x3$. Khi đó, phương trình (1) có dạng:

$$y = a0 + a1.x1 + a2.x2 + a3.x3 \quad (3)$$

Với $a0, a1, a2, a3$ là các hệ số của phương trình hồi quy thực nghiệm.

Ma trận thực nghiệm trực giao:

$$[X].[A] = [Y] \quad (4)$$

Trong đó:

Ma trận thông số đầu vào [X] có các hệ số là logarit cơ số e các giá trị V, S, t dùng trong thí nghiệm.

Ma trận thông số đầu ra [Y] có các hệ số là logarit cơ số e các giá trị độ nhám đo được trên các mẫu thí nghiệm.

Nhân cả hai vế của phương trình (4) với ma trận chuyển vị của ma trận [X]:

$$[X]^T.[X].[A] = [X]^T.[Y] \quad (5)$$

Đặt $[M] = [X]^T.[X]$ và giả sử $\det(M) \neq 0$ thì [M] là ma trận khả nghịch. Khi đó, nghiệm của hệ là:

Từ các thông số thực nghiệm trên Bảng [A] = [X]⁻¹. [X]^T. [Y] (6) 4, các thông số được logarit hóa với số liệu theo Bảng 5.

Bảng 5. Logarit hóa các thông số chế độ cắt và giá trị độ nhám Ra

Biến thực nghiệm			Giá trị đo độ nhám Ra	Ln(V)	Ln(S)	Ln(t)	Ln(Ra)
V (m/ph)	S (mm/r)	t (mm)					
800	0,05	0,1	0,12	5,991465	-2,995732	-2,302585	-1,771957
1000	0,05	0,1	0,15	6,396930	-2,995732	-2,302585	-1,897120
800	0,15	0,1	0,19	5,991465	-1,897120	-2,302585	-1,560648
1000	0,15	0,1	0,16	6,396930	-1,897120	-2,302585	-1,660731
800	0,05	0,5	0,17	5,991465	-2,995732	-0,693147	-1,714798

1000	0,05	0,5	0,13	6,396930	-2,995732	-0,693147	-1,897120
800	0,15	0,5	0,21	5,991465	-1,897120	-0,693147	-1,427116
1000	0,15	0,5	0,17	6,396930	-1,897120	-0,693147	-1,560648
900	0,1	0,3	0,17	6,214608	-2,302585	-1,203973	-1,660731
900	0,1	0,3	0,19	6,214608	-2,302585	-1,203973	-1,714798
900	0,1	0,3	0,18	6,214608	-2,302585	-1,203973	-1,660731

Bảng 6. Kết quả tính toán độ tin cậy của giá trị thực nghiệm

STT	Rai (μm)	ai (μm)				
1	0,12	0,166735	-1,771957	-1,791347	0,007698	0,000376
2	0,15	0,145382	-1,897120	-1,928389	0,045327	0,000978
3	0,19	0,216974	-1,560648	-1,527979	0,015270	0,001067
4	0,16	0,189187	-1,660731	-1,665021	0,000552	0,000018
5	0,17	0,178162	-1,714798	-1,725063	0,000935	0,000105
6	0,13	0,155345	-1,897120	-1,862105	0,045327	0,001226
7	0,21	0,231843	-1,427116	-1,461695	0,066101	0,001196
8	0,17	0,202152	-1,560648	-1,598737	0,015270	0,001451
9	0,17	0,191024	-1,660731	-1,655354	0,000552	0,000029
10	0,19	0,191024	-1,714798	-1,655354	0,000935	0,003534
11	0,18	0,191024	-1,660731	-1,655354	0,000552	0,000029
Tổng	1,84				0,198518	0,010009
Trung bình	0,1673		-1,684218			

Vậy độ tin cậy r là:

$$r = \frac{\sigma_y^2 - \sigma_y'^2}{\sigma_y^2} = 94.80\%$$

- Kiểm định các tham số ai:

Theo tài liệu [10], phương sai dư S_{du} được tính theo công thức:

$$S_{du}^2 = \frac{S(A)}{N-K-1} \quad (12)$$

Trong đó: N là số thí nghiệm; k là số lượng thông số cần xác định, trừ thông số a_0 .

Tổng dư bình phương:

$$S(A) = ([Y] - [X].[A])T.([Y] - [X].[A]) \quad (13)$$

Dùng Excel để giải bài toán về ma trận, tính được: $S(A) = 0,010009$.

Thay vào (12) có: $S_{du} = 0,03781$. Sự tồn tại của các hệ số ai được xác định bởi công thức:

$$|t_{tinhs}^i| = \left| \frac{a_i}{S_{du}\sqrt{m_{ii}}} \right| \geq t_{bang}(N-k-1, r) \quad (14)$$

Trong đó m_{ii} là số hạng thứ ii của ma trận $M-1$ với $[M] = [X]T.[X]$.

$$[M]^{-1} = \begin{bmatrix} 119,725613 & -18,834893 & 1,017010 & 0,292496 \\ -18,834893 & 3,033378 & -0,007629 & -0,007263 \\ 1,017010 & -0,007629 & 0,406944 & -0,006972 \\ 0,292496 & -0,007263 & -0,006972 & 0,186391 \end{bmatrix}$$

Thay vào công thức (14) có:

$$|t_{tinh}^0| = 2,52996 \quad |t_{tinh}^1| = 5.13251 \quad |t_{tinh}^2| = 9.93936 \quad |t_{tinh}^3| = 2,52305$$

Tra bảng phân bố Student với $t_{bảng}$ (N-k-1; r): Độ tin cậy $r = 95\%$ và $N - k - 1 = 7$ có: $t_{bảng} = 1,895$.

Ta nhận thấy: $t_{tinh} > t_{bảng}$ với $i = 0 - 3$.

Như vậy, các hệ số ai thực sự tồn tại hay phương trình hồi quy thực nghiệm:

$$y = 1,046678 - 0,337887x_1 + 0,238727x_2 + 0,041155x_3$$

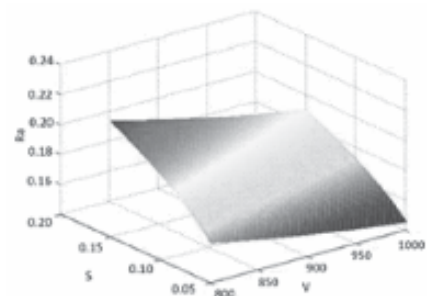
Tồn tại và quan hệ giữa các yếu tố chế độ cắt (V, S, t) và độ nhám bề mặt (Ra) được biểu diễn qua phương trình:

$$Ra = 2,848174 \cdot V^{-0,337887} \cdot S^{0,238727} \cdot T^{0,041155}$$

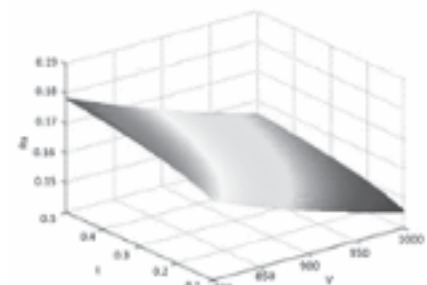
Hay nói cách khác là mô hình toán học này hoàn toàn phù hợp với thực nghiệm.

3.2. Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đến độ nhám bề mặt

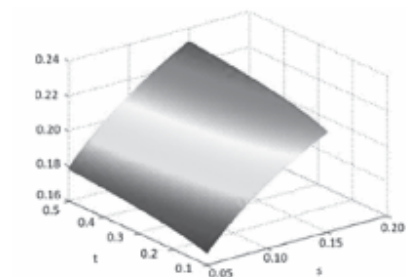
Sử dụng phần mềm Matlab để minh họa bằng đồ thị ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt (V, S, t) đến độ nhám bề mặt gia công (Ra) như trên các Hình 3, 4, 5.



Hình 3. Đồ thị quan hệ giữa Ra với vận tốc cắt V và bước tiến S



Hình 4. Đồ thị quan hệ giữa Ra với vận tốc cắt V và chiều sâu cắt t



Hình 5. Đồ thị quan hệ giữa Ra với chiều sâu cắt t và bước tiến S

Trên đồ thị trong các Hình 3, 4, 5 cho thấy quy luật ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến hàm mục tiêu như sau: Khi vận tốc cắt dao động từ 400-600 m/phút; lượng chạy dao thay đổi từ 0,05-0,15 mm/răng; chiều sâu cắt dao động từ 0,1-0,5 mm thì độ nhám bề mặt gia công của thép P20 khi phay cao tốc dao động từ 0,15-0,24 pm.

Từ kết quả nghiên cứu có thể thấy rằng, các thông số chế độ cắt có ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt. Tuy nhiên, ảnh hưởng của mỗi thông số chế độ cắt đến độ nhám bề mặt gia công là khác nhau. Kết quả ở Hình 3 chỉ ra rằng khi tăng lượng chạy dao (S) thì độ nhám (Ra) tăng nhưng khi tăng vận tốc cắt (V) thì độ nhám (Ra) lại giảm. Trong Hình 4, khi tăng chiều sâu cắt (t) thì độ nhám (Ra) cũng tăng, còn khi tăng vận tốc cắt (V) thì độ nhám (Ra) lại giảm. Còn trong hình 5, khi tăng chiều sâu cắt (t) và lượng chạy dao (S) thì độ nhám (Ra) tăng. Ta nhận thấy trong ba yếu tố của chế độ cắt thì lượng chạy dao (S) là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhám bề mặt.

4. KẾT LUẬN

Bằng thực nghiệm, nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình hồi quy của độ nhám bề mặt gia công (Ra) phụ thuộc vào ba thông số chế độ cắt (V, S, t) khi phay cao tốc thép P20 trên máy phay CNC SK-V85.

Mô hình hồi quy của độ nhám đã được xây dựng thành công là một hàm mũ của các thông số chế độ cắt (vận tốc cắt, chiều sâu cắt, lượng tiến dao). Mô hình hồi quy này đã được kiểm tra thành công bằng công cụ thống kê toán học với độ tin cậy lớn hơn 94,80%.

Ảnh hưởng của một số thông số chế độ cắt đến độ nhám bề mặt gia công đã được xác

định. Trong đó, khi tăng lượng chạy dao (S) và chiều sâu cắt (t) thì độ nhám bề mặt gia công (Ra) tăng, tuy nhiên ảnh hưởng của lượng chạy dao (S) là lớn hơn. Ngược lại, cùng với một lượng chạy dao (S) và chiều sâu cắt (t) không đổi thì khi tăng vận tốc cắt (V) độ nhám bề mặt (Ra) lại giảm. Đây chính là ưu điểm của gia công cao tốc, khi tăng vận tốc cắt vừa tăng được năng suất cắt và lại tăng được độ bóng bề mặt.

Kết quả nghiên cứu có thể làm cơ sở cho việc lựa chọn chế độ cắt hợp lý, tận dụng được khả năng và công suất hữu ích của máy khi gia công cao tốc trên máy phay CNC và tiến tới tối ưu hóa quá trình phay. ♦

Ngày nhận bài: 22/5/2023

Ngày phản biện: 12/6/2023

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Technical Guide of Sandvik (2014). *Metal cutting technology*. Truy cập từ <<https://www.sandvik.coromant.com/in/pages/metal-cutting-technology-at-pune0530-2145.aspx>>.
- [2]. Rafał Pasko, Lucjan Przybylski, Bogdan Slodki (2002); *High speed machining (HSM) – The effective way of modern cutting*. International Workshop CA Systems and Technologies, 72-79.
- [3]. Trần Văn Địch, Nguyễn Trọng Bình, Nguyễn Thế Đạt, Nguyễn Viết Tiếp, Trần Xuân Việt (2006); *Công nghệ chế tạo máy 1*. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [4]. Ekanayake R. A. & Mathew P (2007); *An Experimental Investigation of High Speed End Milling*. The 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, Brisbane, Australia, 696-702.
- [5]. Nguyễn Thanh Bình, Phạm Văn Bồng, Phạm Văn Đông, Nguyễn Chí Bảo (2015); *Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ cắt đến độ nhám bề mặt khi gia công SUS 304 trên trung tâm gia công CNC TC500*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, 31, 28-33.
- [6]. Phạm Thị Minh Huệ, Phạm Minh Thế (2017); *Nghiên cứu sự ảnh hưởng của chế độ cắt đến độ nhám bề mặt khi tiện vật liệu SUS 304*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Xây dựng, 11(3), 83-89.
- [7]. Nguyễn Thanh Bình, Nguyễn Huy Ninh, Hoàng Tiến Dũng (2015); *Khảo sát ảnh hưởng của chế độ cắt đến độ nhám bề mặt khi phay cao tốc trên máy 05 trục UCP600*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, 53, 671-678.
- [8]. Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 1766: 1975 (2008); *Thép carbon kết cấu chất lượng tốt – Mác thép và yêu cầu kỹ thuật*.
- [9]. Trần Văn Địch (2003); *Nghiên cứu độ chính xác gia công bằng thực nghiệm*. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [10]. Nguyễn Doãn Ý (2009); *Xử lý số liệu thực nghiệm trong kỹ thuật*. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.