NGHIÊN CỨU LỰA CHỌN ĐIỀU KIỆN MÀI ĐỂ GIA CÔNG HỢP KIM TITAN Ti6AL4V

RESEARCH ON SELECTION OF GRINDING CONDITIONS FOR MACHINING TITANIUM ALLOY Ti6AL4V

Phạm Vũ Dũng

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

Đến Tòa soạn ngày 05/04/2023, chấp nhận đăng ngày 29/05/2023

Tóm tắt: Hợp kim titan Ti-6Al-4V là vật liệu được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp, tuy nhiên đây cũng là hợp kim khó gia công do tính dính bám cao, trong quá trình mài hợp kim này việc xác định bộ thông số với các điều kiện gia công hợp lý còn gặp khó khăn. Trong bài báo này, phương pháp Taguchi được ứng dụng để xác định điều kiện mài tối ưu theo tiêu chí độ nhám bề mặt nhỏ nhất. Quy hoạch thực nghiệm dựa trên mảng trực giao L9 với các biến vào là vận tốc của đá, độ hạt của đá và kiểu bôi trơn. So sánh giữa các kết quả tính toán và thực nghiệm cho thấy chúng khá phù hợp với nhau, cho phép khẳng định độ tin cậy của mô hình thực nghiệm.

Từ khóa: Mài, Taguchi, độ nhám bề mặt.

Abstract: Titanium Ti-6Al-4V alloy is a widely used material in industry, but it is also an extremely difficult alloy to work due to its high adhesion. numbers with reasonable machining conditions are still difficult. In this paper, the Taguchi method has been applied to determine the optimal grinding conditions according to the criterion of minimum surface roughness. The experimental plan is based on the L9 orthogonal array with the input variables being rock velocity, rock grain, and lubricating type. The comparison between the calculated and experimental results shows that they are quite consistent with each other, allowing to confirm the reliability of the experimental model.

Keywords: Grinding, Taguchi, Surface Roughness.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hợp kim titan Ti-6Al-4V được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp hàng không vũ trụ, thực phẩm, y tế... với nhiều tính chất cơ, lý, hóa quý như nhẹ xấp xỉ một nửa thép nhưng độ bền cơ học gần gấp đôi, kể cả ở nhiệt độ cao; trơ trong nhiều môi trường hóa học như nước biển, axit, kiềm; thân thiện với cơ thể sống và không bị cơ thể đào thải, các hợp kim titan được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp. Tuy nhiên, do tính dẻo, dai, dẫn nhiệt kém, nhiệt dung lớn, tính dính bám cao… nên các hợp kim titan được đánh giá thuộc nhóm vật liệu khó gia công. Hợp kim Ti-6Al-4V là hợp kim 2 pha (α-β), hay được dùng trong các cụm chi tiết nhẹ, bền nhiệt của các động cơ turbine. Đề tài gia công hợp kim này đã được nhiều nhà khoa học nghiên cứu [1], [6], [9]. Việc xác định chế độ cắt đúng để gia công hợp kim này đã thu hút đông đảo các nhà nghiên cứu quan tâm. Vì chế độ cắt ảnh hưởng trực tiếp và mạnh nhất đến các chỉ tiêu kinh tế, kỹ thuật gia công. Xác định chế độ cắt để đảm bảo chỉ tiêu kinh tế, kỹ thuật là bài toán công nghệ tương đối dễ giải, nhưng xác định các điều kiện gia công ban đầu (đồ gá, dụng cụ, dung

dịch trơn nguội,…) thực chất là bài toán khó hơn vì có nhiều lựa chọn với các thông số và tiêu chí định tính không rõ ràng, nên người ta thường dựa vào kinh nghiệm. Phương pháp này có thể được áp dụng với các vật liệu thông thường, như các hợp kim nền sắt, đồng, nhôm, nhưng với hợp kim titan thì do các phản ứng phức tạp và khác thường của chúng, một số nhà công nghiệp mong muốn có các công cụ lựa chọn, đánh giá các điều kiện gia công ban đầu một cách định lượng hơn, tin cậy hơn. Mục tiêu của nghiên cứu này là tạo ra công cụ để xác định bộ điều kiện mài (độ hạt - G_s, chất trơn nguội - Cool, vận tốc của đá - v_s), đảm bảo độ nhám bề mặt - R_a nhỏ nhất. Thực chất, đây là bài toán tối ưu hóa điều kiện mài theo tiêu chí R_a nhỏ nhất.

Vì các yếu tố đầu vào của bài toán có thể được mô tả đưới dạng số (v_s), dạng mã (G_s), dạng lời (Cool), nên không thể giải nó bằng các công cụ tính toán số. Trong những trường hợp đó, các phương pháp thống kê hay suy diễn bằng ngôn ngữ nói có ưu thế hơn. Để giải quyết vấn đề này, chúng tôi đã thử nghiệm một số phương pháp, trong đó có phương pháp Taguchi sẽ được trình bày dưới đây. Kết quả được kiểm chứng bằng cách so sánh các giá trị tính với các giá trị đo của R_a và kết quả tỏ ra đáng tin cậy.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

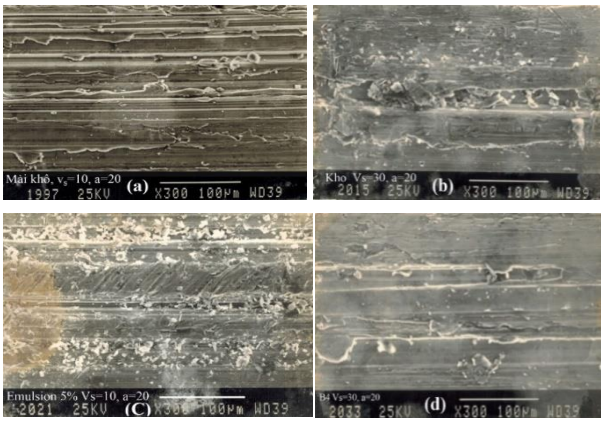
2.1. Sự hình thành bề mặt khi mài

Tuy cơ chế tạo phoi của các hạt mài được coi là tương tự như của các răng dao phay, nhưng do sự đặc biệt về vật liệu, kích thước, hình dạng và phân bố trên mặt đá của các hạt mài mà ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến yếu tố hình học bề mặt mài rất khác biệt so với phay.

Theo tính toán lý thuyết, độ cao nhấp nhô trung bình khi mài [7].

$$R_a = \frac{1}{9\sqrt{3}}\left(\frac{v_w L}{v_s d_s^{0,5}}\right)^2 \quad (1)$$

trong đó: v_w (m/s) - vận tốc của phôi; v_s (m/s) vận tốc của đá; L (mm) - khoảng cách trung bình giữa các hạt mài theo chu vi của đá; d_s (mm) - đường kính của đá. Với giá trị thông dụng của các đại lượng trên thì giá trị tính (lý tưởng) của R_a rất nhỏ, chỉ bằng 1/1000 giá trị tốt nhất có thể đạt được trên thực tế. Mặt khác, theo (1) thì chiều sâu cắt không ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt, nhưng trên thực tế lại có. Vậy yếu tố nào đã gây nên sự sai khác quá xa giữa độ nhám lý tưởng và thực tế. Có rất nhiều yếu tố không thể tính toán được bằng lý thuyết, ví dụ độ cao của vật liệu (ba via) bị rẽ sang 2 bên, vật liệu phoi và hạt mài bị dính lên bề mặt phôi. Chính ảnh hưởng của các yếu tố này khiến độ nhám thực lớn gấp nhiều lần độ nhám lý tưởng và khó dự đoán trước.



Hình 1. Ảnh SEM bề mặt mài với các điều kiện khác nhau

a: v_s=10 m/s, v_w = 0,25 s, a = 0,02 mm, mài khô;

b: v_s=30 m/s, v_w = 0,25 s, a = 0,02 mm, mài khô;

c: v_s=10 m/s, v_w=0,25 s, a=0,02 mm tưới emul 5%;

d: v_s=30 m/s, v_w=0,25 s, a = 0,02 mm tưới dầu oil.

Hình 1 là ảnh chụp các bề mặt tương ứng với

các điều kiện mài khác nhau cũng có thể nhận biết nhờ những đặc trưng về lực cắt, nhiệt độ và sự mòn của đá. Tất cả các ảnh đều cho thấy bề mặt vật liệu bị rẽ sang 2 bên, dưới các lớp bavia đó, ít hay nhiều, đều có các mảnh phoi và hạt mài bị vùi lấp. So sánh hình (a) với (b) cho thấy, khi mài khô với cùng chiều sâu cắt, chất lượng bề mặt xấu đi khi tăng tốc độ của đá. So sánh hình (a) với (c) cho thấy bề mặt mài khô có vẻ tốt hơn bề mặt mài có tưới dung dịch nhũ tương (*emulsion*). Ngược lại, so sánh hình (b) với (d) lại cho thấy mài có tưới dầu khoáng cho hình ảnh bề mặt tốt hơn khi mài khô. Chất lượng bề mặt mài còn xấu đi do sự dính bám của các phế liệu (phoi, ma nhe đá vỡ, bụi,..). Các vụn kim loại mài ra, trước hết dính vào bề mặt đá, sau đó bám vào mặt chi tiết như những vẩy hàn. Quá trình này (*redepozition*) còn gây nên trường lực và nứt cục bộ. Tùy theo chế độ mài xảy ra 3 cơ chế mài. Trong cơ chế mài loại 1, xảy ra khi năng suất mài rất nhỏ $z^{/} \leq 0{,}4$ (mm^3/mm.s), hầu như không thấy hiện tượng dính bám. Cơ chế mài loại II (*Small Scale adhesion*: SSA) được đặc trưng sự dính bám một phần bề mặt đá và chi tiết. Khi $z^{/}>1{,}5$ (mm^3/mm.s) xảy ra cơ chế mài loại III (*Large Scale adhesion*: LSA). Khuôn khổ của bài báo không cho phép giải thích các hiện tượng trên. Điều muốn ở đây là minh hoạ cơ chế vô cùng phức tạp của việc hình thành bề mặt khi mài, đặc biệt với hợp kim titan. Vì vậy, mặc dù đã phân tích rất sâu ảnh hưởng của các yếu tố động, hình học của quá trình cắt đến độ nhám bề mặt, Malkin [7] vẫn phải thừa nhận rằng các tính toán lý thuyết chỉ có tác dụng định hướng điều khiển quá trình, không thể dựa vào đó để tính toán định lượng các thông số công nghệ. Các quan hệ thực nghiệm tuy không thể hiện rõ bản chất vật lý của quá trình nhưng lại cho phép đánh giá định lượng ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đầu vào đến các thông số đầu ra. Các quan hệ thực nghiệm cơ bản của mài được trình bày trong [2]. Với R_a, có quan hệ:

$$R_a = R_1 h_{eq}^r \quad (2)$$

trong đó, h_{eq} - chiều dày phoi tương đương, R_1 và r là các hằng số.

2.2. Xác định các yếu tố đầu vào cho mô hình

Trong quá trình mài xảy ra tương tác giữa đá, phôi và môi trường. "Môi trường" trực tiếp bao quanh vùng mài là chất trơn nguội. Với phôi đã biết, cần chọn đá, chất trơn nguội và chế độ mài.

Về đá, một loạt các công trình nghiên cứu đã chỉ ra, trong số các loại đá mài thông thường cho hợp kim titan thì đá với hạt mài SiC, độ cứng trung bình là phù hợp [9]. Độ hạt có ảnh hưởng 2 mặt đến độ nhám bề mặt. Đá mịn, một mặt giảm R_a; mặt khác lại tăng dính bám khiến R_a tăng. Vì vậy, yếu tố về đá mài đáng quan tâm ở đây là độ hạt.

Về môi trường, có thể lựa chọn trong số 3 chất trơn nguội thông thường: không khí (mài khô), dung dịch nhũ tương (*emulsion*) và dầu khoáng. Như đã chỉ ra trên hình 1, mỗi loại chất trơn nguội có cơ chế tác dụng riêng và phù hợp với cấu trúc đá và chế độ mài cụ thể. Nói cách khác, chất trơn nguội cần được chọn cùng với độ hạt và chế độ mài.

Chọn chế độ mài thuộc lớp bài toán khác, được thực hiện sau khi bộ ba phôi - đá - môi trường đã được xác định. Tuy nhiên, hợp kim titan đặc biệt nhạy cảm với tốc độ cắt (của đá). Mỗi loại đá mài và chất trơn nguội phù hợp với tốc độ cắt nhất định. Nói cách khác, tốc độ cắt chi phối việc chọn đá và chất trơn nguội, nên khi chọn đá và chất trơn nguội cần phải tính đến tốc độ cắt.

3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

Mục tiêu thực nghiệm là khảo sát ảnh hưởng

của tốc độ cắt, độ hạt, của đá và chất trơn nguội đến độ nhám bề mặt.

Thiết bị gồm: máy mài phẳng ESG- 4080 (Đài Loan - Trung Quốc), tốc độ trục chính 1450 v/ph, máy đo độ nhám SJ-201 (mitutoyo, Nhật). Chế độ cắt: Tốc độ của phôi 15 m/ph, chiều sâu cắt 25 µm; tốc độ cắt thay đổi 3 cấp (10, 20, 30) m/s, Độ hạt: G_s = [20, 35, 50].

Trong nghiên cứu này, tối ưu hóa điều kiện cắt được thực hiện bằng phương pháp Taguchi. Quy hoạch thực nghiệm của Taguchi dựa trên mảng trực giao (OA), đảm bảo số thí nghiệm ít, nhờ đó giảm tối đa thời gian và chi phí thí nghiệm, có thể tìm hiểu chi tiết về cơ sở lý thuyết và ứng dụng của phương pháp này trong các tài liệu [3], [4], [5].

3.1. Quy hoạch thực nghiệm

Bài toán có 3 yếu tố đầu vào:

- Tốc độ cắt: v_s= [10, 20, 30];
- Độ hạt: G_s = [20, 35, 50];
- Chất trơn nguội: Cool= [Dry, Emul, Oil].

Mỗi yếu tố có 3 mức

Bảng 1. Số liệu đầu vào

	Yếu tố	v_s	G_s	Cool
Mức	1	10	20	Dry
	2	20	35	Emul
	3	30	50	Oil

Từ số liệu trên, mảng trực giao có cấu trúc L9 được thiết lập như trong bảng 2, tương ứng 9 thí nghiệm. Bảng có 2 phần. Phần biến điều khiển chứa dữ liệu đầu vào, trong đó các mức được mã hóa bằng số không thứ nguyên 1, 2, 3. Ví dụ thí nghiệm thứ 2 (1, 2, 2) được tiến hành với v_s=20 m/s, độ hạt G_s=35, tưới dung dịch *emultion*. Phần số liệu đo chứa kết quả 3 lần đo R_a. Cột cuối cùng (S/N) thuộc bước sau.

Bảng 2. Mảng trực giao L9

Thí nghiệm	Biến điều khiển			Đo độ nhám (R_a)			S/N
	v_s	Gs	Cool	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}	(Ra)
1	1	1	1	2,12	1,98	2,11	-6,32
2	1	2	2	1,84	1,85	1,86	-5,34
3	1	3	3	1,79	1,81	1,82	-5,14
4	2	1	3	2,09	2,12	2,11	-6,47
5	2	2	1	2,41	2,39	2,38	-7,58
6	2	3	2	2,49	2,50	2,51	-7,96
7	3	1	2	2,59	2,62	2,61	-8,32
8	3	2	3	2,51	2,49	2,51	-7,97
9	3	3	1	2,71	2,69	2,72	-8,65

3.2. Phân tích số liệu và tối ưu hóa điều kiện mài

Ảnh hưởng của mỗi yếu tố đến đầu ra được đánh giá bằng tỉ số S/N, được gọi là "tỷ số tín - tạp" (*signal-to-noise ratio*).

$$(S|N)_I = -10log\frac{\overline{y_i^2}}{s_I^2} \quad (dB) \qquad (3)$$

Trong đó:

$$\overline{y_i} = \frac{1}{N}\sum_{u=1}^{N_1} y_{i,u} \quad là\ phần\ "tín" \qquad (4)$$

$$s_i^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{u=1}^{N_1}(y_{i,u} - \overline{y_i})2 \ là\ phần\ tạp \qquad (5)$$

với: i - số thứ tự thí nghiệm; u - số thứ tự lần đo; N_i - số lần đo. Mức nào có số S/N lớn (tín lớn, tạp nhỏ) thì gần mục tiêu tối ưu hơn. Phương án tối ưu tương ứng với tổng $(S/N)_i$ lớn nhất. Đối với bài toán cực tiểu *(smaller better*) thì (3) được viết thành:

$$(S|N)_i = -10\log\sum_{u=1}^{N}\left(\frac{y_u^2}{N_i}\right) \qquad (6)$$

Đối với bài toán cực đại (*larger better*) thì (3) được viết thành

$$(S|N)_i = -10\log\sum_{u=1}^{N_1}\frac{1}{y_u^2} \qquad (7)$$

Phép phân tích trên dựa vào phương sai s của phép đo nên còn được gọi là phân tích phương sai. Cụ thể với bài toán đang xét: i=1÷9, u=1÷3, N_i=3. Phân tích được tiến hành theo các bước sau:

Bước1: Theo (6), tính các giá trị $(S/N)_i$ (vì cực tiểu R_a), ghi kết quả vào cột cuối của bảng 2.

$$(S|N)_4 = -10log10\left(\frac{2,09^2+2,12^2+2,11^2}{3}\right) = 2,11 \quad (8)$$

Bước 2: Tính giá trị trung bình S/N của các yếu tố theo từng mức, ví dụ:

$$G_{S2} = \frac{-5,34-7,58-7,97}{3} = -6,96 \quad (9)$$

Kết quả ghi vào 9 ô tương ứng của bảng 3.

Bước 3: Trong bảng 3, lần lượt:

- Tính giá trị trung bình (*Mean*) của mỗi yếu tố, ví dụ với v_s có:

m = (-5,6 -7,34 - 8,31)/3 = -7,08

- Tính giá trị Max của mỗi yếu tố, ví dụ với v_s có: Max (-5,60; 7,34; 8,31) = -5,60.

- Tính hiệu (Max-m) cho từng yếu tố, ví dụ với v_s có: Max-m = (-5,60+7,08) =1,48.

Tính mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố, ví dụ với v_s có: % ảnh hưởng = 100.1,48/(1,48+0,12+0,56) = 68,66%. Theo hàng cuối, ta thấy v_s ảnh hưởng nhiều nhất đến R_a, tiếp theo là chất trơn nguội. Độ hạt của đá ảnh hưởng ít nhất.

Bước 4: Xác định phương án tối ưu. Rõ ràng phương án tối ưu sẽ là tập hợp các mức có tỉ số S/N lớn nhất (đạt max). Nhìn vào bảng 3 ta thấy đó là phương án V1G2C3 (tương ứng các ô tô màu), nghĩa là v_s=10, G_s=35, dầu khoáng. Giá trị S/N tương ứng của nó bằng: $(S/N)_{opt}=m+(Max_{vs}-m)+(Max_{Gs}-m)+(Max_{cool}-m) = Max_{vs} + Max_{Gs} + Max_{Cool} - 2m$ = – 5,60 – 6,96 –6,53 + 2×7,08 = –4,92. Cuối cùng, tính ngược theo (6), nhận được giá trị tối ưu (*min*) của R_a: $R_a(min)=10^{-(-4,92/20)}$ =1,76µm.

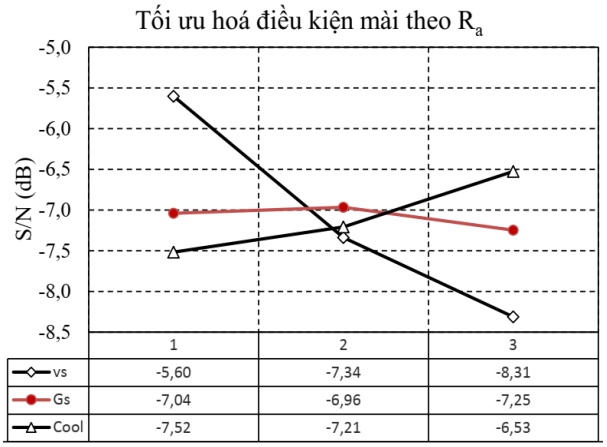
Các giá trị S/N của các mức và phương án tối ưu trong bảng 3 có thể được biểu diễn trực quan như hình 2.

Bảng 3. Bảng ANOVA

	S/N trung bình theo các mức			Phương án giữa
	v_s	Gs	Cool	V2G2C2
1	-5,60	-7,04	-7,52	-7,34
2	-7,34	-6,96	-7,21	2,33
3	-8,31	-7,25	-6,53	
Mean (m)	-7,08	-7,08	-7,08	Phương án tối ưu
Max	-5,60	-6,96	-6,53	V1G2C3
(Max-m)	1,48	0,12	0,56	-4,92
% ảnh hưởng	68,66	5,53	25,81	**1,76**

Bảng 4. Bảng kết quả mở rộng

Thí nghiệm	V_s	G_s	Cool	R_a(t)	R_a(đ)	SS(%)	Thí nghiệm	V_s	G_s	Cool	R_a(t)	R_a(đ)	SS(%)
1	10	20	1	1,99	2,07	3,72	6	20	50	2	2,41	2,50	3,77
	10	35	1	1,98			7	30	20	2	2,28	2,61	12,60
	10	50	1	2,04				30	35	2	2,26		
	20	20	1	2,43				30	50	2	2,34		
5	20	35	1	2,41	2,39	0,96		10	20	3	1,78		
	20	50	1	2,49			**Tối ưu**	**10**	**35**	**3**	**1.76**		
	30	20	1	2,72			3	10	50	3	1,82	1,81	0.64
	30	35	1	2,70			4	20	20	3	2,17	2,11	2,91
9	30	50	1	2,79	2,71	2,94		20	35	3	2,15		
	10	20	2	1,92				20	50	3	2,22		
2	10	35	2	1,91	1,85	3,07		30	20	3	2,43		
	10	50	2	1,97			8	30	35	3	2,41	2,50	3,64
	20	20	2	2,35				30	50	3	2,49		
	20	35	2	2,33									



Hình 2. Biểu diễn S/N của các yếu tố

4. ĐÁNH GIÁ VÀ THẢO LUẬN KẾT QUẢ

Từ bảng ANOVA (bảng 3) có thể tính giá trị R_a cột R_a(t) trong bảng 4, cho tất cả các phương án có thể (27 phương án), trong đó các hàng tô màu có đánh số tương ứng với các thí nghiệm trong bảng 2. Sai số tương đối (SS%) giữa giá trị tính R_a(t) với giá trị đo R_a(đ) khá nhỏ, cho phép khẳng định mô hình nghiên cứu là đáng tin cậy và có giá trị ứng dụng thực tiễn. Kết quả tính toán cũng thể hiện giá trị R_a=1,76 µm đúng là nhỏ nhất. Từ đồ thị hình 2 có thể rút ra một số kết luận có tác dụng định hướng cho nghiên cứu và ứng dụng công nghệ mài hợp kim như sau:

- Khác với hầu hết kim loại khác, hợp kim titan rất nhạy cảm với tốc độ cắt. Đề đạt chất lượng bề mặt cao cần mài với tốc độ thấp. Điều này đã được khẳng định bởi nhiều công trình đã nghiên cứu đã dẫn trong [1], [4], [5]. Ngoài ra hợp kim titan dẫn nhiệt kém nên nhiệt độ vùng cắt cao, nhiệt độ cao cộng hưởng với tính dẻo dai, dễ dính bám vốn có khiến chất lượng bề mặt sấu đi khi tăng tốc độ cắt.
- Kích thước hạt mài ảnh hưởng ít nhưng phức tạp đến độ nhám bề mặt. Nói chung nên tránh đá rất mịn (dẫn đến tăng nhiệt, tăng dính bám) hoặc quá thô (tăng chiều cao bavia). Độ hạt trung bình là thích hợp, nhưng cụ thể bằng bao nhiêu còn tùy thuộc chế độ cắt và chế độ trơn nguội cụ thể.
- Với hợp kim titan, dung dịch trơn nguội là dùng khá phức tạp, tải nhiệt, giảm nhiệt độ chi tiết không phải hướng ưu tiên, vì nếu vẫn để nguồn nhiệt độ cao thì làm nguội nhanh sẽ làm tăng ứng suất dư, tăng nứt tế vi của bề mặt gia công. Dùng dầu thích hợp (dầu khoáng độ nhớt thấp, dầu thực vật có khả năng thẩm thấu và tạo màng tốt) sẽ làm giảm ma sát, giảm nhiệt từ nguồn. Ngoài ra tính chất hóa học của dung dịch cũng cần quan tâm.

5. KẾT LUẬN

Bài báo giới thiệu mô hình nghiên cứu dựa trên phương pháp Taguchi, được xây dựng nhằm tối ưu hóa điều kiện mài theo tiêu chí độ nhám bề mặt nhỏ nhất, kết quả dạng đồ thị hình 2. Phương án tối ưu là: V1G2C3 (V_s=10, S =35, C=Oil); với chế độ mài này nhận được độ nhám bề mặt nhỏ nhất R_a(min)=1,76 µm. Nhìn dòng cuối của bảng 3 cho thấy sự ảnh hưởng của vận tốc đá v_s đến R_a là lớn nhất (68,66%), ảnh hưởng của chất trơn nguội đến R_a là (25,81%), ảnh hưởng ít nhất là độ hạt G_s (5,53%). Với mong muốn của tác giả giúp cho trong quá trình sản xuất có thể quyết định, lựa chọn điều kiện công nghệ ban đầu cho quá trình gia công. Để giải quyết vấn đề kinh tế kỹ thuật của quá trình, khi gia công loại hợp kim này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hiệp Đào Văn *Optimalizace operace rovinného broušení slitiny VT6*. Kandidátská disertační práce, VAAZ Brno. (1989).

[2] Hiệp Đào Văn, Dũng Phạm Vũ Giám sát mòn của đá mài có ứng dụng mạng nơ ron nhân tạo. *Kỷ yếu hội nghị toàn quốc lần thứ 2 về điều khiển (VCCA-2013).* (2013).

[3] Fraley, S., Oom, M., Terrien, B., Zalewski, J. *Design of Experiments via Taguchi Methods: Orthogonal Arrays*. Retrieved from https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php. (2015).

[4] Kulekci, M. Analysis of Process Parameters for a Surface-Grinding Process Based on the Taguchi Method. *Materials and Technology 47 (1) 105*, 105-109. (2013).

[5] Kumar, N., Tripathi, H., Gandotra, S. Optimization of Cylindrical Grinding Process Parameters on C40E Steel Using Taguchi Technique. *Journal of Engineering Research and Applications*, 100-104. (2015).

[6] Kumar, S., Batish, A., Singh, R., Singh, A Hybrid Taguchi-Artificial Neural Network Approach to Predict Surface Roughness During Electric Discharge Machining of Titanium Alloys. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2831-2844. T. (2014).

[7] Malkin, S. *Grinding Technology Theory and Applications of Machining with Abravives*. Ellis Horwood Limited. (1989).

[8] Pal, D., Bangar, A., Sharma, R., Yadav, A. Optimization of Grinding Parameters for Minimum Surface Roughness by Taguchi Parametric Optimization Technique. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering (IJMIE), No. 2231 –6477*, 74-78. (2012).

[9] Xipeng, X., Yiqing, Y., Hui, H. Mechanisms of Abrasive Wear in the Grinding of Titanium (TC4) and Nickel (K417) Alloys. *Wear 255*, 1421-1426. (2003).

[10] Yossifon, S: The Grinding of Workpieces Exhibiting High Adhesion. Trans. ASME. 5, 1991.

Thông tin liên hệ: **Phạm Vũ Dũng**

Điện thoại: 0912703855 - Email: pvdung@uneti.edu.vn

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