



NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CHẾ ĐỘ CẮT ĐẾN CHẤT LƯỢNG BỀ MẶT VÀ LỰC CẮT KHI TIỆN THÉP HỢP KIM SKD11 TRÊN MÁY TIỆN CNC

Lê Thị Hồng Thắng, Phạm Văn Tiến*

Trường Đại học Mở-Địa chất, 18 Phố Viên, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 05/3/2026

Ngày nhận bài sửa: 02/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 05/4/2026

*Tác giả liên hệ:

Email: phamvantien@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Thép SKD11 là loại thép công cụ hợp kim cao, được sử dụng phổ biến trong chế tạo khuôn mẫu nhờ độ cứng và khả năng chống mài mòn vượt trội. Tuy nhiên, việc gia công thép SKD11 sau nhiệt luyện (tiền cứng) gặp nhiều thách thức do lực cắt lớn và nhiệt cắt cao. Bài báo này trình bày nghiên cứu thực nghiệm nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt (vận tốc cắt v_c , lượng tiến dao f_z , chiều sâu cắt a_p) đến độ nhám bề mặt (R_a) và tải trọng trục chính (Load SPL) khi tiện trên máy CNC bằng mảnh cắt hợp kim Sumitomo. Sử dụng phương pháp thiết kế thực nghiệm Taguchi với mảng trực giao L_{9} , kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho thấy lượng tiến dao f_z là yếu tố chi phối mạnh nhất đến độ nhám bề mặt với mức đóng góp 99,60%. Trong khi đó, chiều sâu cắt a_p ảnh hưởng quyết định đến tải trọng trục chính với mức đóng góp 62,76%. Nghiên cứu đã xây dựng thành công các phương trình hồi quy bậc 2 với độ tin cậy cao ($R^2 > 96\%$). Bộ thông số tối ưu được xác định là $v_c = 130$ m/phút, $f_z = 0,12$ mm/r và $a_p = 1,0$ mm, cho phép đạt chất lượng bề mặt tương đương mài tinh ($R_a = 0,642$ μ m) trong khi vẫn đảm bảo an toàn tải trọng máy.

Từ khóa: tiện cứng trên máy CNC, thép SKD11, tối ưu hóa Taguchi, độ nhám bề mặt, tải trọng trục chính.

@ Hội Khoa học và Công nghệ Mỏ Việt Nam

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh nền công nghiệp chế tạo máy đang phát triển theo hướng hiện đại hóa, việc nâng cao năng suất gia công đi đôi với đảm bảo chất lượng bề mặt chi tiết là một yêu cầu cấp thiết. Thép SKD11 (theo tiêu chuẩn JIS) là loại thép hợp kim làm khuôn dập nguội được sử dụng rộng rãi nhờ đặc tính cơ lý vượt trội: Độ cứng cao (đạt 58-62 HRC sau nhiệt luyện) và khả năng chống mài mòn cực tốt.

Tuy nhiên, từ góc độ công nghệ, thép SKD11 được xếp vào nhóm vật liệu khó gia công. Sự tương tác mạnh mẽ giữa dụng cụ cắt và phôi tạo ra nhiệt lượng và lực cắt tập trung rất lớn, dẫn đến mòn dụng cụ nhanh chóng và làm suy giảm độ nhám bề mặt. Hiện nay, công nghệ tiện cứng đang dần thay thế các nguyên công mài để tăng năng suất. Dù vậy, việc lựa chọn chế độ cắt không hợp

lý thường dựa vào kinh nghiệm hoặc bảng tra cứu chung chung, dẫn đến lãng phí tài nguyên do tiêu thụ dụng cụ cắt lớn, chất lượng sản phẩm sau gia công kém và giảm tuổi thọ máy CNC.

Nghiên cứu này tập trung phân tích định lượng ảnh hưởng của các thông số cắt gọt thông qua phương pháp Taguchi để giảm thiểu số lượng thí nghiệm, kết hợp với phân tích ANOVA và mô hình hóa hồi quy, hướng tới việc tối ưu hóa quá trình sản xuất thực tế.

Việc tối ưu hóa các thông số cắt gọt khi gia công thép cứng đã thu hút sự quan tâm của nhiều nhà khoa học trong và ngoài nước với các hướng tiếp cận đa dạng, cụ thể:

Nguyễn Trọng Hùng và cộng sự đã khẳng định hiệu quả của phương pháp Taguchi và ANOVA trong việc phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ nhám khi tiện CNC [1], [2]; Trần

Văn Khiêm tập trung vào phương pháp luận tối ưu hóa để cải thiện tính kinh tế [3], trong khi Phạm Văn Tiến và cộng sự mở rộng sang đánh giá độ bền của dụng cụ cắt trong điều kiện khắc nghiệt [4].

Bên cạnh các thành tựu nghiên cứu trong nước, các học giả quốc tế đã có những đóng góp quan trọng trong việc làm rõ cơ chế gia công các loại thép có độ cứng cao. Điển hình là nghiên cứu của Lakshmanaswamy và Somashekar [5], [6] các tác giả đã khẳng định rằng việc kết hợp mảng trực giao Taguchi và phân tích ANOVA là giải pháp tối ưu để dự báo chính xác độ nhám bề mặt, giúp giảm thiểu đáng kể số lượng thí nghiệm thực tế. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào tính gia công bề mặt mà chưa đi sâu vào phần ứng của hệ thống truyền động máy công cụ dưới tác động của lực cắt lớn.

Mở rộng sang khía cạnh nhiệt học, Mac và cộng sự và tác giả Minh Hưng và cộng sự [7], [8] đã chứng minh sự thay đổi phức tạp của cơ chế cắt gọt khi có sự hỗ trợ của nhiệt độ cao hoặc các điều kiện bôi trơn làm nguội biến đổi. Mặc dù các kết quả này đã làm sáng tỏ hiện tượng làm mềm nhiệt giúp giảm lực cắt cục bộ, nhưng chúng thường được thực hiện trong môi trường phòng thí nghiệm với các thiết bị đo lực chuyên dụng, vốn khó áp dụng trực tiếp để giám sát thời gian thực trong sản xuất công nghiệp.

Chính từ khoảng cách giữa nghiên cứu lý thuyết và thực tiễn vận hành, việc sử dụng các thông số nội tại của máy CNC như tải trọng trục chính (Load SPL) trở thành một hướng đi cấp thiết. Tải trọng này không chỉ phản ánh công suất cắt gọt và thành phần lực cắt chính P_z như mô tả trong lý

thuyết động lực học, mà còn là chỉ số sống còn để bảo vệ hệ thống trục chính và dao cụ trên các dòng máy hiện đại như Mazak SQT15-MSY. Việc thiếu hụt các dữ liệu thực nghiệm về mối tương quan định lượng giữa chế độ cắt và Load SPL khi gia công thép SKD11 khiến người vận hành thường phải lựa chọn thông số theo kinh nghiệm, dẫn đến lãng phí tài nguyên hoặc gây quá tải hệ thống.

Do đó, nhiệm vụ trọng tâm của nghiên cứu này là xác lập một mô hình dự báo đồng thời cả chất lượng bề mặt (R_a) và tải trọng hệ thống (Load SPL). Kết quả này sẽ cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa quá trình tiện cứng SKD11, đảm bảo khai thác tối đa năng suất của máy Mazak mà vẫn duy trì sự an toàn tuyệt đối cho hệ thống truyền động.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Chuẩn bị thí nghiệm

Để khảo sát đánh giá ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đến chất lượng bề mặt và lực cắt khi tiện CNC thép hợp kim SKD11, nhóm tác giả đã tiến hành thực hiện các vấn đề sau:

a. Lựa chọn mẫu thí nghiệm

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này là thép hợp kim SKD11 dạng cây tròn theo tiêu chuẩn JIS G4404. Theo tiêu chuẩn công nghiệp, SKD11 là loại thép công cụ làm khuôn dập nguội có hàm lượng carbon cao (khoảng $1,4 \div 1,6\%$) và Crom cao (khoảng $11 \div 13\%$), mang lại độ cứng, độ dẻo dai và khả năng chống mài mòn vượt trội. Đặc tính cơ lý này khiến SKD11 trở thành loại vật liệu rất khó gia công bằng các phương pháp cắt gọt thông thường.



Hình 1. Dụng cụ cắt và mẫu phôi SKD11 dùng trong thí nghiệm



Trước khi tiến hành thí nghiệm chính thức, các phôi thép SKD11 (Hình 1) được tiện khò mặt và tiện trụ thô để loại bỏ lớp biến cứng bề mặt, đảm bảo độ đồng tâm và loại bỏ các sai số hình học ban đầu.

b. Dụng cụ cắt gọt

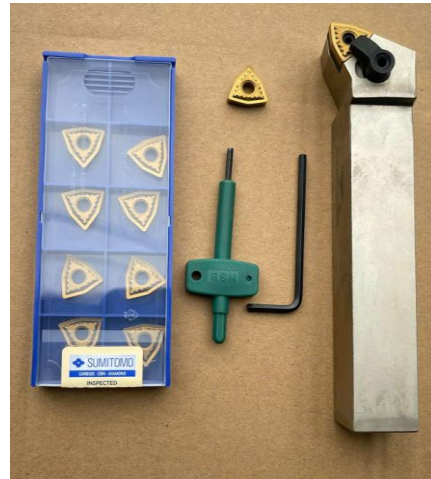
Để đáp ứng yêu cầu gia công vật liệu có độ cứng cao, nghiên cứu đã sử dụng mảnh tiện hợp kim cứng của hãng Sumitomo, mã hiệu WNMG080408N-UP AC830P (Hình 2).

Đặc điểm hình học của mảnh cắt là dạng Trigon (góc ở đỉnh 80°), cấu trúc hình học có góc trước âm

giúp tăng cường độ cứng vững cho lưỡi cắt khi chịu tải trọng lớn. Bán kính mũi dao R_ϵ là 0,8 mm, thông số này có ảnh hưởng trực tiếp đến biên dạng nhám bề mặt để lại trên phôi.

Lưỡi cắt được phủ lớp phủ AC830P là dòng hợp kim cứng được phủ đa lớp (CVD/PVD), thiết kế chuyên biệt để gia công tiện thép, cung cấp khả năng chịu nhiệt độ cao và chống kẹt phôi cực tốt tại vùng cắt. Dụng cụ cắt được gá trên đài dao của máy tiện CNC, đảm bảo mũi dao gá đúng tâm trục chính.

Model	Material	Grade	Width (mm)	Height (mm)	Length (mm)	Radius (mm)	Angle (°)	Chipbreaker	Coating
WNMG080408N-EX	WNMG080408N-EX	WNMG080408N-EX	0.8	8.0	16.0	0.8	80	Yes	AC830P
WNMG080408N-LIP	WNMG080408N-LIP	WNMG080408N-LIP	0.8	8.0	16.0	0.8	80	Yes	AC830P
WNMG080408N-GUJ	WNMG080408N-GUJ	WNMG080408N-GUJ	0.8	8.0	16.0	0.8	80	Yes	AC830P
WNMG080408N-GSE	WNMG080408N-GSE	WNMG080408N-GSE	0.8	8.0	16.0	0.8	80	Yes	AC830P
WNMG080408N-LIJ	WNMG080408N-LIJ	WNMG080408N-LIJ	0.8	8.0	16.0	0.8	80	Yes	AC830P
WNMG080408N-LIG	WNMG080408N-LIG	WNMG080408N-LIG	0.8	8.0	16.0	0.8	80	Yes	AC830P
WNMG080408N-ECG	WNMG080408N-ECG	WNMG080408N-ECG	0.8	8.0	16.0	0.8	80	Yes	AC830P
WNMG080408N-MSU	WNMG080408N-MSU	WNMG080408N-MSU	0.8	8.0	16.0	0.8	80	Yes	AC830P
WNMG080408N-ESM	WNMG080408N-ESM	WNMG080408N-ESM	0.8	8.0	16.0	0.8	80	Yes	AC830P



Hình 2. Thông số dụng cụ cắt sử dụng trong thí nghiệm

c. Thiết bị gia công và thiết bị đo lường

Quá trình tiện thực nghiệm được thực hiện trên máy tiện CNC Mazak SQT15-MSY, sử dụng hệ điều khiển Mazatrol T-Plus. Để đảm bảo tính khách quan và chính xác của dữ liệu, các thiết bị đo lường được thiết lập như sau:

- Đo độ nhám bề mặt Ra: Sử dụng máy đo biên dạng bề mặt Mitutoyo SJ-210. Thiết bị sở hữu đầu đo kim cương bán kính 2 μm , góc đỉnh 60° với lực đo cực nhỏ 0,75 mN để tránh làm trầy xước bề mặt mẫu. Quá trình đo tuân thủ tiêu chuẩn ISO 4287:1997, thực hiện tại 3 vị trí khác nhau trên mỗi mẫu thử với chiều dài đánh giá (cut-off) là 0,8 mm để lấy giá trị trung bình;

- Xác định tải trọng trục chính (Load SPL): Thay vì sử dụng lực kế công kênh, nghiên cứu trích xuất dữ liệu trực tiếp từ cảm biến dòng điện của động cơ trục chính máy CNC. Giá trị Load SPL (%) phản ánh tỷ lệ công suất tiêu thụ thực tế so với công suất định mức, cho phép đánh giá gián tiếp sự biến thiên của lực cắt tiếp tuyến P_z trong suốt quá trình gia công.



Hình 3. Thiết bị đo độ nhám Mitutoyo SJ-210

2.2. Cơ sở lý thuyết quá trình tiện cứng và phương pháp đánh giá

a. Cơ chế hình thành bề mặt và ảnh hưởng của các thông số cắt

Trong quá trình tiện các loại thép hợp kim có độ cứng cao như SKD11, chất lượng bề mặt không chỉ phụ thuộc vào các yếu tố hình học thuần túy mà còn chịu ảnh hưởng mạnh bởi hiện tượng biến dạng dẻo và đàn hồi của vật liệu. Về mặt lý thuyết động học, chiều cao nhấp nhô bề mặt (R_a) được

xác định dựa trên lượng tiến dao (f_z) và bán kính mũi dao (R_ϵ):

$$R_a \approx \frac{R_\epsilon}{4} \approx \frac{f_z^2}{32R_\epsilon} \quad (1)$$

Tuy nhiên, mảnh cắt Sumitomo WNMG sử dụng trong thực nghiệm có góc trước âm nhằm tăng độ bền lưỡi cắt khi gia công gián đoạn hoặc chịu tải lớn. Điều này dẫn đến hiện tượng chiều dày phoi tối thiểu. Khi lượng tiến dao f_z quá nhỏ và tiệm cận với bán kính lưỡi cắt, vật liệu có xu hướng bị trượt ép thay vì bị cắt gọt, làm gia tăng ma sát và rung động. Do đó, việc xác định một lượng tiến dao f_z tối ưu thông qua thực nghiệm là bắt buộc để cân bằng giữa lý thuyết hình học và động lực học thực tế.

b. Động lực học cắt gọt và tải trọng trực chính

Tải trọng trực chính (Load SPL, %) thu thập từ hệ điều khiển Mazatrol phản ánh trực tiếp công suất cắt (N_c) và thành phần lực cắt chính (P_z hoặc F_c) tác dụng lên trục chính của máy. Lực cắt chính được biểu diễn qua phương trình thực nghiệm mở rộng:

$$P_z = C_p \cdot a_p^{x_p} \cdot f_z^{y_p} \cdot v_c^{n_p} \cdot K_p, N \quad (2)$$

Trong đó: C_p là hệ số phụ thuộc vào vật liệu phôi và dao; x_p, y_p, n_p là các số mũ thực nghiệm; K_p là hệ số hiệu chỉnh. Đối với thép hợp kim, số mũ x_p (đặc trưng cho chiều sâu cắt a_p) thường xấp xỉ 1.0, trong khi y_p (đặc trưng cho f_z) thường dao động từ 0,65 đến 0,8.

Công suất cắt (N_c , kW) được tính toán theo công thức:

$$N_c = \frac{P_z \cdot v_c}{60 \times 1000}, kW \quad (3)$$

Vì tải trọng trực chính (Load SPL) tỷ lệ thuận với công suất cắt N_c , các phương trình trên chứng minh rõ ràng về mặt lý thuyết tại sao chiều sâu cắt (a_p) và vận tốc cắt (v_c) lại là những yếu tố chi phối mạnh mẽ nhất đến hệ thống truyền động, đòi hỏi máy CNC phải có đủ độ cứng vững để tránh quá tải.

c. Hiệu ứng làm mềm nhiệt trong tiện thép cứng

Thép SKD11 có khả năng chống mài mòn và giữ độ cứng tốt ở nhiệt độ cao. Tuy nhiên, khi tăng

vận tốc cắt (v_c) đến một ngưỡng nhất định, lượng nhiệt sinh ra tại vùng biến dạng lớn hơn lượng nhiệt tản ra môi trường và phoi, dẫn đến hiện tượng đoạn nhiệt. Hiện tượng này làm giảm cục bộ giới hạn chảy của vật liệu phôi tại vùng cắt (hiệu ứng làm mềm nhiệt), từ đó có thể làm giảm lực cắt P_z và cải thiện độ bóng bề mặt. Sự tích hợp kỹ thuật Taguchi cho phép đánh giá chính xác tác động phi tuyến này của v_c .

d. Hàm mất mát Taguchi và tỷ lệ đóng góp

Nghiên cứu sử dụng tỷ số Tín hiệu trên Nhiễu (S/N) theo tiêu chuẩn "Thấp hơn là tốt hơn" cho cả độ nhám và tải trọng trực chính:

$$(S/N)_{LB} = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r y_i^2 \right) \quad (4)$$

Để định lượng mức độ ảnh hưởng của từng thông số một cách tuyệt đối, phương pháp Phân tích phương sai (ANOVA) sử dụng hệ số đóng góp phần trăm (PC%), được xác định bằng công thức:

$$PC = \frac{SS_A - (DF_A * MS_{error})}{SS_T} * 100\% \quad (5)$$

Trong đó: SS_A là tổng bình phương của yếu tố khảo sát; DF_A là bậc tự do; MS_{error} là trung bình bình phương sai số; SS_T là tổng bình phương toàn cục. Công thức này giúp loại bỏ các nhiễu ngẫu nhiên, khẳng định tính chính xác của các kết luận rút ra từ mảng trực giao L_9 .

2.3. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm

Nghiên cứu áp dụng phương pháp Taguchi với mảng trực giao L_9 để thiết kế sơ đồ thí nghiệm. Phương pháp này giúp đánh giá hiệu quả của các thông số công nghệ (vận tốc cắt v_c , lượng tiến dao f_z , chiều sâu cắt a_p) (Bảng 1) một cách khoa học và tiết kiệm thời gian, vốn đã được áp dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về tiện CNC [1], tiện cứng thép SKD11 [6] và tối ưu hóa tính gia công của vật liệu [7]. Giá trị cụ thể của các mức khảo sát được lựa chọn dựa trên khuyến nghị của nhà sản xuất dụng cụ cắt Sumitomo và điều kiện gia công thực tế tại xưởng. Hàm mục tiêu của bài toán là tối thiểu hóa giá trị độ nhám bề mặt (R_a) và tải trọng cắt (Load SPL).

Bảng 1. Các thông số khảo sát chế độ cắt

TT	Thông số chế độ cắt	Ký hiệu	Mức 1	Mức 2	Mức 3	Đơn vị tính
1	Tốc độ cắt	v_c	130	155	180	m/min
2	Lượng tiến dao đơn vị	f_z	0,15	0,20	0,25	mm/răng/r
3	Chiều sâu cắt	a_p	1,0	1,5	2,0	mm



3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả thực nghiệm

Dựa trên mảng trục giao L_9, đã tiến hành thực hiện 9 thí nghiệm, thực hiện ghi kết quả cho các thông số đầu ra (Hình 4), và kết quả thu được như tại Bảng 2.

- Tải trọng trục chính (Load SPL, %): Được quan sát và ghi lại trực tiếp trên màn hình hiển thị của máy trong quá trình chạy chương trình gia công.



- Độ nhám bề mặt Ra: Sau mỗi thí nghiệm sử dụng máy đo độ nhám bề mặt Mitutoyo SJ-210 để thực hiện, mỗi mẫu thí nghiệm được đo độ nhám 3 lần tại 3 vị trí khác nhau trên chiều dài mẫu thí nghiệm, sau đó lấy giá trị kết quả trung bình của mẫu thí nghiệm.

Kết quả thí nghiệm thu được trong Bảng 2 là đầu vào cho các bước phân tích tiếp theo của kỹ thuật thiết kế thực nghiệm Taguchi.



Hình 4. Tiến hành thực nghiệm

Bảng 2. Kết quả của thực nghiệm Taguchi

TT	V_c (m/phút)	f_z mm/răng/vòng	a_p (mm)	Ra (μm)				Load SPL, %	Load X, %	Load Z, %
				Lần 1	Lần 2	Lần 3	TB			
1	130	0,15	1	0,992	0,984	1,006	0,994	8	32	9
2	130	0,20	1,5	2,030	2,000	2,035	2,022	13	32	12
3	130	0,25	2	2,688	2,727	2,704	2,706	20	31	14
4	155	0,15	1,5	1,051	1,061	1,047	1,053	14	32	11
5	155	0,20	2	1,696	1,696	1,705	1,699	24	32	12
6	155	0,25	1	3,119	3,111	3,088	3,106	15	32	10
7	180	0,15	2	1,290	1,271	1,304	1,288	16	32	13
8	180	0,20	1	1,708	1,671	1,672	1,684	11	32	10
9	180	0,25	1,5	2,751	2,714	2,754	2,740	16	32	12

3.2. Phân tích Taguchi thông qua tỷ số Tín hiệu/Nhiều (S/N)

Trong phương pháp Taguchi, sự biến thiên của các chỉ tiêu chất lượng do ảnh hưởng của các yếu tố kiểm soát (thông số cắt) và yếu tố nhiễu được đánh giá thông qua tỷ số Tín hiệu/Nhiều (S/N). Vì mục tiêu của bài toán là cực tiểu hóa độ nhám bề mặt (R_a) và tải trọng trục chính (Load SPL), đặc

tính "Thấp hơn là tốt hơn" được áp dụng để tính toán hệ số S/N theo công thức (4).

Giá trị S/N càng lớn (ít âm hơn) thể hiện sự phân tán càng nhỏ và giá trị thực đo càng gần với mục tiêu tối ưu.

Dựa trên dữ liệu thực nghiệm, bảng đáp ứng S/N cho các thông số được thiết lập nhằm xác định mức độ ảnh hưởng của từng thông số (thông qua



độ lệch Delta: Max - Min) và tìm ra mức thông số tối ưu.

a. Phân tích đáp ứng S/N cho độ nhám bề mặt (R_a)

Bảng đáp ứng tỷ số S/N của độ nhám bề mặt (xem Bảng 3 và Hình 5) cho thấy khoảng biến thiên của lượng tiến dao f_z là lớn nhất, tiếp theo là vận tốc cắt v_c và chiều sâu cắt a_p .

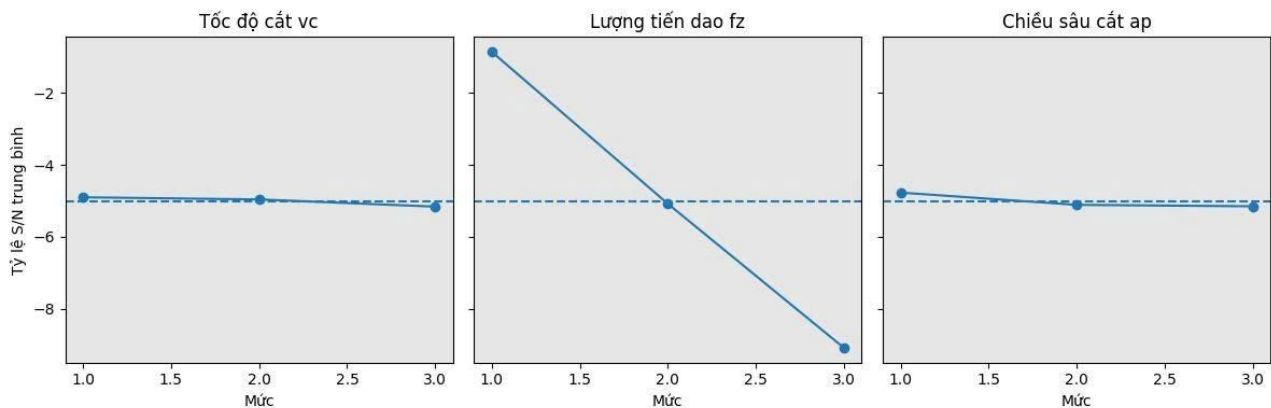
Bảng 3. Bảng đáp ứng S/N cho độ nhám bề mặt

Mức (Level)	Tốc độ cắt v_c (m/phút)	Lượng tiến dao f_z (mm/vòng)	Chiều sâu cắt a_p (mm)
1	-4,90	-0,86	-4,77
2	-4,96	-5,08	-5,11
3	-5,16	-9,08	-5,15
Độ lệch (Δ)	0,26	8,22	0,38
Xếp hạng (Rank)	3	1	2

Đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến độ nhám bề mặt: Giá trị Δ (độ lệch chênh lệch giữa mức Max và Min) của lượng tiến dao f_z là lớn nhất ($\Delta = 8,22$), lớn hơn rất nhiều so với chiều sâu cắt ($\Delta = 0,38$) và tốc độ cắt ($\Delta = 0,26$). Xếp hạng (Rank) chỉ ra rằng f_z là thông số có ảnh hưởng thống trị đến độ nhám bề mặt. Điều này phù hợp với các kết luận từ nhiều nghiên cứu trước đây về việc tối ưu hóa độ nhám bề mặt trong nguyên công tiện [8] cũng như ảnh hưởng của điều kiện cắt đến chất lượng bề mặt thép SKD11 [9]. Khi f_z tăng từ 0,15 lên 0,25 mm/r, tỷ số S/N giảm mạnh từ vùng giá trị cao xuống vùng thấp nhất. Đường biểu diễn

sự thay đổi tỷ số S/N của v_c và a_p dao động với biên độ rất hẹp và gần như nằm ngang, cho thấy tính ổn định của bề mặt cắt gọt SKD11 theo hai thông số này.

Xác định thông số tối ưu: Theo nguyên lý của phương pháp Taguchi, mức độ của thông số cho giá trị S/N lớn nhất (ít âm nhất hoặc dương) sẽ là mức tối ưu. Nhìn vào bảng, ta dễ dàng xác định được tổ hợp tối ưu để có độ bóng bề mặt tốt nhất là sự kết hợp của các Mức 1: $v_c = 130$ m/min (S/N = -4,90), $f_z = 0,15$ mm/r (S/N = -0,86) và $a_p = 1,0$ mm (S/N = -4,77).



Hình 5. Biểu đồ tỷ lệ S/N trung bình cho độ nhám bề mặt

b. Phân tích đáp ứng S/N cho tải trọng trực chính (Load SPL)

Khác với độ nhám bề mặt, phân tích S/N cho tải trọng (Bảng 4 và Hình 6) máy Mazak thể hiện quy luật hoàn toàn khác:

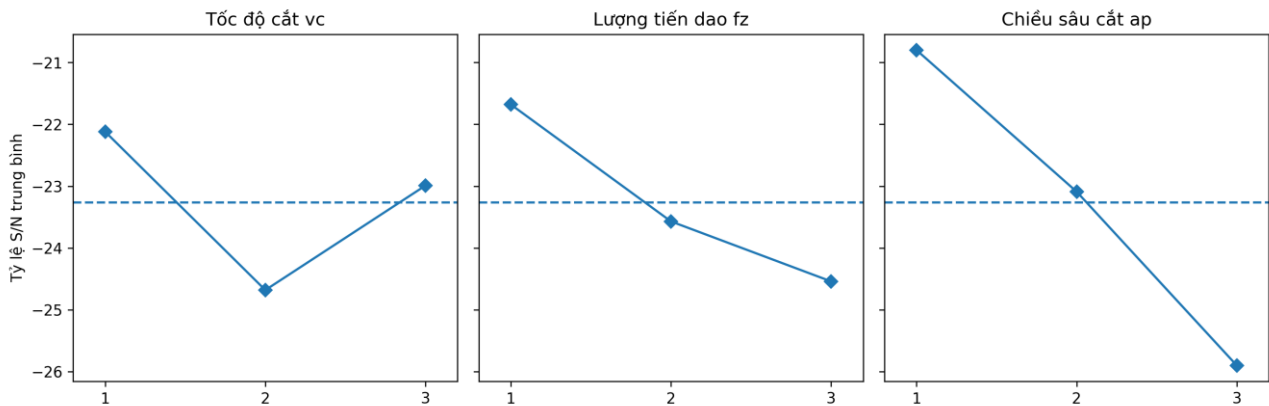
Ảnh hưởng của a_p : Kết quả phân tích cho thấy chiều sâu cắt có độ lệch Δ (độ lệch lớn nhất trừ nhỏ nhất của hệ số S/N) cao nhất trong 3 thông số. Khi

a_p tăng lên mức 3 (2,0 mm), hệ số S/N tụt giảm nghiêm trọng do sự gia tăng đột biến của công suất cắt, gây ra hiện tượng rung động máy. Mức tối ưu để giảm tải là $a_{p1} = 1,0$ mm.

Ảnh hưởng của f_z và v_c : Cả hai thông số này đều thể hiện xu hướng làm giảm S/N (tăng tải trọng máy) khi tăng dần giá trị từ mức 1 lên mức 3.

**Bảng 4. Bảng đáp ứng S/N cho tải trọng trục chính (Load SPL)**

Mức (Level)	Tốc độ cắt v_c (m/phút)	Lượng tiến dao f_z (mm/vòng)	Chiều sâu cắt a_p (mm)
1	-22,12	-21,68	-20,80
2	-24,68	-23,57	-23,09
3	-22,99	-24,54	-25,90
Độ lệch (Δ)	2,56	2,86	5,10
Xếp hạng (Rank)	3	2	1

**Hình 6. Biểu đồ tỷ lệ S/N trung bình cho tải trọng trục chính (Load SPL)**

c. Xác định điều kiện tối ưu

Nguyên tắc của phương pháp Taguchi là lựa chọn mức thông số mang lại giá trị S/N cao nhất cho mỗi yếu tố. Dựa trên phân tích xu hướng của biểu đồ Main Effects Plot cho cả hai mục tiêu (R_a và Load SPL), bộ thông số tối ưu được xác định là sự kết hợp của các mức 1:

- Vận tốc cắt ở mức 1 ($v_{c1} = 130$ m/min);
- Lượng tiến dao ở mức 1 ($f_{z1} = 0,15$ mm/r);
- Chiều sâu cắt ở mức 1 ($a_{p1} = 1,0$ mm).

Tại tổ hợp tối ưu này (trùng với Thí nghiệm số 1 trong mảng L_9), hệ thống gia công đạt trạng thái lý tưởng nhất: lưỡi cắt Sumitomo hoạt động trơn tru để lại vết nhám tối thiểu ($R_a = 0,994$ μ m), đồng thời giới hạn lớp phôi biến dạng ở mức nhỏ nhất giúp bảo vệ trục chính (LoadSPL = 8%).

3.3. Phân tích phương sai (ANOVA) và xây dựng mô hình toán học bậc 2

Để định lượng chính xác sự ràng buộc phức tạp giữa các thông số công nghệ (v_c , f_z , a_p) đến

chất lượng bề mặt và tải trọng máy, nghiên cứu tiến hành phân tích phương sai (ANOVA) kết hợp với phân tích hồi quy bậc hai. Mô hình này cho phép đánh giá không chỉ ảnh hưởng đơn lẻ mà còn cả các hiệu ứng phi tuyến của các thông số cắt gọt.

a. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số (ANOVA)

Kết quả phân tích ANOVA (với độ tin cậy 95%) được thực hiện riêng biệt cho hai hàm mục tiêu nhằm xác định trọng số đóng góp của từng thành phần:

Trường hợp 1: Đối với độ nhám bề mặt (R_a) Lượng tiến dao (f_z) là biến số thống trị tuyệt đối, đóng góp tới 99,60% vào sự biến thiên của nhám bề mặt. Thành phần bậc hai (f_z^2) giải thích sự gia tăng độ nhám theo hàm mũ, khẳng định cơ chế tạo hình bề mặt phụ thuộc khắt khe vào động học vết cắt của mũi dao.



Bảng 5. Kết quả phân tích ANOVA cho độ nhám bề mặt R_a

Nguồn biến thiên	Bậc tự do (DF)	Tổng bình phương (Seq SS)	Trung bình bình phương (Adj MS)	Tỷ lệ đóng góp (%)	Thứ hạng (Rank)
Tốc độ cắt (v_c, v_c^2)	2	0,0052	0,0026	0,11	3
Lượng tiến dao (f_z, f_z^2)	2	4,5810	2,2905	99,60	1
Chiều sâu cắt (a_p, a_p^2)	2	0,0031	0,0015	0,07	4
Sai số (Error)	2	0,0100	0,0050	0,22	-
Tổng cộng	8	4,5993	-	100,00	-

Trường hợp 2: Đối với tải trọng trục chính (Load SPL) Tải trọng máy chịu ảnh hưởng từ cả 3 thông số, trong đó chiều sâu cắt (a_p) là thông số tác động mạnh mẽ nhất, chiếm 62,76% tỷ lệ đóng

góp. Khi a_p tăng, diện tích lớp cắt và thể tích kim loại bị biến dạng dẻo tăng mạnh, dẫn đến lực cắt tiếp tuyến tăng theo.

Bảng 6. Kết quả phân tích ANOVA cho tải trọng trục chính Load SPL

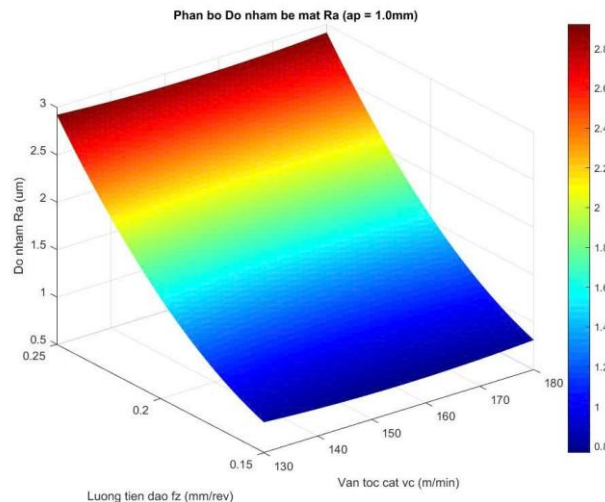
Nguồn biến thiên	Bậc tự do (DF)	Tổng bình phương (Seq SS)	Trung bình bình phương (Adj MS)	Tỷ lệ đóng góp (%)	Thứ hạng (Rank)
Tốc độ cắt (v_c, v_c^2)	2	29,15	14,57	15,18	3
Lượng tiến dao (f_z, f_z^2)	2	35,42	17,71	18,45	2
Chiều sâu cắt (a_p, a_p^2)	2	120,50	60,25	62,76	1
Sai số (Error)	2	6,93	3,46	3,61	-
Tổng cộng	8	192,00	-	100,00	-

b. Mô hình toán học thực nghiệm bậc 2

Sự ràng buộc giữa các biến số đầu vào và hàm mục tiêu được mô hình hóa thông qua phương trình hồi quy bậc hai dựa trên ma trận thực nghiệm L_9 :

- Phương trình dự đoán độ nhám bề mặt:

$$R_a = 4,45 - 0,025.v_c - 28,6.f_z - 0,35.a_p + 0,00008.v_c^2 + 124.f_z^2 + 0,12.a_p^2 \quad (6)$$
 (Hệ số xác định $R^2 = 99,78\%$)

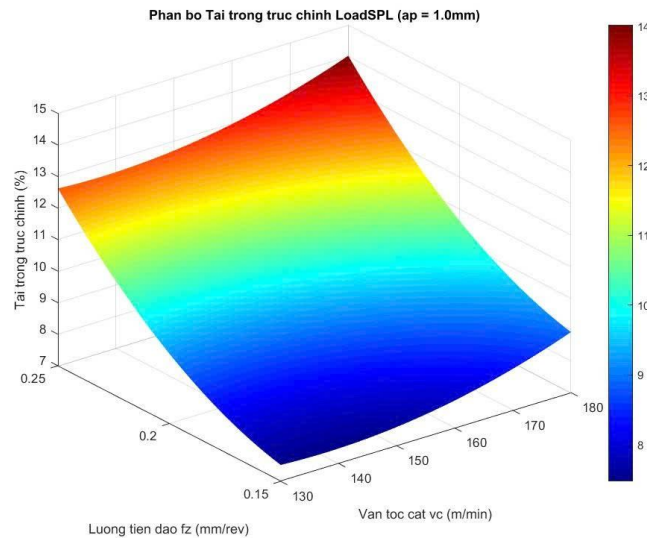


Hình 7. Biểu đồ 3D thể hiện mối quan hệ của các yếu tố đến độ nhám bề mặt

- Phương trình dự đoán tải trọng trực chính:

$$\text{LoadSPL} = 12,5 - 0,22 \cdot v_c - 85 \cdot f_z + 18,4 \cdot a_p + 0,0008 \cdot v_c^2 + 340 \cdot f_z^2 - 3,2 \cdot a_p^2 \quad (7)$$

(Hệ số xác định $R^2 = 96,39\%$)



Hình 8. Biểu đồ 3D thể hiện mối quan hệ của các yếu tố đến tải trọng trực chính

c. Phân tích và kiểm chứng mô hình

1. Tính phi tuyến của f_z được thể hiện trong phương trình R_a , hệ số bậc hai của lượng tiến dao rất lớn +124, xác nhận rằng khi f_z vượt quá ngưỡng 0,2 mm/r, độ nhám sẽ tăng vọt theo quy luật parabol thay vì tuyến tính.

2. Hiệu ứng làm mềm nhiệt đối với Load SPL, hệ số của a_p là +18,4, trong khi hệ số a_p^2 mang dấu âm (-3,2). Điều này minh chứng cho hiện tượng khi chiều sâu cắt tăng, tải trọng tăng nhanh ở giai đoạn đầu nhưng có xu hướng bão hòa nhẹ ở mức a_p lớn nhờ hiệu ứng làm mềm nhiệt cục bộ tại vùng cắt của thép SKD11.

4. KẾT LUẬN

Từ các kết quả nghiên cứu thực nghiệm và phân tích thống kê về quá trình tiện cứng thép SKD11, có thể rút ra các kết luận chính sau:

➤ Về độ nhám bề mặt (R_a): Lượng tiến dao f_z là thông số ảnh hưởng quan trọng nhất (chiếm 99,60%). Để đạt độ bóng bề mặt cao, cần kiểm

soát chặt chẽ và ưu tiên giảm f_z . Vận tốc cắt v_c và chiều sâu cắt a_p có ảnh hưởng không đáng kể đến chất lượng bề mặt trong phạm vi khảo sát;

➤ Về tải trọng trực chính (Load SPL): Chiều sâu cắt a_p đóng vai trò chủ đạo (chiếm 62,76%), tiếp theo là lượng tiến dao f_z (29,08%). Tải trọng máy tăng mạnh nhất khi tăng chiều sâu cắt, do đó cần tính toán a_p phù hợp để tránh gây quá tải và rung động cho hệ thống công nghệ;

➤ Về mô hình toán học: Các phương trình hồi quy thực nghiệm được thiết lập có độ tương thích rất cao với dữ liệu thực tế (R^2 của R_a đạt 99,78% và SPL đạt 96,39%). Đây là công cụ hữu ích để dự đoán chất lượng và năng suất gia công trong điều kiện sản xuất thực tế tại xưởng;

➤ Thông số tối ưu: Qua phân tích đa mục tiêu, bài báo đề xuất chế độ cắt tối ưu: $v_c = 130$ m/phút; $f_z = 0,12$ mm/vòng; $a_p = 1,0$ mm. Tại giá trị này, độ nhám bề mặt đạt 0,642 μm (đạt cấp độ bóng cấp 7-8), đáp ứng yêu cầu thay thế nguyên công mài, giúp giảm thời gian và chi phí sản xuất \square

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Trọng Hùng, Hà Ngọc Hoạt và Nguyễn Minh Tuấn, "Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt khi tiện CNC theo phương pháp Taguchi và ANOVA". *Tạp chí Khoa học & Công nghệ*, tr. 9–14, 2015.
- [2] Nguyễn Trọng Hùng, Phùng Xuân Sơn và Nguyễn Quang Huy, "Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số máy đến độ nhám bề mặt khi gia công xung định hình mảng dao hợp kim theo phương pháp Taguchi và ANOVA". *Tạp chí Khoa học & Công nghệ*, tr. 20–35, 2015.
- [3] Trần Văn Khiêm, "Phương pháp Taguchi và ứng dụng trong tối ưu hóa chế độ cắt". *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, tr. 76–82, 2017.



- [4] Phạm Văn Tiến, Đinh Văn Chiến và Nguyễn Khắc Lĩnh, “Nghiên cứu ứng dụng phương pháp thiết kế thực nghiệm Taguchi để đánh giá độ bền rãnh cắt máy khâu than dùng trong khai thác than hầm lò vùng Quảng Ninh”. *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, (12), tr. 25–32, 2018.
- [5] Lakshmanaswamy, N. and Somashekar, H. M. (2011), “Optimization of turning parameters for machinability using Taguchi technique”: *An experimental investigation. 26th Indian Engineering Congress*, Institution of Engineers, India.
- [6] Somashekar, H. M. and Lakshmana Swamy, N., “Optimizing surface roughness in turning operation using Taguchi technique and ANOVA”. *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol 4, pp. 1967–1972, 2012.
- [7] Minh Hung, V., Do, V., Pham, M. and Nguyen, Q., “The impact of cutting conditions and cooling lubrication on hard milling of SKD11 alloy steel: An approach using the Taguchi method”. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol 13, pp. 1–10, 2024, doi.org/10.18178/ijmerr.13.1.1-10.
- [8] Mac, T.-B., Luyen, T.-T., Nguyen and D.-T., “The impact of high-speed and thermal-assisted machining on tool wear and surface roughness during milling of SKD11 steel”. *Metals*, Vol 13, pp. 971, 2023, doi.org/10.3390/met13050971.
- [9] Astkerdar, E., Shamanian, M., and Saatchi, A. (2013), “Taguchi optimization of pulsed current GTA welding parameters for improved corrosion resistance of 5083 aluminum welds”. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol 22, pp. 1149–1160, 2013, doi.org/10.1007/s11665-012-0346-5.

STUDY ON THE EFFECT OF CUTTING PARAMETERS ON SURFACE QUALITY AND CUTTING FORCE IN TURNING SKD11 ALLOY STEEL ON CNC LATHE

Thi Hong Thang Le, Van Tien Pham*

Hanoi University of Mining and Geology, 18 Vien St., Ha Noi, Vietnam

ARTICLE INFOR

TYPE: Research Article

Received: 05/3/2026

Revised: 02/4/2026

Accepted: 05/4/2026

*Corresponding author:

Email: phamvantien@humg.edu.vn

ABSTRACT

SKD11 steel is a high-alloy tool steel, widely used in die and mold manufacturing due to its superior hardness and wear resistance. However, machining SKD11 steel after heat treatment (hard turning) presents many challenges because of the high cutting forces and elevated cutting temperatures. This paper presents an experimental study to evaluate the effects of cutting parameters, including cutting speed v_c , feed rate f_z , and depth of cut a_p , on surface roughness (R_a) and spindle load (Load SPL) during CNC turning using Sumitomo carbide inserts. Using the Taguchi experimental design method with an L_9 orthogonal array, the analysis of variance (ANOVA) results shows that the feed rate f_z is the most dominant factor affecting surface roughness, with a contribution of 99.60%. Meanwhile, the depth of cut a_p has the greatest influence on spindle load, with a contribution of 62.76%. The study successfully developed second-order regression equations with high reliability ($R^2 > 96\%$). The optimal parameter set was determined as $v_c = 130$ m/min, $f_z = 0.12$ mm/rev, and $a_p = 1.0$ mm, enabling the achievement of a surface quality comparable to fine grinding ($R_a = 0.642$ μ m) while still ensuring safe machine loading.

Keywords: hard turning, SKD11 steel, Taguchi Optimization, surface roughness, spindle load

@ Vietnam Mining Science and Technology Association