

# Nghiên cứu thực nghiệm lực cắt khi phay thép SKD11 được hỗ trợ gia nhiệt bằng cảm ứng từ

Experimental Study on Cutting Force in Thermal – Assisted Machining by Induction Heating for SKD11 steel

**Mạc Thị Bích<sup>1,2</sup>, Phạm Thị Hoa<sup>2</sup>, Bàn Tiến Long<sup>1</sup>, Nguyễn Đức Toàn<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> Trường Đại học Bách khoa Hà Nội – Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

<sup>2</sup> Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Hưng Yên - Dân Tiến, Khoái Châu, Hưng Yên, Việt Nam

Đến Tòa soạn: 17-11-2017; chấp nhận đăng: 28-9-2018

## Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu về lực cắt khi phay thép SKD11 có sự hỗ trợ của nhiệt độ cao. Quá trình gia nhiệt được thực hiện bằng phương pháp nung nhiệt cảm ứng từ. Trong nghiên cứu này, các thí nghiệm ban đầu được tiến hành tại điều kiện nhiệt độ phòng. Các thực nghiệm tại nhiệt độ cao khác nhau sau đó được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng tác động của việc gia nhiệt bằng cảm ứng từ với phương pháp gia công truyền thống. Thuật toán mảng trực giao Taguchi và phân tích phương sai ANOVA được thực hiện để thiết kế thực nghiệm và đánh giá thứ tự ảnh hưởng của các tham số chế độ cắt và nhiệt độ đến lực cắt khi phay thép SKD11. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, lực cắt giảm mạnh khi phay thép SKD11 có hỗ trợ gia nhiệt bằng cảm ứng từ. Bộ tham số tối ưu thu được khi phay thép SKD11 có gia nhiệt là: Vận tốc cắt ( $V_c$ ) = 280 (m/phút), lượng tiến dao ( $f$ ) = 230 (mm/phút), chiều sâu cắt ( $t$ ) = 0.5 (mm) và nhiệt độ ( $T$ ) = 400°C. Mô hình lực cắt khi phay thép SKD11 có gia nhiệt cuối cùng được xây dựng và so sánh với thực nghiệm cho kết quả tương đồng.

Từ khóa: Gia công gia nhiệt, nung nhiệt cảm ứng, phương pháp Taguchi, ANOVA, thép dụng cụ SKD11

## Abstract

This paper investigated the cutting force in thermal - assisted machining (TAM) by induction heating using SKD11 material. Experiments were first performed at room temperature. Experiments were then performed at elevated temperatures to evaluate effect of heating process and compare with conventional machining method. An orthogonal array -Taguchi method and analysis of variance ANOVA method were used to design experiment, evaluate influence of control parameters on the cutting force. Results of study showed the cutting force reduced deeply by machining assisted by heating. Optimum values for (TAM) of SKD11 steel were obtained by cutting speed of 280 m/min, feed rate of 230 mm/min, cutting depth of 0.5 mm and temperature of 400°C. Finally, cutting force model at elevated temperatures which was established agreed well with experimental results.

Keywords: Thermal – assisted machining, induction heating, Taguchi method, ANOVA, SKD11 steel

## 1. Giới thiệu

Để đánh giá giải pháp công nghệ mới trước khi ứng dụng vào thực tế sản xuất, việc nghiên cứu lực cắt là rất quan trọng. Lực cắt không chỉ ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt chi tiết gia công: độ nhám, độ sóng bề mặt mà lực cắt còn ảnh hưởng tới cả hệ thống công nghệ: máy, dao, đồ gá [1].

Ngày nay, các vật liệu tiên tiến có độ cứng cao, khả năng chống mài mòn tốt, cơ tính ít thay đổi khi làm việc ở nhiệt độ cao đang phát triển không ngừng. Gia công có hỗ trợ gia nhiệt là một trong những giải pháp công nghệ mới, hỗ trợ cho quá trình cắt để tăng năng suất gia công, nâng cao chất lượng bề mặt chi

tiết và giảm giá thành sản phẩm. Trong quá trình gia công gia nhiệt, kim loại được mềm hóa, độ cứng giảm mạnh [2]. Vì vậy, quá trình cắt gọt được thực hiện dễ dàng hơn so với phương pháp gia công thông thường.

Ngành công nghiệp sản xuất đã được phát triển với những công nghệ gia nhiệt khác nhau như làm nóng bằng dòng điện, hồ quang, cảm ứng từ, chùm laser, chùm electron và tia plasma... Trong gia công gia nhiệt, phôi được làm nóng trước bằng nguồn năng lượng bên ngoài đến nhiệt độ mềm hóa vật liệu và ngay sau đó gia công bằng phương pháp thông thường. Tuy nhiên, mỗi phương pháp gia nhiệt có ưu - nhược điểm khác nhau và phù hợp cho một số phương pháp gia công nhất định. Trong đó, gia nhiệt bằng cảm ứng từ là một phương pháp gia nhiệt rất hiệu quả, chi phí thấp và là sự lựa chọn tốt trong trường hợp phay đứng đối với những kim loại và hợp

\* Địa chỉ liên hệ: Tel.: (+84) 988.693.047

Email: toan.nguyenduc@hust.edu.vn

kim có từ tính [3]. Quá trình nung nhiệt cao tần của thép (40 – 200kHz) và sự phân bố nhiệt độ trong suốt quá trình nung nhiệt đã được nghiên cứu bằng phương pháp phần tử hữu hạn và so sánh với thực nghiệm cho kết quả tốt [4].

Ginta và đồng nghiệp [5] đã trình bày những lợi ích của quá trình gia công có hỗ trợ nhiệt đến tính gia công vật liệu khi phay mặt đầu chi tiết được làm bằng hợp kim Titan Ti-6Al-V4 sử dụng hệ thống gia nhiệt bằng cảm ứng điện từ. Nghiên cứu kết luận rằng việc gia nhiệt trực tiếp lên phôi trước khi gia công có ảnh hưởng đến lực cắt, rung động quá trình cắt, tuổi thọ dụng cụ và tốc độ bóc tách vật liệu. Lực cắt giảm mạnh khi gia công trong điều kiện có gia nhiệt kéo theo sự giảm áp lực tác dụng lên dụng cụ cắt do đó tăng tuổi bền và tuổi thọ dụng cụ đồng thời giảm rung động trong quá trình cắt.

Thép SKD11 thường được gia công bằng các phương pháp tiên tiến như mài bằng hạt mài kim cương hoặc gia công phóng điện. Tuy nhiên các phương pháp này bị hạn chế do tốc độ loại bỏ vật liệu thấp, dụng cụ đắt tiền, độ mòn dụng cụ nhanh v.v. Gần đây các nghiên cứu về lực cắt, nhám bề mặt và lượng mòn dao đã được tiến hành [6] nhằm phân tích ảnh hưởng của việc hỗ trợ gia nhiệt cục bộ bằng laser. Nghiên cứu đã kết luận rằng lực cắt giảm 40% và độ nhám được cải thiện tới 50% và dao ít mòn hơn khi so với gia công thông thường không có hỗ trợ của gia nhiệt. Tuy vậy, trong nước hầu như chưa có nghiên cứu nào về gia công cắt gọt có hỗ trợ gia nhiệt bằng cảm ứng từ.

Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số chế độ cắt đến lực cắt khi phay thép SKD11 có sự hỗ trợ gia nhiệt bằng cảm ứng từ. Thực nghiệm gia công tại nhiệt độ phòng và điều kiện có gia nhiệt lần lượt được thực hiện. Sau đó, chế độ cắt tối ưu và nhiệt độ tối ưu được tìm thấy để đạt lực cắt nhỏ nhất dựa vào phương pháp Taguchi. Mối quan hệ giữa lực cắt phụ thuộc các tham số chế độ cắt  $V_c$ ,  $f$ ,  $t$  tại nhiệt độ cao được xây dựng dựa vào công cụ Nonlinear – Regressstion của phần mềm Minitab 17. Kết quả nghiên cứu đã được so sánh với dữ liệu thực nghiệm cho kết quả tương thích cao.

**2. Điều kiện thí nghiệm**

**2.1. Vật liệu thí nghiệm**

**Bảng 1.** Thành phần hóa học của thép hợp kim SKD11 [7]

C	Cr	Mo	Si	Mn	Ni	V
1,4 - 1,6	11 - 13	0,7 - 1,2	≤ 0,6	≤ 0,6	-	0,15 - 0,3

Nghiên cứu thực nghiệm với phôi thép được làm từ thép dụng cụ SKD11. Bảng 1 và Bảng 2 theo thứ tự là thành phần hóa học và đặc tính vật lý của thép

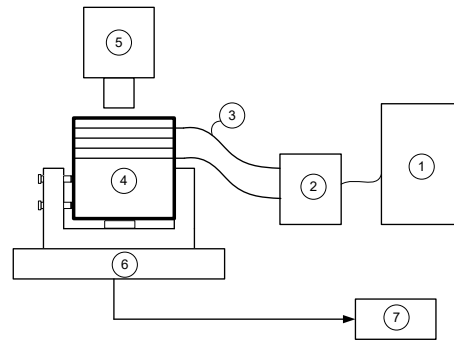
SKD11. Đây là loại thép được sử dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp sản xuất khuôn mẫu trên thế giới cũng như tại Việt Nam.

**Bảng 2.** Đặc tính vật lý thép hợp kim SKD11

Đặc tính vật lý	Giá trị	Đặc tính vật lý	Giá trị
Khối lượng riêng (kg/m <sup>3</sup> )	8400	Hệ số giãn nở nhiệt (10-6/k)	11
Hệ số Poisson	0,3	Nhiệt dung riêng (J/kg°C)	461
Nhiệt độ nóng chảy (°C)	1733	Độ dẫn nhiệt (w/m.K)	20,5

**2.2. Thiết kế thực nghiệm**

Thí nghiệm được thực hiện trên máy phay MC500 của Đài Loan. Tốc độ quay trục chính 100 – 30000 vòng/phút, công suất trục chính 15 kW, tốc độ dịch chuyển của bàn máy khi gia công 30000 mm/phút, tốc độ chạy không lớn nhất: 48000 mm/phút, hành trình dịch chuyển bàn máy X x Y x Z = 500 x 400 x 300 mm. Không sử dụng dung dịch làm mát trong suốt quá trình gia công.



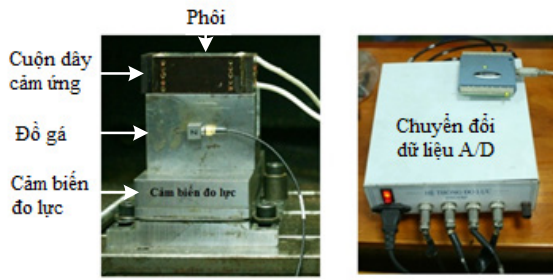
**Hình 1.** Sơ đồ thí nghiệm phay thép SKD11 có hỗ trợ gia nhiệt bằng cảm ứng từ

- 1. Nguồn điện cảm ứng từ
- 2. Thiết bị tạo tần số
- 3. Cuộn dây cảm ứng
- 4. Phôi thí nghiệm
- 5. Trục chính máy phay
- 6. Thiết bị đo lực
- 7. Máy tính hiển thị kết quả

Hình 1 là sơ đồ thí nghiệm phay thép SKD11 có hỗ trợ gia nhiệt bằng cảm ứng từ. Máy phay MC500 với trục chính (5). Bộ phận nung nhiệt gồm nguồn điện cảm ứng từ (1), thiết bị tạo tần số (2) và dây cảm ứng (3). Phôi thí nghiệm (4) có kích thước 70 mm x 31 mm x 80 mm được đặt trên thiết bị đo lực (6) thông qua đồ gá. Thiết bị đo lực được kết nối với máy tính (7) thông qua thiết bị chuyển đổi tín hiệu A/D (Hình 2).

Thí nghiệm sử dụng thiết bị đo lực cắt ba thành phần của hãng Kistler – Thụy Sĩ. Thiết bị này sử dụng cảm biến đo lực 9257B – Kistler với dải đo lực:  $F_x = 1500$  N,  $F_y = 1500$  N,  $F_z = 5000$  N. Độ nhạy của cảm biến theo phương X, Y: 7,39 pC/N, theo phương Z: 3,72

pC/N. Sử dụng phần mềm DASylab 10.0 để chuyển đổi tín hiệu A/D và thu thập kết quả đo về máy tính.



**Hình 2.** Cảm biến đo lực và thiết bị chuyển đổi tín hiệu A/D

Thí nghiệm với dao phay mặt đầu có đường kính  $\phi = 40$  mm sử dụng mảnh hợp kim cứng của hãng PRAMET, Cộng Hòa Séc. Ký hiệu APKT 1604PDR – GM. Trong nghiên cứu này, dụng cụ cắt và phôi không sử dụng dung dịch làm mát khi gia công.

**3. Tham số điều khiển và các mức độ**

Với mục tiêu thiết kế thực nghiệm và tối ưu hóa các tham số điều khiển một cách đơn giản, hiệu quả, tiết kiệm số thí nghiệm, nghiên cứu đã lựa chọn phương pháp thiết kế thực nghiệm Taguchi. Phương pháp này cho phép mỗi tham số có thể được đánh giá độc lập và các thí nghiệm ngẫu nhiên do mảng trực giao (Orthogonal array – OA). Với khả năng thu hẹp phạm vi nghiên cứu cụ thể hoặc xác định các vấn đề trong sản xuất với dữ liệu hiện có bằng cách đánh giá cao giá trị đặc trưng cho hiệu suất trung bình gần với giá trị mục tiêu hơn là giá trị nằm trong giới hạn đặc tính kỹ thuật nhất định đã làm cho phương pháp Taguchi trở thành một lựa chọn phổ biến nhằm cải tiến chất lượng sản phẩm [8].

Nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của các tham số chế độ cắt tối lực cắt là tốc độ cắt ( $V_c$ ), tốc độ chạy dao ( $f$ ), chiều sâu cắt ( $t$ ) và tham số nhiệt độ hỗ trợ nung phôi trong quá trình gia công ( $T$ ). Việc đo lường sự tương tác giữa các tham số thông qua tỷ số nhiễu S/N (phương trình (1)). Tỷ số S/N được xây dựng cho 3 mục tiêu sau đây: lớn hơn tốt hơn, nhỏ hơn tốt hơn, bình thường tốt hơn. Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số điều khiển nói trên đến lực cắt nên mục tiêu nhỏ hơn tốt hơn được chọn. Tỷ số S/N với mục tiêu thấp hơn tốt hơn được biểu diễn theo hàm toán học như sau [8]:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \right] \quad (1)$$

Trong đó:  $\sum_{i=1}^n y_i^2$  là tổng bình phương tất cả kết quả của mỗi thí nghiệm.  $n$  là số lần đo của mỗi thí nghiệm.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của phương pháp gia công gia nhiệt bằng cảm ứng từ được đề xuất trong nghiên cứu này so với phương pháp gia công thông thường, các thực nghiệm tại nhiệt độ phòng với các tham số chế độ cắt ( $V_c, f, t$ ) được thực hiện trước. Sau đó, biến nhiệt độ  $T$  được bổ sung vào các thí nghiệm tại nhiệt độ cao khác nhau theo bảng trực giao Taguchi để đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ đến lực cắt. Bảng 3 là bộ tham số chế độ cắt và nhiệt độ gia nhiệt cho phôi với vùng nghiên cứu của tốc độ cắt, tốc độ chạy dao, chiều sâu cắt và nhiệt độ tương ứng theo thứ tự là ( $V_c$ : 190 – 280 m/ph), ( $f$ : 230 – 380 mm/ph), ( $t$ : 0,5 – 1,5 mm), ( $T$ : 200 – 400°C). Thực nghiệm được thiết kế theo phương pháp mảng trực giao Taguchi L9 (Bảng 4) với kết quả lực cắt tương ứng tại nhiệt độ phòng ( $F_R$ ), tại nhiệt độ cao ( $F_T$ ). Độ giảm lực cắt  $\Delta F$  được tính theo công thức (2):

$$\Delta F(\%) = \frac{F_R - F_T}{F_R} \cdot 100\% \quad (2)$$

**Bảng 3.** Tham số điều khiển và cấp độ thí nghiệm

STT	Tham số điều khiển	Đơn vị	Mức độ 1	Mức độ 2	Mức độ 3
1	$V_c$ (A)	m/ph	190	235	280
2	$f$ (B)	mm/ph	230	305	380
3	$t$ (C)	mm	0,5	1,0	1,5
4	$T$ (D)	°C	200	300	400

**Bảng 4.** Thí nghiệm sử dụng mảng trực giao L9 tại nhiệt độ phòng, khi có sự hỗ trợ của nhiệt độ cao và kết quả lực cắt tương ứng  $F_R, F_T$

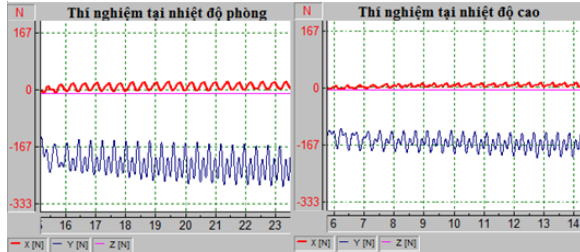
STT	$V_c$	$f$	$t$	$T$	$F_R$ (N)	$F_T$ (N)	$\Delta F$ (%)			
Thí nghiệm tại nhiệt độ phòng										
Thí nghiệm tại nhiệt độ cao										
1	1	1	1	1				135,98	62,205	54,3
2	1	2	2	2				298,69	129,917	56,5
3	1	3	3	3				434,06	155,140	64,3
4	2	1	2	3				213,65	90,248	57,8
5	2	2	3	1				360,17	224,962	37,5
6	2	3	1	2				160,46	74,014	53,9
7	3	1	3	2				262,67	112,068	57,3
8	3	2	1	3	118,77	39,256	66,9			
9	3	3	2	1	239,34	134,258	43,9			

**4. Kết quả và thảo luận**

**4.1. Ảnh hưởng của quá trình gia nhiệt đến lực cắt khi phay thép SKD11**

Giá trị lực cắt khi thực nghiệm gia công tại nhiệt độ phòng và điều kiện có gia nhiệt được thực hiện 3 lần ứng với mỗi chế độ gia công. Kết quả lực cắt trung bình tương ứng được cho trong Bảng 4. Kết quả cho thấy, lực cắt giảm mạnh khi gia công có sự hỗ trợ của nhiệt độ. Độ giảm lực cắt cao nhất là 66.9% tại thí nghiệm số

8 với nhiệt độ hỗ trợ quá trình gia công là 400°C. Độ giảm lực cắt thấp nhất là 37.5% tại thí nghiệm số 5 với nhiệt độ hỗ trợ quá trình gia công là 200°C. Nguyên nhân là do dưới tác dụng của nhiệt độ cao thì cơ tính của vật liệu giảm, vật liệu dễ biến dạng hơn dẫn đến lực tác dụng cần thiết để tách phoi ra khỏi bề mặt gia công cũng giảm đáng kể. Hình 3 là đồ thị lực cắt khi gia công tại nhiệt độ phòng và nhiệt độ cao T = 200°C với cùng chế độ cắt Vc = 280 m/p, f = 380 mm/p, t = 1 mm.



**Hình 3.** Đồ thị lực cắt với chế độ cắt Vc = 280 m/ph, f = 380 mm/ph, t = 1 mm khi thí nghiệm tại nhiệt độ phòng và tại nhiệt độ cao 200°C.

**4.2. Tối ưu hóa lực cắt khi phay thép SKD11 có sự hỗ trợ của nhiệt độ cao**

Để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các tham số điều khiển đến lực cắt khi gia công thép SKD11 có sự hỗ trợ của nhiệt độ cao và xác định bộ tham số tối ưu, tỷ số S/N được tính toán theo công thức (1). Bảng 5 trình bày tỷ số S/N từng thí nghiệm. Tổng hợp phân tích ảnh hưởng của các tham số điều khiển đến lực cắt khi phay có hỗ trợ nhiệt độ cao như Bảng 6. ΔS/Nx được tính theo công thức:

$$\Delta S/N_x = \max(S/N)_x - \min(S/N)_x \quad (3)$$

Trong đó: max(S/N)x và min(S/N)x theo thứ tự là giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của tỷ lệ S/N các mức độ của tham số điều khiển X.

**Bảng 5.** Bảng kết quả tỷ lệ S/N tại nhiệt độ cao

TN số	1	2	3	4	5
S/N	-35,88	-42,27	-43,81	-39,11	-47,04
TN số	6	7	8	9	
S/N	-37,39	-40,99	-31,89	-42,56	

**Bảng 6.** Tổng hợp phân tích mức độ ảnh hưởng của các thông số đến lực cắt khi gia công gia nhiệt

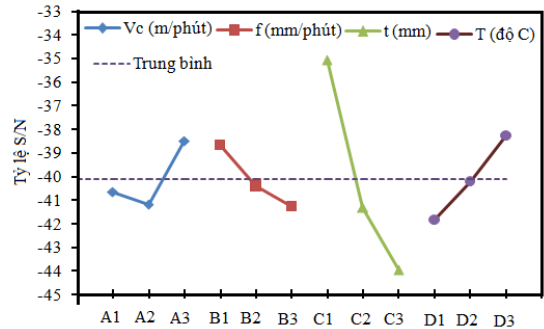
	Ý nghĩa tỷ số S/N từng mức độ			Δ S/N	Thứ tự ảnh hưởng
	1	2	3		
A	-40,65	-41,18	-38,48*	2,70	3
B	-38,66*	-40,40	-41,25	2,59	4
C	-35,05*	-41,31	-43,95	8,90	1
D	-41,83	-40,22	-38,27*	3,56	2

\* Giá trị tối ưu

Kết quả phân tích trên Bảng 6 cho thấy thứ tự ảnh

hưởng như sau: chiều sâu cắt có ảnh hưởng lớn nhất đến lực cắt, tiếp theo là nhiệt độ phôi, tốc độ cắt và tốc độ chạy dao ít ảnh hưởng nhất đến lực cắt.

Từ kết quả phân tích ý nghĩa tỷ số S/N cho từng tham số điều khiển với 3 mức, ta chọn bộ tham số điều khiển tối ưu đạt mục tiêu lực cắt nhỏ nhất là A3B1C1D3 (Hình 4). Bộ tham số điều khiển tối ưu là: Vc = 280 (m/ph), f = 230 (mm/ph), t = 0,5 (mm), T = 400°C.



**Hình 4.** Tỷ lệ S/N lực cắt khi gia công gia nhiệt

Hình 4 cho thấy quan hệ giữa nhiệt độ và tỉ số nhiễu (S/N) là đồng biến, cụ thể: lực cắt giảm khi nhiệt độ tăng và đạt giá trị nhỏ nhất tại nhiệt độ 400°C trong giới hạn của miền khảo sát.

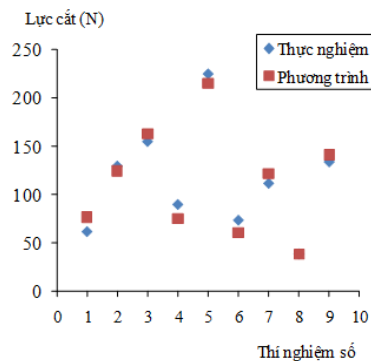
**4.3 Xây dựng mô hình toán học lực cắt phụ thuộc chế độ cắt và nhiệt độ khi gia công gia nhiệt**

Mô hình lực cắt phụ thuộc bộ tham số công nghệ (Vc, f, t) và nhiệt độ phôi tại thời điểm gia công T được miêu tả theo công thức:

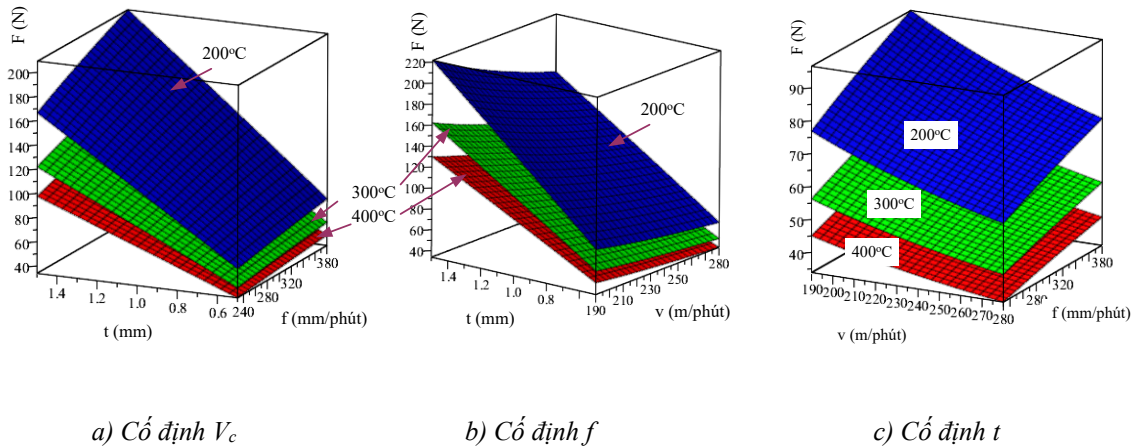
$$F_T = a \cdot V_c^b \cdot f^c \cdot t^d \cdot T^e \quad (4)$$

Trong đó: a, b, c, d, e là các hệ số được xác định từ thực nghiệm; FT là lực cắt tổng hợp được phân tích thành ba lực cắt thành phần Fxt, Fyt, Fzt theo công thức:

$$F_T = \sqrt{F_{xt}^2 + F_{yt}^2 + F_{zt}^2} \quad (5)$$



**Hình 5.** So sánh lực cắt xác định từ mô hình và thực nghiệm



Hình 6. Mối quan hệ giữa F với  $V_c$ , f và t tại các nhiệt độ khác nhau

a) Cố định  $V_c$ , b) Cố định f, c) Cố định t

Để xây dựng mô hình lực cắt tại nhiệt độ cao, nghiên cứu sử dụng phương pháp tìm hàm hồi quy phi tuyến Gauss – Newton. Phương pháp này được ứng dụng trong công cụ Nonlinear Regression của phần mềm Minitab 17. Mạng trục giao L9 và kết quả lực cắt được trình bày như Bảng 4 được sử dụng là dữ liệu đầu vào của phương pháp. Với dữ liệu 9 điểm thí nghiệm tại nhiệt độ cao, hàm hồi quy phi tuyến lực cắt khi phay thép SKD11 có gia nhiệt được xác định như phương trình (6).

$$F_T = 36235,7 \cdot V_c^{-0,737867} \cdot f^{0,453832} \cdot t^{0,964106} \cdot T^{-0,770712} \quad (6)$$

Hình 5 là đồ thị đánh giá độ chính xác của mô hình lực cắt phụ thuộc vào nhiệt độ gia nhiệt (phương trình (6)) khi so sánh với dữ liệu thực nghiệm thu được. Trong đó, chấm hình vuông đỏ là kết quả lực cắt xác định từ mô hình; dữ liệu thu được từ thực nghiệm được mô tả bằng chấm hình thoi xanh. Kết quả cho thấy dữ liệu lực cắt xác định từ mô hình và thực nghiệm có độ tương đồng cao.

Từ phương trình (6), bằng công cụ của phần mềm Maple, đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa lực cắt với các tham số chế độ cắt tại các nhiệt độ khác nhau được thể hiện như Hình 6.

Hình 6 cho thấy, nhiệt độ phôi càng tăng thì lực cắt càng giảm. Tuy nhiên, độ giảm lực cắt giảm dần khi nhiệt độ phôi tăng lên theo thứ tự tương ứng từ nhiệt độ phòng đến 200°C, 300°C và 400°C. Hình 6.a và 6.b theo thứ tự là đồ thị lực cắt khi cố định vận tốc cắt ( $V_c$ ) và lượng tiến dao (f) cho thấy, độ dốc của đồ thị lực cắt lớn nhất khi thay đổi chiều sâu cắt hay nói cách khác chiều sâu cắt có ảnh hưởng lớn nhất đến lực cắt. Hình 6.c là đồ thị lực cắt khi cố định chiều sâu cắt (t) cho

thấy độ dốc của đồ thị lực cắt khi thay đổi vận tốc cắt ( $V_c$ ) lớn hơn khi thay đổi lượng tiến dao (f). Điều đó có nghĩa là mức độ ảnh của vận tốc cắt ( $V_c$ ) đến lực cắt (F) lớn hơn ảnh hưởng của lượng tiến dao (f) đến lực cắt (F).

## 5. Kết luận

Mô hình lực cắt khi phay thép SKD11 có sự hỗ trợ gia nhiệt bằng cảm ứng từ đã được xây dựng trong nghiên cứu này. Kết quả mô hình đã được kiểm chứng thông qua việc so sánh với dữ liệu thực nghiệm. Nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện tại nhiệt độ phòng và nhiệt độ cao với cùng bộ tham số công nghệ chế độ cắt cho thấy lực cắt giảm mạnh khi gia công tại nhiệt độ cao. Bộ thông số hợp lý nhất với mục tiêu lực cắt nhỏ nhất được xác định tương ứng là: vận tốc cắt ( $V_c$ ) = 280 (m/phút), lượng tiến dao (f) = 230 (mm/phút), chiều sâu cắt (t) = 0,5 (mm) và nhiệt độ nung (T) = 400°C.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số “107.02-2016.01”.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Bành Tiến Long (chủ biên), Nguyên lý gia công vật liệu, Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật, 2013.
- [2] C. Brecher, M. Emonts, C. Rosen, and J. Hermani, “Laser-assisted Milling of Advanced Materials,” vol. 12, pp. 599–606, 2011.
- [3] A. K. M. Nurul Amin and T. L. Ginta, Heat-Assisted Machining, vol. 11. Elsevier, 2014.
- [4] K. Sadeghipour, J. A. Dopkin, and K. Li, “A computer aided finite element/experimental analysis

- of induction heating process of steel,” *Comput. Ind.*, vol. 28, no. 3, pp. 195–205, 1996.
- [5] T. L. Ginta and A. K. M. N. Amin, “Thermally-assisted end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using induction heating,” *Int. J. Mach. Mach. Mater.*, vol. 14, no. 2, pp. 194–212, 2013.
- [6] M. Baili, V. Wagner, G. Dessein, J. Sallaberry, and D. Lallement, “An experimental investigation of hot machining with induction to improve Ti-5553 machinability,” vol. 62, pp. 67–76, 2011.
- [7] [C. Wang, Y. Xie, L. Zheng, Z. Qin, D. Tang, Y. Song, “Research on the Chip Formation Mechanism during the high-speed milling of hardened steel,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 79, pp. 31–48, 2014.
- [8] S. Du, M. Chen, L. Xie, Z. Zhu, X. Wang, “Optimization of process parameters in the high-speed milling of titanium alloy TB17 for surface integrity by the Taguchi-Grey relational analysis method,” vol. 8, no. 10, pp. 1–12, 2016.