

Nghiên cứu thực nghiệm để đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến chiều sâu thấm nhiệt phi thép 9XC qua tôi sau khi gia nhiệt bằng laser

Experimental Study to Verify the Effect of Parameters on the Depth of Osmotic Heating with 9XC Hardened Steel after Laser Assisted

Nguyễn Thành Huân^{1,2}, Trần Xuân Thái², Nguyễn Đức Toàn²

¹ Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật công nghiệp, Số 353, Trần Hưng Đạo, Nam Định

² HT trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

Đến Tòa soạn: 23-5-2017; chấp nhận đăng: 29-3-2018

Abstract

Laser assisted turning (LAT) is using a laser beam to preheat the workpiece before turning [1]. In order to verify the influences of parameters on the depth of osmotic heating after laser heating 9XC hardened alloy steel (62 HRC hardness), various parameters such as: laser power, distance of laser tip to the workpiece, laser position, cutting speed and feed rate had been selected using Taguchi experimental method. The results shows that the laser power is strongly affect to the depth of osmotic heating of 91,27 % comparing with the others of laser source's parameters. Besides that the effect of cutting parameters on depth of osmotic heating was 95,69 % of cutting speed and 4,31 % of feed rate, respectively. From experimental results, a formula for the surface layer as a function of laser power and cutting speed had also been constructed. Results confirmed that permeability characteristic shows a minor change with increasing of cutting speed, whereas laser power demonstrates a significant effect on permeability characteristic.

Keywords: 9XC hardened alloy steel, laser power, cutting speed, feed rate, Taguchi.

Tóm tắt

Tiện có gia nhiệt bằng laser là việc sử dụng chùm tia laser để nung nóng trước bề mặt phi khi tiện [1]. Để kiểm tra ảnh hưởng của các tham số đến chiều sâu thấm nhiệt chi tiết sau khi gia nhiệt bằng laser thép hợp kim 9XC qua tôi (độ cứng 62 HRC), các tham số như: công suất laser, khoảng cách đầu laser đến bề mặt phi, vị trí điểm đặt laser, vận tốc cắt và lượng tiến dao đã được lựa chọn theo phương pháp thực nghiệm Taguchi. Kết quả chỉ ra rằng công suất laser có ảnh hưởng lớn đến chiều sâu thấm nhiệt là 91,27 % khi so sánh với các tham số còn lại của nguồn laser. Bên cạnh đó ảnh hưởng của các tham số chế độ cắt đến đặc chiều sâu thấm nhiệt là 95,69 % đối với vận tốc cắt và 4,31 % với lượng tiến dao. Từ kết quả nghiên cứu thực nghiệm, nghiên cứu cũng đã tiến hành xây dựng phương trình hồi quy lớp bề mặt là hàm của công suất laser và tốc độ cắt. Kết quả xác nhận rằng ảnh hưởng của vận tốc cắt là không đáng kể so với ảnh hưởng của công suất nguồn laser.

Từ khóa: Thép hợp kim qua tôi 9XC, công suất laser, tốc độ cắt, lượng tiến dao, Taguchi.

1. Giới thiệu

Trong gia công cắt gọt có nhiều chi tiết được làm từ các vật liệu khó gia công như thép hợp kim, thép chịu nhiệt, thép đã qua tôi, thép không gỉ v.v. [4]. Hiện nay, việc gia công chế tạo chi tiết làm bằng những vật liệu này có một số phương pháp như: gia công bằng tia lửa điện, gia công điện hóa, gia công bằng siêu âm, gia công bằng mài, gia công cao tốc, v.v. [3]. Tuy nhiên, các phương pháp gia công này gặp nhiều khó khăn như: năng suất gia công thấp, chi phí đắt, dụng cụ cắt phải làm từ vật liệu có độ cứng cao (kim cương, CBN), dụng cụ cắt bị mài mòn nhiều, giá thành sản phẩm cao.

Do đó, việc nghiên cứu phương pháp gia công nhằm đảm bảo chất lượng bề mặt, mang lại hiệu quả kinh tế cao đã và đang được các nhà khoa học nghiên cứu. Các giải pháp gia công được đề xuất bao gồm: chế tạo dụng cụ cắt mới, phương pháp gia công mới, chế tạo thiết bị cắt gọt mới, nghiên cứu nguyên lý gia công mới.

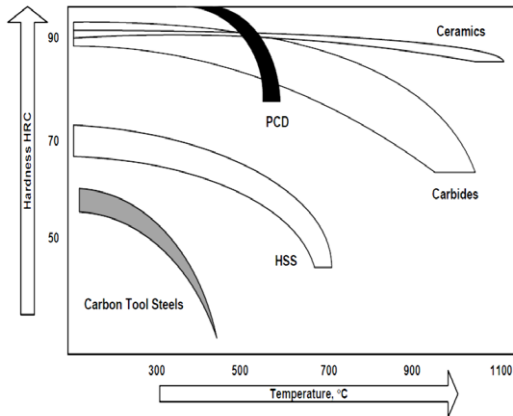
Hầu hết các vật liệu trong công nghiệp cắt gọt đều có đặc điểm là độ bền, độ cứng sẽ bị giảm đi khi được gia nhiệt đến các giá trị nhất định [5] (hình 1).

Nghiên cứu này sử dụng chùm tia laser để nung nóng phi trong quá trình tiện. Các công bố trước đã cho kết quả khi chùm laser chiếu lên bề mặt phi đã qua tôi, đạt độ cứng 62 HRC với điều kiện chưa thực hiện quá trình cắt gọt, sau khi phi nguội đem đi kiểm tra tổ chức tế vi ta thấy xuất hiện lớp bề mặt có chiều

* Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 988693047

Email: toan.nguyenduc@hust.edu.vn

sâu thay đổi và độ cứng tế vi thay đổi so với tổ chức, độ cứng ban đầu (gọi là chiều sâu thấm nhiệt); giá trị thay đổi này phụ thuộc vào các thông số công nghệ.

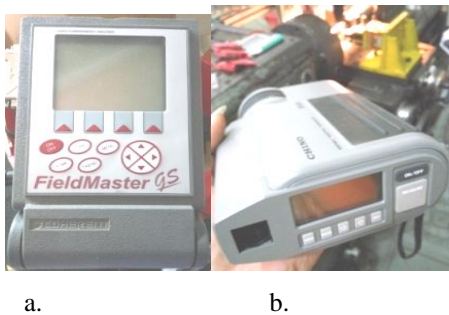


Hình 1. Độ cứng vật liệu phụ thuộc vào nhiệt độ [5]

Các chi tiết nhận được sau khi tiện có sự gia nhiệt của laser cũng đã được kiểm tra tổ chức tế vi; kết quả khảo sát chỉ ra rằng để nhận được tính chất của chi tiết thông qua độ cứng tế vi không thay đổi sau khi gia nhiệt cần chọn các thông số công nghệ hợp lý. Vậy các thông số công nghệ đó ảnh hưởng đến chiều sâu lớp bề mặt theo quy luật nào? Các thông số đó được điều khiển như thế nào để nhận được chiều sâu thấm nhiệt theo yêu cầu nhằm đảm bảo chọn chiều sâu cắt sau khi tiện tính chất vật liệu chi tiết không thay đổi? Nghiên cứu này nhằm giải quyết các vấn đề đặt ra phía trên bằng phương pháp thực nghiệm Taguchi, qua đó đánh giá các thông số công nghệ ảnh hưởng đến chiều sâu lớp bề mặt và từ đó sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm để xây dựng hàm hồi quy toán học mô tả ảnh hưởng của việc gia nhiệt bằng laser đến chiều sâu thấm nhiệt thép hợp kim qua tôi.

2. Hệ thống thí nghiệm

2.1. Trang thiết bị, vật liệu thí nghiệm



Hình 2. Thiết bị đo a) công suất laser và b) nhiệt độ

Hệ thống thí nghiệm gồm có: máy tiện vạn năng T6M16; hệ thống máy phát laser rắn Nd:YAG công suất 350W với phân bố năng lượng của chùm tia laser

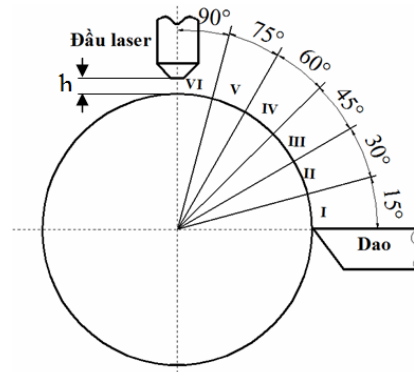
có dạng Top-hat, chế độ phát xung có bước sóng 1,064μm và hệ thống làm mát; máy đo công suất laser FieldMaster của hãng Coherent (Mỹ); máy đo nhiệt IR-AHS của công ty SINO.

Phôi tiện là vật liệu thép hợp kim 9XC, được gia công tiện thô đạt đường kính $\phi_{32}^{+0.4}$, sau đó đem nhiệt luyện đạt độ cứng 62HRC. Hệ số hấp thụ của vật liệu thép 9XC với nguồn laser có bước sóng 1,064μm này là từ 31 đến 78% (phụ thuộc vào nhiệt độ của phôi) [8].

2.2. Xác định thông số công nghệ cần nghiên cứu

Để xác định ảnh hưởng của các thông số khi gia nhiệt bằng laser đến chiều sâu thấm nhiệt, ta tiến hành xác định ảnh hưởng của thông số laser như: công suất laser P(W), khoảng cách từ đầu laser đến bề mặt phôi h(mm), vị trí điểm đặt laser $\omega(^{\circ})$ (hình 3), và ảnh hưởng của thông số chế độ cắt như: tốc độ cắt (m/ph), lượng chạy dao (mm/vg).

Trong đó, điểm đặt laser (ω) là góc tạo bởi giữa đầu laser và vị trí điểm đặt mũi dao tiện. Sự phân bố năng lượng chùm tia laser này có dạng top-hat.



Hình 3. Các vị trí đặt điểm laser trên phôi

Trên cơ sở tính toán, chọn chế độ cắt gọt theo lý thuyết [3], kết hợp với điều kiện làm việc của dao và điều kiện trang thiết bị của thí nghiệm; các thông số thực nghiệm được chọn với 3 mức như sau:

Bảng 1. Các thông số laser ảnh hưởng đến chiều sâu thấm nhiệt

Thông số	Các mức		
	Mức 1	Mức 2	Mức 3
Công suất(W)	270	300	330
Khoảng cách đầu laser tới bề mặt phôi(mm)	15	20	25
Điểm đặt laser ($^{\circ}$)	70	80	90

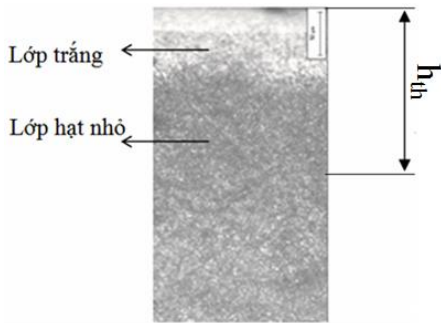
Bảng 2. Các thông số chế độ cắt ảnh hưởng đến chiều sâu thấm nhiệt

Thông số	Các mức		
	Mức 1	Mức 2	Mức 3
Tốc độ cắt (m/ph)	25	62,5	100
Lượng chạy dao (mm/vg)	0,06	0,12	0,18

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Chiều sâu thấm nhiệt

Các chi tiết thí nghiệm sau gia nhiệt được kiểm tra cấu trúc lớp bề mặt thông qua cắt, mài, đánh bóng, tẩm thực dung dịch 3%HNO₃ (hình 4). Cấu trúc chiều sâu thấm nhiệt (h_{th}) điển hình bao gồm: lớp trắng (do ảnh hưởng của quá nhiệt) và lớp có độ hạt nhỏ hơn so với độ hạt của vật liệu ban đầu.



Hình 4. Cấu trúc lớp bề mặt phôi sau gia nhiệt bằng laser

3.2. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số laser đến chiều sâu thấm nhiệt

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã tiến hành khảo sát các thông số của laser:

Công suất laser (P) phụ thuộc vào cường độ, độ rộng xung và tần số của laser. Công suất thiết bị laser dùng để làm thí nghiệm có thể điều chỉnh được với công suất tối đa là 350W và phát ở chế độ xung. Chùm tia laser phát ra từ buồng cộng hưởng là chùm tia song song. Chùm tia này được định hướng đi qua thấu kính hội tụ và hướng chùm hội tụ vào bề mặt

phôi. Mật độ công suất của chùm laser hội tụ phụ thuộc vào tiết diện của chùm tia khi đó tiết diện chùm tia laser trên bề mặt phôi phụ thuộc vào khoảng cách từ đầu laser đến bề mặt phôi (h). Trước khi làm các thí nghiệm này nghiên cứu đã tiến hành khảo sát các thông số để đưa ra các nhận định sơ bộ: trong khi gia công sẽ có hiện tượng bắn toé các phôi có nhiệt độ cao khi đầu laser tiến lại gần phôi ở khoảng cách ($h < 15mm$). Các phôi có nhiệt độ cao này sẽ bắn vào đầu laser nên cần được hạn chế khoảng cách tối thiểu; Bên cạnh đó, nếu để đầu laser cách xa bề mặt phôi lớn với khoảng cách ($h > 25mm$), nhiệt độ bề mặt phôi thấp và tính chất phân vật liệu bề mặt chi tiết gia công gần như không bị ảnh hưởng. Do đó nghiên cứu đã chọn khoảng giới hạn $15 \leq h \leq 25$ để tiến hành các thí nghiệm khảo sát.

Các thông số chế độ cắt $v = 62,5$ m/ph, $s = 0,12$ mm/vg được giữ không đổi. Từ bảng 1, với 3 thông số đầu vào thay đổi với 3 mức thí nghiệm, chọn bảng trực giao Taguchi L9 [2] như bảng 3.

Để xét ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào có điều khiển là công suất laser, khoảng cách đầu laser đến bề mặt phôi, và vị trí điểm đặt laser; sử dụng hệ số tín hiệu SN (signal to noise ratio) với trường hợp yêu cầu lớn nhất về chiều sâu thấm nhiệt như công thức (1).

$$SN_i = -10 \log \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \frac{1}{y_i^2} \quad (1)$$

Hệ số SN được tính toán cho mỗi chỉ số và cấp độ, lập bảng hệ số SN của 3 thông số 3 mức và xếp hạng theo tiêu chí lớn hơn tốt hơn như trong bảng 4. Qua đó có thể thấy rằng khoảng cách từ đầu laser đến bề mặt phôi và vị trí điểm đặt laser trên phôi ảnh hưởng rất nhỏ tương ứng là 6,12% và 2,61% so với thông số công suất laser (91,27%) đến chiều sâu thấm nhiệt. Từ kết quả phân tích cho thấy, bộ thông số laser hợp lý để đảm bảo đạt được chiều sâu thấm nhiệt lớn nhất là (P_3, h_2, ω_1) ứng với công suất laser 330W, khoảng cách từ đầu laser đến bề mặt phôi là 20mm và vị trí đặt điểm laser nằm ở góc 70°

Bảng 3. Bảng trực giao Taguchi L9 với các thông số thí nghiệm và hệ số SN_L

TN	PL (W)	h (mm)	ω (°)	Lần đo h_{th1} (mm)	Lần đo h_{th2} (mm)	Lần đo h_{th3} (mm)	h_{thTB} (mm)	SN_L
1	270	15	70	0,06	0,05	0,05	0,053	-20,74
2	270	20	80	0,07	0,06	0,07	0,067	-18,71
3	270	25	90	0,02	0,04	0,02	0,027	-26,60
4	300	15	80	0,1	0,11	0,11	0,107	-14,64
5	300	20	90	0,14	0,14	0,12	0,133	-12,75
6	300	25	70	0,12	0,13	0,11	0,12	-13,65
7	330	15	90	0,2	0,21	0,21	0,207	-8,91
8	330	20	70	0,23	0,25	0,24	0,24	-7,62
9	330	25	80	0,2	0,19	0,2	0,197	-9,34

Bảng 4. Hệ số SN của 3 thông số 3 mức và xếp hạng theo tiêu chí lớn hơn tốt hơn

Mức	P	h	ω
1	-22,0167	-14,7633	-14,0033
2	-13,6800	-13,0267	-14,2300
3	-8,6233	-16,5300	-16,0867
R^2_{tb}	274,4539	18,4101	7,8393
Phân bố	0,9127	0,0612	0,0261

3.3. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đến chiều sâu thấm nhiệt

Tiến hành thí nghiệm với bộ thông số hợp lý của nguồn laser đã được lựa chọn trước đó và giữ không thay đổi công suất laser 330W, khoảng cách từ đầu laser đến bề mặt phôi là 20mm, vị trí đặt điểm laser nằm ở góc 70°. Theo như bảng 2 với 2 thông số đầu vào là tốc độ cắt, lượng tiến dao thay đổi và 3 mức thí nghiệm lựa chọn bằng trực giao Taguchi L9 được kết quả như bảng 5.

Bảng 5. Bảng trực giao Taguchi L9 với các thông số thí nghiệm và hệ số SN_L

TN	V (m/ph)	s (mm/vg)	Lần đo h _{th1} (mm)	Lần đo h _{th2} (mm)	Lần đo h _{th3} (mm)	h _{thTB} (mm)	SN _L
1	25	0,06	0,38	0,36	0,38	0,37	-3,8648
2	25	0,12	0,37	0,36	0,35	0,36	-4,1027
3	25	0,18	0,34	0,35	0,36	0,35	-4,3474
4	62,5	0,06	0,25	0,28	0,27	0,27	-6,6015
5	62,5	0,12	0,23	0,25	0,24	0,24	-7,6245
6	62,5	0,18	0,21	0,20	0,21	0,21	-8,7844
7	100	0,06	0,19	0,20	0,20	0,20	-9,2081
8	100	0,12	0,20	0,18	0,18	0,19	-9,6537
9	100	0,18	0,17	0,19	0,18	0,18	-10,1234

Để xét ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào khi thay đổi vận tốc cắt, lượng tiến dao; với trường hợp yêu cầu lớn nhất về chiều sâu lớp bề mặt công thức (1) vẫn được sử dụng. Hệ số SN được tính toán cho mỗi chỉ số và cấp độ như trong bảng 6. Kết quả chỉ ra rằng thông số tốc độ cắt có ảnh hưởng là 95,69% và lớn hơn ảnh hưởng của của lượng tiến dao là 4,31% đến chiều sâu lớp bề mặt một cách rõ rệt. Bộ thông số chế độ cắt hợp lý để đảm bảo đạt được chiều sâu lớp bề mặt lớn nhất là (v₁, s₁) ứng với vận tốc cắt là 25 (m/ph) và lượng tiến dao 0,06 (mm/vòng).

Bảng 6. Hệ số SN của 2 thông số 3 mức và xếp hạng theo tiêu chí lớn hơn tốt hơn

Mức	v	s
1	-4,105	-6,558
2	-7,670	-7,127
3	-9,662	-7,752
R^2_{tb}	47,5575	2,1400
Phân bố	0,9569	0,0431

3.4. Xây dựng mô hình toán học chiều sâu thấm nhiệt khi tiện có gia nhiệt bằng laser thép 9XC

Theo kết quả đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số ở trên (bảng 4 và bảng 6), các thông số ảnh hưởng chính đến chiều sâu thấm nhiệt là công suất laser và tốc độ cắt. Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao [6] để xây dựng mô hình toán học mô tả mối quan hệ giữa chiều sâu thấm nhiệt với các tham số ảnh hưởng chính.

Số thí nghiệm cần thực hiện $N = 2^2 = 4$; các chỉ tiết thí nghiệm sau gia nhiệt được cắt, mài, đánh bóng, tẩy thực dung dịch 3% HNO₃. Cấu trúc lớp bề mặt quan sát trên kính hiển vi, kết quả chiều sâu thấm nhiệt cho trong bảng 8.

Bảng 7. Điều kiện quy hoạch thực nghiệm

Đặc tính	P (w)	V (vg/ph)
Giá trị cơ sở	300	62,5
Khoảng biến động	30	37,5
Giá trị trên	330	100
Giá trị dưới	270	25

Bảng 8. Ma trận quy hoạch thực nghiệm

TT	X ₁	X ₂	X ₁ (w)	X ₂ (m/ph)	h _{th} (mm)
1	-	-	270	25	0,14
2	+	-	330	25	0,37
3	-	+	270	100	0,02
4	+	+	330	100	0,20

Phương trình hồi quy được viết dưới dạng công thức (2)

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (2)$$

x₁, x₂ có quan hệ với P_o, v_o, (Giá trị cơ sở tại tâm thí nghiệm) như công thức (3)

$$x_1 = \frac{P_L - P_o}{\Delta P} = \pm 1; \quad x_2 = \frac{v - v_o}{\Delta v} = \pm 1; \quad (3)$$

Căn cứ vào số liệu bảng 8 ta có tính được:

$$b_0 = 0,183; \quad b_1 = 0,103; \quad b_2 = -0,073$$

Để kiểm tra tính có nghĩa của các hệ số này, ta cần làm các thí nghiệm tại tâm.

Bảng 9. Kế hoạch thực nghiệm tại tâm

TT	P	V	h _{th}
TN1	300	62,5	0,155
TN2	300	62,5	0,160
TN3	300	62,5	0,165
h _{thTB} =			0,160

$$s_y^2 = \frac{1}{3-1} \sum_{i=1}^3 s_i^2 = 3,125 \cdot 10^{-6}$$

$$s_b = \sqrt{\frac{s_y^2}{N}} = \sqrt{\frac{3,125 \cdot 10^{-6}}{4}} = 8,84 \cdot 10^{-4}$$

Theo phụ lục 15 [6] chọn t = 9,925 khi f=m-1=2 với xác suất tin cậy p = 0,99. Như vậy:

$$S_{b.t} = 8,84 \cdot 10^{-4} \cdot 9,925 = 87 \cdot 10^{-4}$$

So sánh sb.t với các hệ số ta thấy:

$$|b_0| = 0,183 > S_{b.t};$$

$$|b_1| = 0,103 > S_{b.t};$$

$$|b_2| = 0,073 > S_{b.t}.$$

Các kết quả này chứng tỏ rằng các hệ số b đều có nghĩa và phương trình hồi quy có dạng:

$$y = 0,183 + 0,103x_1 - 0,073x_2$$

Để xác định xem phương trình hồi quy vừa nhận được có nghĩa hay không cần tính các giá trị của hàm \bar{y} :

$$\bar{y}_1 = 0,153; \quad \bar{y}_2 = 0,3559;$$

$$\bar{y}_3 = 0,007; \quad \bar{y}_4 = 0,213;$$

Theo công thức 11.14 [6] ta có:

$$s_{du}^2 = \frac{1}{N-K} \sum_{i=1}^8 (y_i^{tn} - y_i^{tt})^2 = 6,28 \cdot 10^{-4}$$

Chỉ tiêu Fisher Fb theo công thức 11.13 [2]:

$$F_b = \frac{s_{du}^2}{s_y^2} = \frac{6,28 \cdot 10^{-4}}{3,125 \cdot 10^{-6}} = 201$$

Mức có nghĩa 0,001, f₂ = m-1 = 3-1=2; f₁=N-1 = 4-3=1 tra bảng chuẩn số Fisher VII-4 [7]. F(2,1,p=99,9%)=998 vậy: Fb < F(2,1,p=99,9%) mô hình thống kê tương hợp với hệ thống thực.

Chuyển phương trình hồi quy với các biến mã hóa về phương trình với các biến thực, ta nhận được mô hình toán học của chiều sâu thẩm nhiệt là:

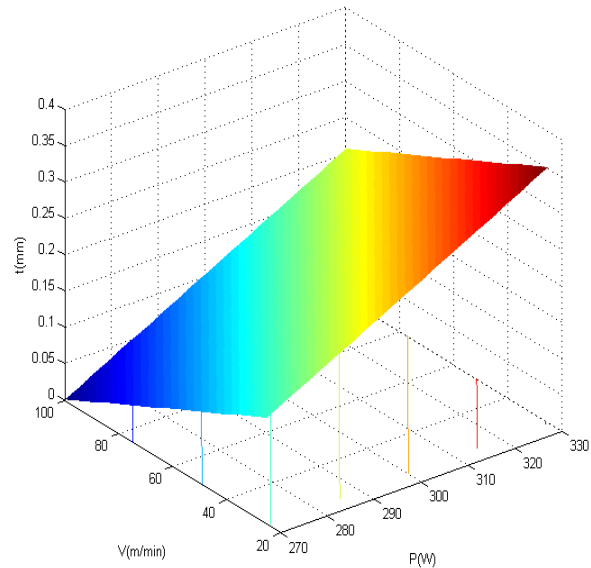
$$h_{th} = -0,725 + 0,00341P_L - 0,00195v$$

Trong đó: h_{th} là chiều sâu thẩm nhiệt (mm); P_L là công suất laser (W); v là vận tốc cắt (m/ph).

Sử dụng phần mềm MATLAB ta vẽ được đồ thị quan hệ giữa kích thước chiều sâu thẩm nhiệt phụ thuộc vào các thông số công suất laser và vận tốc cắt (hình 5).

4. Kết luận

Nghiên cứu đã sử dụng phương pháp thực nghiệm Taguchi để chọn và đánh giá các thông số ảnh hưởng đến chiều sâu thẩm nhiệt khi có gia nhiệt bằng laser. Kết quả cho thấy; các thông số khoảng cách từ đầu laser đến bề mặt phôi, vị trí điểm đặt của laser trên phôi và lượng tiến dao trong điều kiện thí nghiệm này ảnh hưởng không đáng kể đến chiều sâu thẩm nhiệt. Thông số công suất laser và vận tốc cắt có ảnh hưởng đáng kể đến chiều sâu lớp bề mặt.



Hình 5. Mặt hồi qui và đồ thị đường mức của kích thước chiều sâu thẩm nhiệt phụ thuộc thông số công suất laser và tốc độ cắt

Từ các đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số trên và áp dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao, đã xây dựng thành công mô hình toán học chiều sâu lớp bề mặt phôi. Căn cứ vào mô hình này ta thấy rằng:

- Khi tăng công suất laser, mà các thông số khác không đổi, dẫn đến mật độ công suất cao làm vật liệu gần bề mặt phôi tương tác mạnh với laser, nhiệt độ bề mặt tăng, do vật liệu phôi có tính dẫn nhiệt làm cho kích thước chiều sâu thâm nhiệt tăng.

- Tốc độ cắt tăng, tương ứng với thời gian tương tác giữa vật liệu phôi và laser giảm, làm nhiệt độ bề mặt phôi giảm, do đó kích thước chiều sâu thâm nhiệt giảm; khi giảm tốc độ cắt thì kích thước chiều sâu thâm nhiệt tăng.

Kết quả của nghiên cứu này là cơ sở để nghiên cứu, điều chỉnh chiều sâu cắt khi tiện có gia nhiệt bằng laser.

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] William M. Steen and Jyotirmoy Mazumder “Laser Material Processing” Springer London Dordrecht Heidelberg New York, (2010).
- [2] Design of Experiments (DOE) Using the Taguchi Approach, www.nutekus.com/DOE_topicOverviews35Pg.pdf
- [3] GS.TSKH. Bành Tiến Long, PGS.TS. Trần Thế Lục, PGS.TS. Trần Sỹ Túy “Nguyên lý gia công vật liệu” Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật (2001).
- [4] GS.TS. Trần Văn Địch chủ biên và các tác giả “Công nghệ chế tạo máy” Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật (2006).
- [5] Tool Materials, ASM 2005 (2007).
- [6] GS.TS. Trần Văn Địch “Các phương pháp xác định độ chính xác gia công” Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật (2011).
- [7] TS. Nguyễn Doãn Ý “Giáo trình quy hoạch thực nghiệm” Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật (20012).
- [8] C. Sainte-Catherine, M. Jeandin, D. Kechemair, J. P. Ricard and L. Sabatier “Study of Dynamic Absorptivity at 10.6 μm (CO_2) and 1.06 μm (Nd:YAG) Wavelengths as a Function of Temperature” Journal de Phique IV Colloque, 1991 01 (C7), pp.C7-151-C7-157.