

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÔNG SUẤT, VẬN TỐC CẮT VÀ ĐƯỜNG KÍNH ĐẦU CẮT ĐẾN ĐỘ NHÁM BỀ MẶT RĂNG CẮT TRÊN VẬT LIỆU SKD 11 KHI GIA CÔNG BẰNG LASER

RESEARCH THE EFFECTS OF POWER LASER, CUTTING SPEED AND NOZZLE DIAMETER TO THE SURFACE ROUGHNESS IN LASER CUTTING OF SKD11 STEEL

Hoàng Anh Tuấn, Đỗ Anh Tuấn

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 25/04/2022, chấp nhận đăng ngày 15/05/2022

Tóm tắt: Gia công laser là quá trình gia công không tiếp xúc cơ học trực tiếp giữa phôi và thiết bị cắt, khả năng bóc tách vật hiệu dựa trên hiệu ứng nhiệt nên rất thích hợp để cắt các vật liệu kỹ thuật tiên tiến khó gia công bằng các phương pháp truyền thống. Tính năng quan trọng nhất của cắt laser là khả năng tạo ra nhiệt năng tập trung cao để thực hiện gia công nhanh và chính xác, tạo ra đường cắt hẹp, chất lượng tốt và vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ. Để đánh giá ảnh hưởng của các tham số đến độ nhám bề mặt răng cắt trên SKD11, các thông số: công suất laser (P), vận tốc cắt (v) và đường kính đầu cắt (d) đã được lựa chọn theo phương pháp thực nghiệm Taguchi. Kết quả cho thấy vận tốc cắt là yếu tố ảnh hưởng chính đến độ nhám bề mặt với 45,73%, tiếp theo là công suất laser với tỷ lệ là 36,95% và đường kính đầu cắt là 15,93%. Từ dữ liệu thực nghiệm, phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao được sử dụng để xây dựng mô hình toán học của hàm độ nhám bề mặt với công suất laser, vận tốc cắt, đường kính đầu cắt. Kết quả xác nhận rằng ảnh hưởng của vận tốc cắt lớn hơn so với ảnh hưởng của công suất và đường kính đầu cắt.

Từ khóa: Cắt laser, SKD11, độ nhám bề mặt (Ra), Taguchi.

Abstract: Laser machining is a directly mechanical noncontact process between tools and workpiece; the possibility of splitting material based on the thermal effect is very suitable for advanced materials which are difficult to machine by traditional methods. The most important feature of laser cutting is the ability to generate highly concentrated thermal energy to perform high-speed machining with high precision, with a narrow cutting kerf, high-quality cuts and small heat affected zone. To evaluate the effect of cutting parameters on surface roughness on SKD11, cutting parameters including power laser (P), cutting speed (v) and nozzle diameter (d), have been selected according to the Taguchi method. The result has revealed that the main factor affected to surface roughness was cutting speed with 45,73%, laser power at a ratio of 36,95% and nozzle diameter with 15,93%. A mathematical model of surface roughness function including power laser, cutting speed and nozzle diameter is formed by the orthogonal experimental design method through the experiential statistics. The outcome has proved that the effect of cutting speed is higher than the effects of power laser and nozzle diameter.

Keywords: Laser cutting, SKD11, surface roughness (Ra), Taguchi.

1. GIỚI THIỆU

Trong các phương pháp gia công mới thì phương pháp gia công bằng các chùm tia có nguồn nhiệt tập trung đã được sử dụng phổ biến như: gia công bằng Plasma, gia công bằng chùm tia điện tử, gia công bằng tia laser. Trong đó gia công vật liệu bằng laser là một trong những công nghệ mới được ứng dụng rộng rãi trong ngành gia công cắt gọt với lợi thế về chất lượng gia công, hiệu quả kinh tế và khả năng tạo hình so với các phương pháp gia công truyền thống [4].

Thép SKD 11 được xếp vào nhóm vật liệu khó gia công vì các đặc tính vật liệu và luyện kim của nó. Với khả năng ứng dụng rộng rãi của thép SKD11 trong ngành công nghiệp ô tô, khuôn mẫu, khuôn đúc nhờ đặc tính tốt như độ bền, độ cứng cao [5]. Việc đánh giá các chế độ cắt đến chất lượng gia công đã được các nhà nghiên cứu quan tâm như gia công phay, gia công tia lửa điện... Các nghiên cứu về gia công SKD11 đã được xem xét thực hiện bằng mô phỏng và thực nghiệm. Guojun Zhang và cộng sự [6] đã đưa ra những phân tích chất lượng bề mặt phôi (Ra) và tốc độ loại bỏ vật liệu (MRR) trong quá trình gia công vật liệu SKD11 bằng gia công cắt dây tia lửa điện tốc độ trung bình (MS-WEDM). Mạc Thị Bích và cộng sự cho rằng khi gia công vật liệu SKD11 bằng phương pháp phay có trợ nhiệt TAM bằng gia nhiệt cảm ứng, lực cắt giảm tối đa 66,9% so với gia công thông thường [2]. Gia công laser là quá trình gia công không có tiếp xúc trực tiếp giữa phôi và thiết bị cắt nên rất thích hợp để cắt các vật liệu kỹ thuật tiên tiến khó gia công. Tính năng quan trọng của cắt laser là khả năng tạo ra nhiệt năng tập trung cao để thực hiện gia công nhanh và chính xác, tạo ra đường cắt hẹp, chất lượng tốt và vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ (HAZ) [7]. Tuy nhiên chất lượng cắt laser rất khó

phán đoán do tính chất nhiệt phức tạp của quá trình cắt. Vì thế để tăng năng suất cắt và chất lượng sản phẩm khi cắt laser trên vật liệu SKD11 cần sử dụng bộ tham số công nghệ gia công: Công suất laser, tốc độ cắt, đường kính đầu cắt, áp suất khí hỗ trợ, khoảng cách đầu cắt tới bề mặt phôi, vị trí điểm hội tụ... một cách hợp lý. Trong đó, mức độ ảnh hưởng của công suất và vận tốc cắt, áp suất khí hỗ trợ, đường kính đầu cắt là vấn đề cần được quan tâm.

Phương pháp gia công bằng laser có những ưu điểm so với các phương pháp gia công thông thường: Bề mặt gia công cho chất lượng tốt (bề mặt ít phải xử lý sau gia công), chiều rộng rãnh cắt nhỏ (tiết kiệm được vật liệu), ít biến dạng (do vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ) [8]; quá trình cắt không phụ thuộc vào cơ tính của vật liệu nên phương pháp gia công này có thể khoan, hàn, cắt đứt các vật liệu có độ bền cao, phi kim loại và khó gia công bằng phương pháp truyền thống [1].

Khi nghiên cứu về mối quan hệ giữa công suất laser, tốc độ cắt và nhám bề mặt trên các vật liệu carbon thấp và thép không gỉ, các nghiên cứu cho rằng độ nhám của rãnh cắt tăng khi tăng công suất và giảm khi tăng tốc độ cắt sau đó tăng nhẹ khi tiếp tục tăng tốc độ cắt. Trong các nghiên cứu này cũng đánh giá tốc độ cắt có ảnh hưởng quan trọng nhất đến độ nhám bề mặt gia công [9-12]. Khi tiến hành nghiên cứu trên thép carbon thấp KJ Muralidhara [12] bằng việc sử dụng mô hình ANN (mô hình mạng nơron nhân tạo – Artificial Neural Network) đã đánh giá ảnh hưởng của công suất laser, tốc độ cắt, áp suất khí thổi lên độ nhám bề mặt khi gia công bằng laser CO₂ và chỉ ra khi công suất laser tăng thì độ nhám bề mặt rãnh cắt tăng; khi tăng vận tốc cắt, độ nhám của bề mặt sẽ giảm, tuy nhiên nếu tăng tốc độ cắt quá lớn thì thời gian

tương tác của laser với vật liệu không đủ để cắt vật liệu dẫn đến vết cắt sẽ bị tạo xỉ ở bề mặt dưới của vết cắt, làm độ nhám bề mặt tăng lên. M.Boujelbene [13] đã nghiên cứu và tối ưu hóa ảnh hưởng của quá trình cắt bằng laser CO₂ đến độ nhám bề mặt vết cắt trên vật liệu thép carbon thấp. Trong các nghiên cứu này, các tác giả đã kết luận: Độ nhám trung bình bậc hai (R_q) giảm nhẹ khi công suất laser (P), áp suất dòng khí thổi hỗ trợ tăng lên, còn khi vận tốc cắt (v) tăng thì độ nhám giảm mạnh. Cũng bằng phương pháp thực nghiệm trên vật liệu thép EN43 dày 2 mm Lin Li và cộng sự [14] đánh giá ảnh hưởng của công suất laser, vận tốc cắt, khoảng cách hội tụ, áp suất khí thổi đến độ nhám bề mặt. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng ở vận tốc cắt tăng thì độ nhám bề mặt có xu hướng giảm. Tuy nhiên các nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của các thông số cắt đến hiệu quả và chất lượng gia công trên vật liệu SKD11 bằng laser vẫn chưa được quan tâm.

Vì vậy trong nghiên cứu này, chúng tôi sẽ tiến hành thực nghiệm để đánh giá quá trình cắt laser trên vật liệu SKD11. Nghiên cứu này sẽ tập trung đánh giá ảnh hưởng của công suất nguồn laser, tốc độ cắt, đường kính đầu cắt tới độ nhám bề mặt rãnh cắt từ đó lựa chọn bộ

tham số công nghệ tham khảo (P,v,d) phù hợp cho quá trình gia công vật liệu SKD11 trong thực tế. Nghiên cứu cũng đề xuất mô hình toán học đủ độ tin cậy, mô tả sự phụ thuộc của các tham số đầu vào và đầu ra ở các điều kiện nhất định.

2. THỰC NGHIỆM

Quá trình thực nghiệm được tiến hành trên thiết bị máy cắt laser 3015 CNC - Raycus 3300W (Hình 1). Tia laser được phát ở chế độ sóng liên tục và sử dụng khí N₂ làm khí hỗ trợ trong quá trình cắt (đồng trục với chùm laser). Các thông số thực nghiệm được thiết kế theo phương pháp quy hoạch trực giao bằng cách thay đổi công suất laser (P), vận tốc cắt (V) và đường kính đầu cắt (d) cho vật liệu SKD11 ở ba cấp độ (Bảng 1). Thành phần hóa học của phôi được cho trong bảng 2.

Mẫu được cắt theo dạng hình lược như hình 2. Độ nhám bề mặt rãnh cắt được đo trên máy Mitutoyo SJ301 với tiêu chuẩn đo nhám JS2001 và được chụp phóng đại 80 lần bằng kính hiển vi HHM 500 (hình 3). Độ nhám bề mặt rãnh cắt được đo tại 5 điểm trên khoảng chiều dài của rãnh là 40mm và đo trên 9 rãnh cho một mẫu (hình 2, hình 3).

Bảng 1. Tham số điều khiển và các mức độ

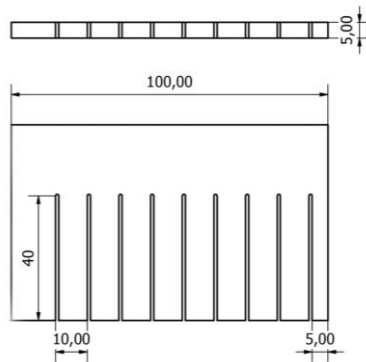
Ký hiệu	Tham số điều khiển	Đơn vị	Mức độ		
			1	2	3
A	Công suất (P)	W	2200	2400	2600
B	Vận tốc cắt (v)	mm/ph	1500	1650	1800
C	Đường kính đầu cắt (d)	mm	2,5	3,5	4,5

Bảng 2. Thành phần hóa học của vật liệu SKD11 [15]

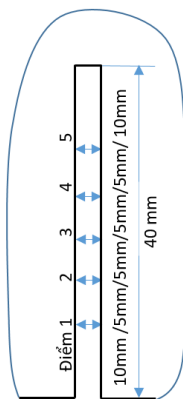
	C	Cr	Mo	Si	Mn	Ni	V
%	1,4- 1,6	11,0- 13,0	0,7- 1,2	≤ 0,6	≤ 0,6	-----	0,15- 0,3



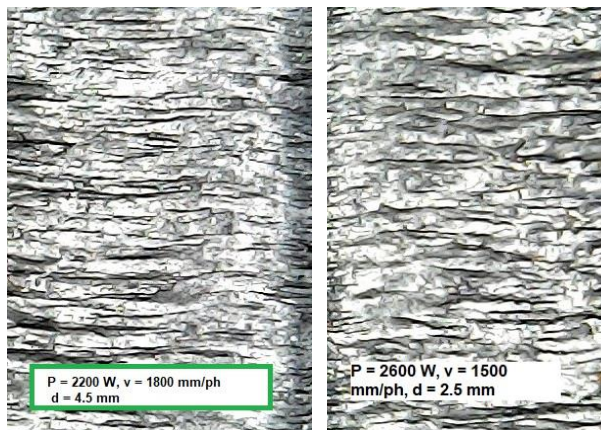
Hình 1. Máy cắt laser Raycus 3300 W



Hình 2. Kích thước của mẫu cắt



Hình 3. Vị trí điểm đo trên rãnh cắt



Hình 4. Hình ảnh bề mặt rãnh cắt ở chế độ khác nhau

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

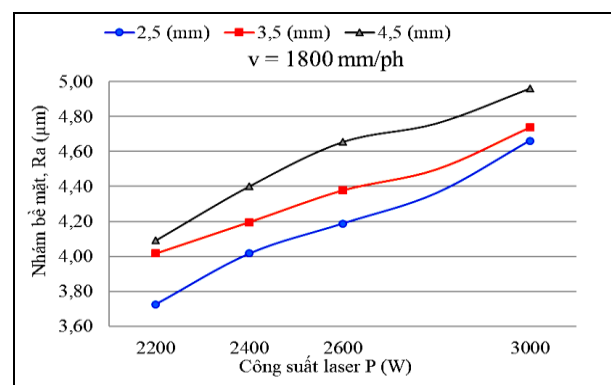
3.1. Đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ nhám

3.1.1. Ảnh hưởng của công suất laser đến nhám bề mặt

Mặc dù, gia công bằng laser là một quá trình gia công không tiếp xúc nhưng nhiệt độ của chùm laser sinh ra lớn làm ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt của rãnh cắt. Chất lượng bề mặt cũng phụ thuộc vào áp suất của khí hỗ trợ. Một trong những chức năng của khí hỗ trợ là loại bỏ kim loại nóng chảy ra khỏi bề mặt rãnh cắt. Ở áp suất khí cao hơn việc hình thành rãnh cắt sẽ nhanh và chất lượng bề mặt tốt hơn. Việc đánh giá chất lượng bề mặt được thực hiện bằng cách sử dụng thông số độ nhám bề mặt (R_a). Giá trị R_a được cho trong bảng 3. Khi thực hiện với các giá trị công suất laser thay đổi từ 2200 đến 3000 W, các thông số $v = 1800$ mm/ph, áp suất khí $N_2 = 1,4$ Mpa được giữ cố định.

Bảng 3. Giá trị độ nhám bề mặt (R_a) ở công suất laser (P) khác nhau

Công suất laser P (W)	Đường kính đầu cắt d (mm)		
	2,5	3,5	4,5
	Nhám bề mặt, R_a (μm)		
2200	3,726	4,016	4,092
2400	4,016	4,196	4,402
2600	4,188	4,378	4,656
3000	4,662	4,738	4,962



Hình 5. Đồ thị ảnh hưởng của công suất laser (P) đến độ nhám bề mặt (R_a)

Kết quả trên hình 5 cho thấy, khi cắt ở vận tốc cắt 1800 mm/ph, với đường kính đầu cắt là 2,5 mm thì khi công suất laser tăng từ 2200 đến 3000 W, độ nhám bề mặt rãnh cắt tăng từ 3,726 đến 4,662 μm điều này là do ở mức công suất laser cao sẽ dẫn đến năng lượng laser dư thừa hấp thụ vào vết cắt, lúc này vật liệu nóng chảy quá mức được tạo ra và hình thành các vân chồng lên nhau trên bề mặt. Áp suất khí thổi cũng ảnh hưởng lớn đến chất lượng bề mặt, khi áp suất khí có tốc độ lớn, đường kính đầu cắt nhỏ, vật liệu nóng chảy loại bỏ ra khỏi bề mặt nhanh hơn ngăn cản sự bám vật liệu nóng chảy lên bề mặt cắt.

3.1.2. Ảnh hưởng của vận tốc cắt đến nhám bề mặt

Vận tốc cắt (v) là tốc độ di chuyển của nguồn nhiệt tập trung trên mặt của phôi. Tại một công suất cố định, khi vận tốc cắt thấp thì độ nhám bề mặt rãnh cắt sẽ cao điều này được giải thích là do thời gian tương tác giữa chùm laser và kim loại lâu hơn, khiến lượng nhiệt tại vị trí cắt lớn, vật liệu bị nóng chảy nhiều hơn, bề mặt bị phá hủy nhiều hơn bởi nhiệt do chùm laser tác động lên, điều này cũng đồng nghĩa với việc chiều rộng rãnh cắt lớn hơn.

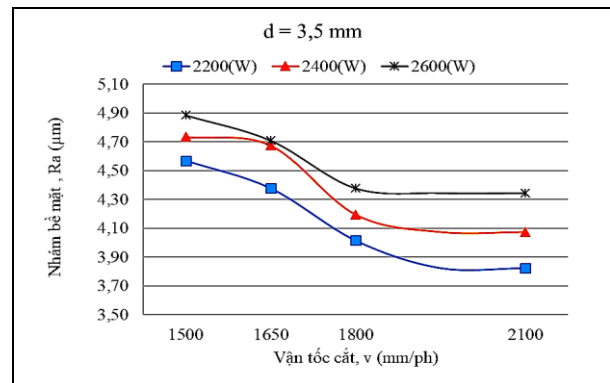
Khi tăng vận tốc cắt, chất lượng nhám bề mặt được cải thiện, tuy nhiên nếu tiếp tục tăng vận tốc cắt sẽ xảy ra hiện tượng cắt không đứt đó gọi là điểm giới hạn của vận tốc, tại vận tốc này nguồn nhiệt này tập trung không đủ thời gian để làm nóng chảy vật liệu cần cắt. Giá trị vận tốc giới hạn này phụ thuộc vào chiều dày vật liệu và loại vật liệu gia công.

Để đánh giá ảnh hưởng vận tốc cắt đến nhám bề mặt rãnh cắt, thực hiện với các giá trị vận tốc thay đổi từ 1500 ÷ 2100 mm/ph, các thông số $d = 3,5$ mm, áp suất khí $N_2 = 1,4$ MPa; khoảng cách từ đầu cắt đến phôi $h = 0,8$ mm được giữ cố định. Kết quả thí nghiệm cho trong bảng 4.

Bảng 4. Giá trị bề nhám bề mặt (R_a) ở vận tốc cắt (v) khác nhau

Vận tốc cắt v (mm/ph)	Công suất laser (W)		
	2200	2400	2600
	Nhám bề mặt, R_a (μm)		
1500	4,570	4,736	4,886
1650	4,378	4,676	4,710
1800	4,016	4,196	4,378
2100	3,825	4,075	4,345

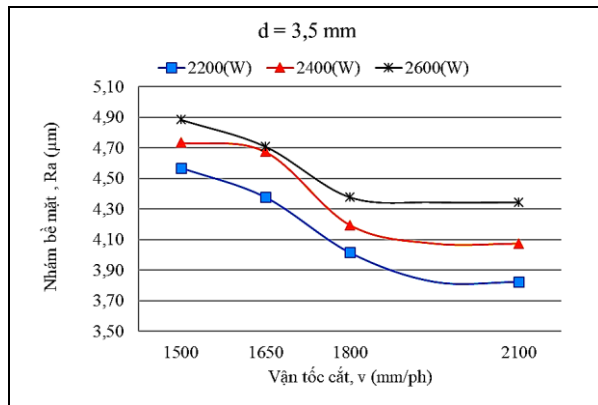
Trong quá trình gia công laser, vận tốc cắt ảnh hưởng đến tốc độ loại bỏ vật liệu cũng như chất lượng bề mặt cắt. Ở vận tốc cắt thấp (<1650 mm/ph) xuất hiện các vân trên tất cả các mẫu, chiều cao của vân lớn dẫn đến độ nhám bề mặt cao. Khi vận tốc cắt tăng lên, khoảng vân bề mặt trở lên nông dần và có xu hướng xuất hiện về phía dưới của rãnh cắt, khi vận tốc cắt từ 1800 mm/ph trở nên thì bề mặt rãnh cắt phẳng hơn và lượng vân bề mặt đồng đều hơn, độ nhám bề mặt $R_a = 4,016(\mu\text{m})$ tại vận tốc cắt 1800 mm/ph (hình 6).



Hình 6. Đồ thị ảnh hưởng của vận tốc cắt (v) đến độ nhám bề mặt (R_a)

3.1.3. Ảnh hưởng của đường kính đầu cắt đến độ nhám bề mặt rãnh cắt

Ảnh hưởng của đường kính đầu cắt đến nhám bề mặt được thể hiện như hình 7, đường kính đầu cắt được khảo sát từ $d = 2,5 \div 5,0$ mm tại vận tốc cắt, $v = 1500 \div 1800$ mm/ph, khi gia công bằng laser luồng khí có ảnh hưởng đến chất lượng vết cắt như trình bày ở trên áp suất khí hỗ trợ tăng thì độ nhám sẽ giảm.



Hình 7. Đồ thị ảnh hưởng đường kính đầu cắt (d) đến nhám bề mặt (Ra)



Hình 8. Hình ảnh rãnh cắt dưới có bavia khi sử dụng đường kính đầu cắt d = 5.0 mm

Khi đường kính đầu cắt lớn ($d = 4,5 \text{ mm}$) ở vận tốc cắt nhỏ (1500 mm/ph), độ nhám bề mặt tăng do lượng nhiệt tập trung quá lâu dẫn đến hình thành nhiều vân trên bề mặt, điều này cho thấy vận tốc là yếu tố ảnh hưởng chính đến chất lượng bề mặt. Qua các kết quả thực nghiệm thấy rằng khi đường kính đầu cắt tăng ($2,5 \div 4,5 \text{ mm}$) tại công suất laser 2400 W , vận tốc cắt 1800 mm/ph thì độ nhám bề mặt có xu hướng tăng từ $4,016$ đến $4,402 \mu\text{m}$. Tuy nhiên tại, một áp suất cố định ($P_k = 1,4 \text{ MPa}$), đường kính đầu cắt tăng mạnh ($d = 5,0 \text{ mm}$) sẽ làm dòng khí hỗ trợ bị phân tán dẫn đến luồng khí hỗ trợ không đủ để loại bỏ vật liệu ra khỏi bề mặt gia công, khi đó lượng kim loại nóng chảy không có đường thoát có thể có

hiện tượng trào ngược lên bề mặt của phôi, phá hỏng vết cắt, độ nhám bề mặt tăng, xuất hiện xỉ trên bề mặt rãnh cắt dưới (hình 8).

3.2. Xây dựng mô hình toán học nhám bề mặt

Từ kết quả của bài toán thực nghiệm, sử dụng phần mềm Minitab, bằng phân tích ANOVA cho độ nhám bề mặt rãnh cắt cho thấy, vận tốc cắt (v) có ảnh hưởng lớn nhất $45,73\%$ đến nhám bề mặt rãnh cắt. Tiếp theo đó phần trăm ảnh hưởng của công suất (P) và đường kính đầu cắt (d) thấp hơn lần lượt là $36,95\%$ và $15,93\%$.

Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao [3] để xây dựng mô hình toán học mô tả mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt với các thông số ảnh hưởng chính. Số thí nghiệm $N = 2^3 = 8$ và một thí nghiệm tại tâm (bảng 5).

Phương trình hồi quy viết dưới dạng:

$$R_a = b_0 \times p^{b_1} \times v^{b_2} \times d^{b_3} \quad (1)$$

Sử dụng phần mềm Minitab 19 để tính toán, sau đó 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 nhám bề mặt rãnh cắt có dạng :

$$R_a = 2.4843 \times p^{0.612} \times v^{-0.591} \times d^{0.165} \quad (2)$$

Sử dụng phần mềm MATLAB ta vẽ được đồ thị mối quan hệ độ nhám bề mặt với các thông số công suất laser, vận tốc cắt và đường kính đầu cắt (hình 9, 10).

Hình 9 cho thấy, khi tăng công suất laser, độ nhám bề mặt tăng lên. Điều này là do mức công suất laser cao sẽ dẫn đến năng lượng laser dư thừa hấp thụ vào vết cắt làm cho vật liệu nóng chảy quá mức từ đó hình thành các vân chồng lên nhau trên bề mặt cắt. Vận tốc cắt tăng, tương tác của chùm laser lên vật liệu sẽ ít hơn. Điều này có thể dẫn đến độ nhám

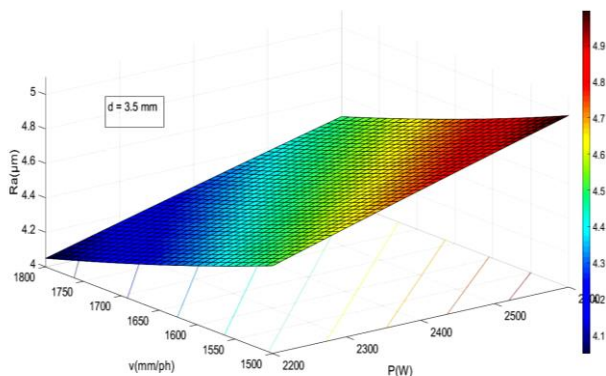
bề mặt thấp hơn nhưng bề rộng rãnh cắt sẽ giảm đi.

Hình 9, 10 cho thấy, đường kính đầu cắt tăng thì nhám bề mặt tăng. Tuy nhiên, khi tăng tiếp

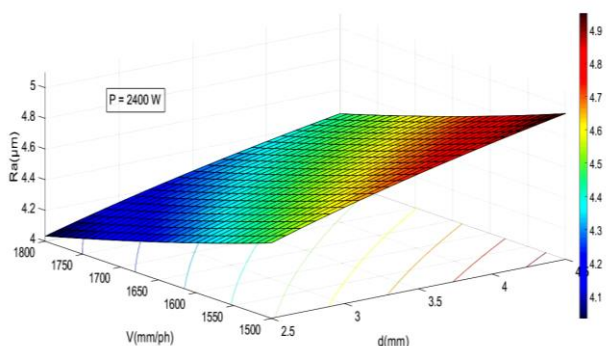
đường kính đầu cắt, có hiện tượng tụt áp, lúc này áp suất không đủ để đẩy kim loại nóng chảy ra khỏi vùng cắt, để lại nhiều bavaria đọng tại mặt dưới của vùng gia công.

Bảng 5. Ma trận quy hoạch thực nghiệm

TT	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ (W)	X ₂ (mm/ph)	X ₃ (mm)	R _a (μm)
1	-	-	-	2200	1500	2.5	4.170
2	+	-	-	2600	1500	2.5	4.694
3	-	+	-	2200	1800	2.5	3.726
4	+	+	-	2600	1800	2.5	4.188
5	-	-	+	2200	1500	4.5	4.740
6	+	-	+	2600	1500	4.5	4.944
7	-	+	+	2200	1800	4.5	4.092
8	+	+	+	2600	1800	4.5	4.656
9	0	0	0	2400	1650	3.5	4.676



Hình 9. Mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt (Ra) với công suất laser (P) và vận tốc cắt (v)



Hình 10. Mối quan hệ giữa độ nhám với vận tốc cắt laser và đường kính đầu cắt

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã tiến hành đánh giá ảnh hưởng của thông số công nghệ: Công suất laser (P), vận tốc cắt (V), đường kính đầu cắt (d) đến độ nhám bề mặt rãnh cắt trên vật liệu SKD11 bằng phương pháp thực nghiệm Taguchi và xử lý trên phần mềm Minitab 19. Kết quả cho thấy vận tốc cắt là yếu tố ảnh hưởng chính đến nhám bề mặt với 45,73%, tiếp theo là công suất laser với tỷ lệ là 36,95% và đường kính đầu cắt là 15,93%. Từ dữ liệu thực nghiệm và phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao, mô hình toán học của hàm nhám bề mặt với công suất laser, vận tốc cắt, đường kính đầu cắt đã được xây dựng. Kết quả xác nhận rằng ảnh hưởng của vận tốc cắt lớn hơn so với ảnh hưởng của công suất và đường kính đầu cắt. Kết quả này cho thấy các yếu tố như công suất, vận tốc cắt ảnh hưởng đến nhám bề mặt có chung quy luật với các nghiên cứu trước đó trên các loại vật liệu khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Đinh Văn Đệ, *Phương pháp gia công đặc biệt*, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh (2007).
- [2] Phạm Thị Hoa Mạc Thị Bích, Bành Tiến Long, Nguyễn Đức Toàn, "*Nghiên cứu thực nghiệm lực cắt khi phay thép SKD11 được hỗ trợ gia nhiệt bằng cảm ứng từ*", Tạp chí Khoa học và Công nghệ 129, 032-037 (2018).
- [3] Trần Văn Địch, *Các phương pháp xác định độ chính xác gia công (dùng cho các trường cao đẳng và đại học)*, 2008.
- [4] William M Steen, Mazumder, Jyotirmoy, *Laser material processing*, springer science & business media, 2010.
- [5] S. Xavierarockiaraj P. Kuppan, "*Influence of Process Parameters on Surface Temperature during Laser Assisted Preheating of SKD 11 Steel based on Response Surface Methodology*", Materials Today: Proceedings. 5(5), 13451-13458, (2018).
- [6] Guojun Zhang, Zhen Zhang, Jianwen Guo, Wuyi Ming, "*Modeling and Optimization of Medium-Speed WEDM Process Parameters for Machining SKD11*", Materials and Manufacturing Processes. 28(10), 1124-1132, (2013).
- [7] AM Sifullah, Y Nukman, MA Hassan A Hossain, "*Finite element analysis of fusion laser cutting on stainless steel-304*", ARPN J Eng Appl Sci. 11(1), 181-189, (2016).
- [8] Pedram Parandoush Altab Hossain, "*A review of modeling and simulation of laser beam machining*", International journal of machine tools and manufacture. 85, 135-145, (2014).
- [9] Imtiaz Ahmed Choudhury S Shirley, "*Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation*", Optics & Laser Technology. 42(3), 503-508, (2010).
- [10] Begic-Hajdarevic Derzija Cekic Ahmet, "*Definition of Mathematical Models of High-alloyed Steel 1.4828 in CO₂ Laser Cutting*", Procedia Engineering. 100, 435-444, (2015).
- [11] HA Eltawahni, M Hagino, KY Benyounis, T Inoue, "*Effect of CO₂ laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L*", Optics & Laser Technology. 44(4), 1068-1082, (2012).
- [12] KJ Muralidhara, "*A study on CO₂ laser cutting of mild steel and optimization of process variables*", (2008).
- [13] Boujelbene M, "*Influence of the CO₂ laser cutting process parameters on the Quadratic Mean Roughness Rq of the low carbon steel*", Procedia Manufacturing. 20, 259-264, (2018).
- [14] Lin Li, M Sobih PL Crouse, "*Striation-free laser cutting of mild steel sheets*", CIRP annals. 56(1), 193-196, (2007).
- [15] Guojun Zhang, Zhen Zhang, Jianwen Guo, Wuyi Ming, "*Modeling and Optimization of Medium-Speed WEDM Process Parameters for Machining SKD11*", Materials and Manufacturing Processes. 28(10), 1124-1132, (2013).

Thông tin liên hệ: **Hoàng Anh Tuấn**

Tel: 0989136482 - Email: hatuan@uneti.edu.vn

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.

