

ẢNH HƯỞNG CỦA NỒNG ĐỘ HẠT NANO Al_2O_3 VÀ CHẾ ĐỘ CẮT ĐẾN NHÁM BỀ MẶT KHI PHAY CỨNG THÉP HARDOX 500 SỬ DỤNG MQCL

Trần Minh Đức, Trần Thế Long*, Trần Quyết Chiến
Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

TÓM TẮT

Bài báo này giới thiệu một số kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của bôi trơn làm nguội tối thiểu (Minimum quantity cooling lubrication - MQCL) sử dụng dung dịch nano Al_2O_3 đến quá trình cắt khi phay thép Hardox 500. MQCL sử dụng dung dịch nano Al_2O_3 trên nền là dầu gạo đã cải thiện đáng kể điều kiện cắt gọt khi phay thép Hardox 500 - một loại vật liệu khó gia công. Sử dụng phương pháp quy hoạch tối ưu Box - Behnken đã chỉ ra được nồng độ hạt nano, vận tốc cắt và lượng chạy dao ảnh hưởng đáng kể đến trị số nhám bề mặt R_a , trong đó nồng độ hạt và lượng chạy dao là hai yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất. Trong khoảng khảo sát, trị số nhám R_a đạt giá trị tối ưu là $0,0822 \mu m$ khi nồng độ hạt nano Al_2O_3 là $0,7626 \%$, vận tốc cắt $V = 80 m/phút$ và lượng chạy dao $S_z = 0,08 mm/răng$. Việc thử nghiệm thành công dung dịch nano Al_2O_3 trên nền là dầu gạo vào quá trình phay thép Hardox 500 có ý nghĩa khoa học và thực tiễn vì dầu gạo là một loại dầu thực vật sẵn có ở Việt Nam, không độc hại nên đây là hướng nghiên cứu gia công thân thiện với môi trường.

Từ khóa: *Phay cứng; Bôi trơn tối thiểu-MQL; Bôi trơn làm nguội tối thiểu-MQCL; Thép Hardox; Dung dịch nano; Gia công thân thiện với môi trường.*

Ngày nhận bài: 19/8/2019; Ngày hoàn thiện: 26/8/2019; Ngày đăng: 27/8/2019

EFFECTS OF Al_2O_3 NANO-ENGINEERING CONCENTRATION AND CUTTING CONDITION ON SURFACE ROUGHNESS IN MQCL HARD MILLING OF HARDOX 500

Tran Minh Duc, Tran The Long*, Tran Quyet Chien
University of Technology - TNU

ABSTRACT

This study presents the work on effects of MQCL using Al_2O_3 rice oil-based nanofluid on hard milling of Hardox 500 steel. The hard milling performance of Hardox 500 steel, one of the difficult-to-cut materials, is improved. The Box-Behnken experimental design is applied to point out that nano-engineering concentration, cutting speed and feed rate have strong influences on surface roughness R_a . The obtained results indicate that the optimized value of surface roughness is $0.0822 \mu m$ at Al_2O_3 nanoconcentration of 0.7626% , cutting speed of $80 m/min$ and feed rate of $0.08 mm/tooth$. Moreover, Al_2O_3 rice oil-based nanofluid is successfully applied for hard milling of Hardox 500 steel that is a step toward environmentally friendly machining.

Keywords: *Hard milling; Minimum quantity lubrication - MQL; Minimum quantity cooling lubrication - MQCL; Hardox steel; Nanofluid; Environmentally friendly machining*

Received: 19/8/2019; Revised: 26/8/2019; Published: 27/8/2019

* Corresponding author. Email: tranthelong@tnut.edu.vn

1. Giới thiệu

Thép tấm Hardox 500 thương mại của hãng SSAB (Thụy Điển) thường được gia công nhiệt hoàn chỉnh, thép có độ cứng, giới hạn bền, giới hạn chảy dẻo và khả năng chống mài mòn tốt. Khuyến cáo của hãng là nên sử dụng thép này ở trạng thái đã được gia công nhiệt hoàn chỉnh do hãng cung cấp. Thành phần hóa học và tính chất cơ lý của thép Hardox 500 cho ở bảng 1 và bảng 2 [1].

Thép Hardox 500 dễ gia công bằng biến dạng dẻo, tính hàn cao nhưng thuộc nhóm vật liệu khó gia công bằng cắt gọt [1], do được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực công nghiệp như cơ khí, kiến trúc v.v. nên cần có các giải pháp để nâng cao hiệu quả kinh tế - kỹ thuật khi gia công cắt gọt. Từ các kết quả nghiên cứu của mình, hãng SSAB đã đưa ra các khuyến cáo như nên dùng dụng cụ cắt chất lượng cao của các hãng dụng cụ nổi tiếng như Sandvik, Mitsubishi, SECO, v.v.; lựa chọn phương pháp bôi trơn làm nguội từ bên trong; chọn chế độ cắt hợp lý, v.v. Tuy nhiên, hãng SSAB cũng khuyến cáo tùy điều kiện sản xuất cụ thể cần có các nghiên cứu để lựa chọn được chế độ gia công hợp lý [1].

Để đáp ứng như cầu của thực tiễn sản xuất, việc tìm ra các giải pháp để nâng cao hiệu quả kinh tế - kỹ thuật khi gia công thép hardox 500 ở Việt Nam hiện nay là vấn đề cần thiết.

Thép hardox 500 thuộc loại khó gia công, tính khó gia công nổi bật ở đây là vừa mang thuộc tính của gia công vật liệu cứng, vừa mang thuộc tính của vật liệu có độ bền, độ dẻo và tính chống mòn cao [2-4].

Để nâng cao hiệu quả của quá trình cắt các loại vật liệu khó gia công, việc chọn phương pháp và chế độ bôi trơn làm nguội hợp lý là giải pháp rất được quan tâm. Trong đó bôi trơn tối thiểu - MQL được nghiên cứu, ứng dụng và đã mang lại hiệu quả tốt [5-7]. Để tiếp tục nâng cao hiệu quả của MQL, một số giải pháp mới đang được nghiên cứu và ứng

dụng là MQL dùng dung dịch nano (*nanofluid*) [6-12] hoặc bôi trơn làm nguội tối thiểu MQCL [13-16], v.v. Dung dịch nano được tạo ra bằng cách trộn một số loại hạt nano như Al_2O_3 , MoS_2 , SiO_2 , v.v. vào dung dịch trơn nguội (*gọi là dung dịch nền*) [6,7,9].

Bài báo này giới thiệu một số kết quả nghiên cứu ứng dụng MQCL dùng dung dịch nano Al_2O_3 với nền là dầu gạo để phay thép hardox 500, cụ thể là khảo sát, đánh giá ảnh hưởng của nồng độ độ hạt nano Al_2O_3 , vận tốc cắt và lượng chạy dao đến trị số nhám bề mặt R_a .

Để giải quyết vấn đề, nhóm tác giả sử dụng phương pháp nghiên cứu thực nghiệm với phương pháp thiết kế thí nghiệm tối ưu Box - Behnken.

2. Phương pháp nghiên cứu

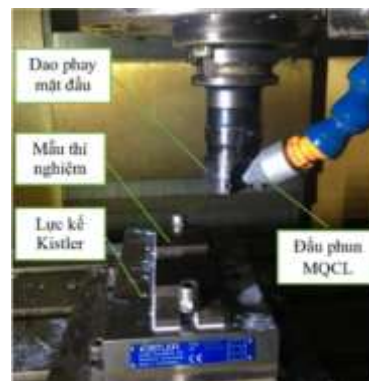
2.1. Hệ thống thí nghiệm

Máy: Trung tâm gia công thông minh Mazak 530C (*hình 1*).

Mẫu thí nghiệm: Thép Hardox 500, kích thước 150mm x 40mm x 40mm; thành phần hóa học và tính chất cơ lý tính của thép Hardox 500 cho ở bảng 1 và bảng 2 [1].

Dụng cụ cắt: dao phay mặt đầu Ø50 gắn mảnh hợp kim cứng APMT 1604 PDTR LT 30 phủ PVD của hãng LAMINA.

Hệ thống MQCL: đầu phun MQCL; hệ thống cung cấp khí nén.



Hình 1. Trung tâm gia công Mazak 530C

Bảng 1. Thành phần hóa học thép Hardox 500

Nguyên tố	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Hàm lượng (% max)	0,3	0,7	1,6	0,25	0,01	1,5	1,5	0,6	0,005

Bảng 2. Tính chất cơ lý của thép Hardox 500

Giới hạn bền kéo MPa	Độ cứng HBW	Độ cứng HRC
1400	470 - 530	49 - 50

Thiết bị tạo dung dịch nano: máy rung siêu âm 3000868 - Ultrasons-HD (Hành JP SELECTA - Tây Ban Nha)

Thiết bị đo lực cắt: Lực kế Kistler 9257BA, bộ chuyển đổi A/D DQA N16210, phần mềm DASylab 10.0

Máy đo nhám: SJ-210 hãng Mitutoyo - Nhật Bản

2.2. Chế độ tron nguội và chế độ cắt

Dung dịch tron nguội: dung dịch nano Al_2O_3 trên dung dịch nền là dầu gạo; kích thước hạt nano 30 nm; thay đổi nồng độ với các giá trị 0,5%; 1,0% và 1,5%.

Chế độ cắt và chế độ tron nguội:

Áp suất dòng khí 6 - 8 bar; lưu lượng 0,5 ml/phút; nhiệt độ môi trường 24 - 27°C; nhiệt độ dòng dung dịch lạnh 4 - 8°C; tưới vào mặt sau của dao.

Chiều sâu cắt $t = 0,12$ mm [1].

2.3. Thiết kế thí nghiệm

Sử dụng phương pháp quy hoạch tối ưu Box - Behnken với 3 thông số đầu vào được lựa chọn theo theo 3 cấp độ như trong bảng 3 nhằm đánh giá ảnh hưởng của chúng đến thông số đầu ra là nhám bề mặt R_a .

Bảng 3. Biến thí nghiệm và mức

TT	Tên biến	Ký hiệu	Mức (-1)	Mức (+1)
1	Nồng độ nd (%)	x_1	0,5	1,5
2	Vận tốc cắt V (m/phút)	x_2	80	140
3	Lượng chạy dao S_z (mm/răng)	x_3	0,08	0,16

$$R_a = 0,0223 - 0,1431 x_1 + 0,00137 x_2 + 0,4922 x_3 + 0,0940 x_1 * x_1 - 0,000005 x_2 * x_2 \quad (2)$$

Triển khai thí nghiệm theo quy hoạch Box - Behnken 03 biến, hai mức, lặp 3 Blocks 1. Đo trị số nhám R_a cho kết quả ở bảng 4.

3. Kết quả và bàn luận

Chọn dạng hàm hồi quy thực nghiệm [11]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^k x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{j-1} b_j x_i x_j \quad (1)$$

Sử dụng phần mềm Minitab 18 xử lý số liệu thí nghiệm với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$, sau khi bỏ một số thành phần bậc cao ít ý nghĩa thống kê cho phương trình hồi quy thực nghiệm R_a (2); biểu đồ Pareto của các yếu tố ảnh hưởng đến trị số nhám R_a (hình 2); ảnh hưởng của các yếu tố chính đến trị số nhám R_a (hình 3); đồ thị bề mặt chỉ tiêu ảnh hưởng của các yếu tố đến trị số nhám R_a (hình 4, 5). Kết quả tối ưu hàm mục tiêu R_a (hình 6).

Kết quả phân tích phương sai (bảng 5) cho thấy mục kiểm định mức độ phù hợp của mô hình (Lack-of-Fit) có giá trị P (P-Value) lớn hơn mức ý nghĩa α , điều này có nghĩa là mô hình phù hợp với dữ liệu. Xem xét các thành phần riêng rẽ của mô hình hồi quy cho thấy các giá trị xác suất P của các thành phần đều rất nhỏ và nhỏ hơn mức ý nghĩa α (kết quả xử lý từ phần mềm Minitab coi $P = 0,000$), như vậy sự có mặt của các thành phần này đều có ý nghĩa lớn trong mô hình hồi quy. Việc đánh giá mô hình hồi quy thông qua hệ số quyết định $R^2 = 77,10\%$ (Bảng 6) chứng tỏ mô hình tìm được là phù hợp với dữ liệu.

Bảng 4. Kết quả đo nhám bề mặt R_a

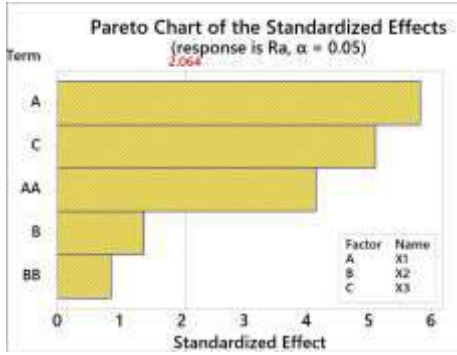
Thứ tự chuẩn	Thứ tự thí nghiệm	Kiểu điểm	Khối	x_1	x_2	x_3	R_a (μm)
1	10	2	1	0,5	80	0,12	0,128
2	2	2	1	1,5	80	0,12	0,132
3	1	2	1	0,5	140	0,12	0,125
4	18	2	1	1,5	140	0,12	0,173
5	16	2	1	0,5	110	0,08	0,081
6	22	2	1	1,5	110	0,08	0,126
7	4	2	1	0,5	110	0,16	0,137
8	24	2	1	1,5	110	0,16	0,203
9	30	2	1	1	80	0,08	0,086
10	12	2	1	1	140	0,08	0,116
11	29	2	1	1	80	0,16	0,103
12	27	2	1	1	140	0,16	0,140
13	15	0	1	1	110	0,12	0,132
14	6	0	1	1	110	0,12	0,115
15	11	0	1	1	110	0,12	0,109
16	14	2	1	0,5	80	0,12	0,115
17	5	2	1	1,5	80	0,12	0,172
18	28	2	1	0,5	140	0,12	0,117
19	9	2	1	1,5	140	0,12	0,130
20	13	2	1	0,5	110	0,08	0,093
21	23	2	1	1,5	110	0,08	0,150
22	3	2	1	0,5	110	0,16	0,133
23	21	2	1	1,5	110	0,16	0,202
24	19	2	1	1	80	0,08	0,100
25	8	2	1	1	140	0,08	0,102
26	7	2	1	1	80	0,16	0,116
27	25	2	1	1	140	0,16	0,135
28	20	0	1	1	110	0,12	0,120
29	26	0	1	1	110	0,12	0,126
30	17	0	1	1	110	0,12	0,106

Bảng 5. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA)

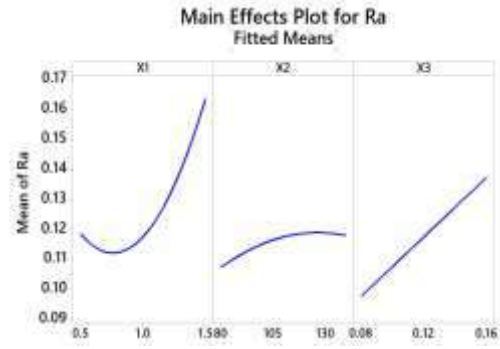
Nguồn	Bậc tự do	Tổng phương sai	Trung bình cộng các phương sai	Giá trị F	Giá trị P	
Mô hình	5	0,019142		0,003828	16,16	< 0,000
Bậc 1	3	0,014719		0,004906	20,71	< 0,000
x_1	1	0,008055		0,008055	34,00	< 0,000
x_2	1	0,000462		0,000462	1,95	0,175
x_3	1	0,006202		0,006202	26,18	< 0,000
Bậc 2	2	0,004423		0,002212	9,34	< 0,001
x_1*x_1	1	0,004102		0,004102	17,32	< 0,000
x_2*x_2	1	0,000177		0,000177	0,75	0,397
Lỗi	24	0,005685		0,000237		
Lack-of-Fit	7	0,002685		0,000384	2,17	0,091
Lỗi thuần túy	17	0,003000		0,000176		
Tổng	29	0,024827				

Bảng 6. Mô hình tóm tắt

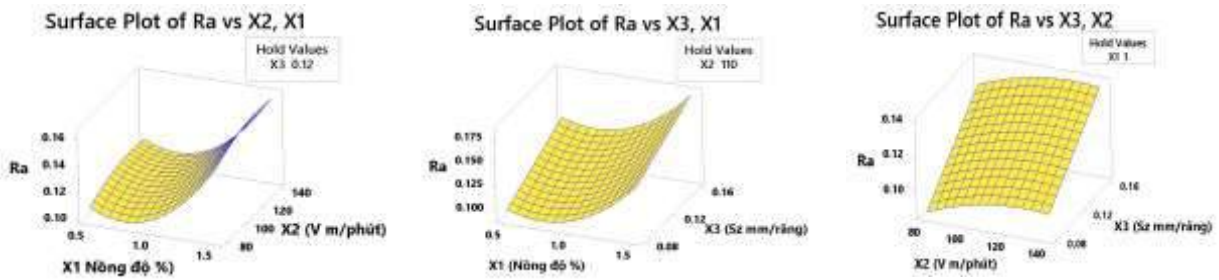
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0153913	77,10%	72,33%	62,99%



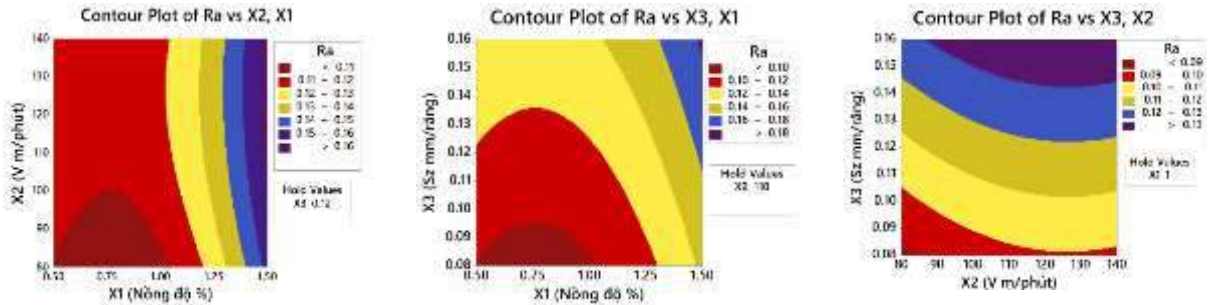
Hình 2. Biểu đồ Pareto của các yếu tố ảnh hưởng đến trị số nhám R_a



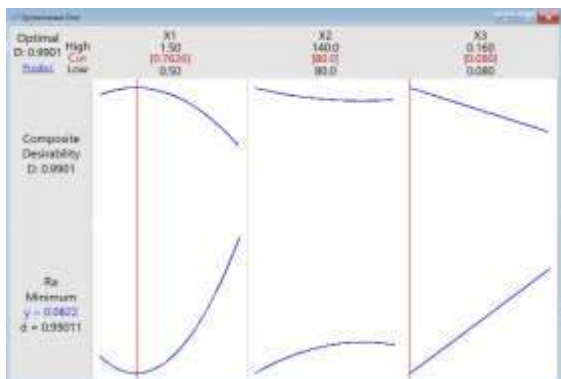
Hình 3. Ảnh hưởng của các yếu tố chính đến trị số nhám R_a



Hình 4. Đồ thị bề mặt ảnh hưởng của các yếu tố đến trị số nhám R_a : (a) Ảnh hưởng của x_1, x_2 ; (b) Ảnh hưởng của x_3, x_1 ; (c) Ảnh hưởng của x_3, x_2



Hình 5. Đồ thị đường mức ảnh hưởng của các yếu tố đến trị số nhám R_a : (a) Ảnh hưởng của x_1, x_2 ; (b) Ảnh hưởng của x_3, x_1 ; (c) Ảnh hưởng của x_3, x_2



Hình 6. Đồ thị và kết quả tối ưu

Với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$ biểu đồ Pareto (hình 2) cho thấy đường giới hạn của vùng

loại bỏ giả thuyết đảo có hoành độ là 2,64. Giá trị ảnh hưởng của yếu tố A (nồng độ x_1); C (lượng chạy dao x_3) và tương tác AA ($x_1 * x_1$) vượt quá bên phải đường giới hạn nên đây là các yếu tố ảnh hưởng rất lớn đến R_a . Giá trị ảnh hưởng của các yếu tố còn lại B (vận tốc x_2) và tương tác BB ($x_2 * x_2$) nằm ở bên trái đường giới hạn nên đây là các yếu tố ảnh hưởng rất ít đến R_a .

Ảnh hưởng của các yếu tố chính đến trị số nhám R_a :

Trong các yếu tố khảo sát, nồng độ (x_1) có mức độ ảnh hưởng lớn nhất, khi thay đổi

nồng độ thì đồ thị ảnh hưởng của nó đến trị số nhám R_a đổi chiều (hình 3), như vậy việc có mặt của hạt nano Al_2O_3 trong dung dịch đã có tác động đáng kể đến trị số nhám R_w trong khoảng khảo sát có thể tìm được giá trị nồng độ tối ưu để R_a đạt giá trị nhỏ nhất.

- Lượng chạy dao (x_3) có mức độ ảnh hưởng lớn nhất, khi tăng lượng chạy dao thì R_a tăng (hình 3). Như vậy khi gia công muốn đạt R_a thì nên chọn lượng chạy dao nhỏ.

Khi tăng vận tốc cắt (x_2) thì R_a tăng (hình 3), tuy nhiên mức độ tăng ít. Vì vậy trong thực tiễn sản xuất, khi cần tăng năng suất gia công nhưng vẫn có thể đảm bảo được yêu cầu về nhám bề mặt R_a nhỏ thì nâng cao vận tốc cắt là một hướng khả thi. Đồ thị bề mặt chỉ tiêu (gồm đồ thị bề mặt hình 4 và đồ thị đường mức hình 5) ảnh hưởng của các từng cặp biến thí nghiệm đến trị số nhám R_a . Từ các đồ thị này giúp chọn nhanh giá trị hợp lý của từng cặp biến thí nghiệm để đạt trị số R_a theo yêu cầu của bản vẽ. Ví dụ trên hình 4a và hình 5a, khi lượng chạy dao $S_z = 0,12$ mm/răng (x_3) không đổi, để đạt $R_a < 0,11$ μm thì nên chọn nồng độ từ 0,5 - 1,1% (x_1); vận tốc cắt $V = 80$ - 100 m/phút (x_2). Thép Hardox 500 không những có độ cứng cao (HRC = 49 -50), mà còn có giới hạn bền, giới hạn chảy dẻo cao và khả năng chống mòn tốt. Quá trình hình thành cấu trúc tế vi bề mặt khi gia công thép này vừa mang đặc điểm của gia công vật liệu cứng, vừa mang đặc điểm của gia công vật liệu có độ bền, độ dẻo cao [2]. Để cải thiện điều kiện cắt gọt, giảm ma sát, giảm nhiệt cắt, v.v. giải pháp sử dụng MQCL với dung dịch nano Al_2O_3 trên dung dịch nền là dầu gạo thực sự đã mang lại hiệu quả trong việc cải thiện quá trình cắt, được đánh giá thông qua các chỉ tiêu đánh giá. Kết quả đã chỉ ra được các thông số tối ưu (hình 6). Giá trị R_a nhỏ nhất là 0,0822 μm khi nồng độ hạt nano 0,7626%; vận tốc cắt $V = 80$ m/phút và lượng chạy dao $S_z = 0,08$ mm/răng.

Nguyên nhân ảnh hưởng của các biến khảo sát đến trị số nhám R_a được lý giải như sau:

Do thép Hardox có độ cứng cao và do MQCL tạo ra màng dầu bôi trơn có chứa các hạt nano trong vùng cắt [2,8,9] nên hạn chế được các vết cào xước bề mặt và hạn chế được biến dạng dẻo bề mặt (nhóm nguyên nhân động lực học) nên trị số nhám bề mặt đạt được nhỏ, $R_a = 0,081 - 0,203$ μm (mang tính chất của gia công vật liệu cứng).

Ảnh hưởng của lượng chạy dao (x_3): khi tăng lượng chạy dao lực cắt tăng mạnh nên biến dạng dẻo bề mặt tăng nên R_a tăng mạnh, kết quả này phù hợp với các kết quả khi gia công vật liệu có độ dẻo cao.

Ảnh hưởng của vận tốc cắt (x_2): vận tốc là yếu tố ảnh hưởng lớn đến biến dạng dẻo bề mặt nên ảnh hưởng lớn đến trị số nhám R_w , tuy nhiên khi cắt với vận tốc cắt cao thì tốc độ cắt lớn hơn tốc độ hình thành biến dạng dẻo nên hạn chế được ảnh hưởng của biến dạng dẻo đến nhám bề mặt. Vì vậy khi tăng vận tốc, trị số nhám R_a tăng nhưng tốc độ tăng chậm.

Ảnh hưởng của nồng độ hạt nano (x_1): Khi tăng nồng độ Al_2O_3 đến giá trị 0,7626% thì R_a đạt giá trị nhỏ nhất (tối ưu), tiếp tục tăng nồng độ trị số R_a tăng mạnh, lúc này trên bề mặt hình thành lớp màng ảnh hưởng xấu đến quá trình hình thành nhám bề mặt, nguyên nhân cụ thể cần có nghiên cứu sâu hơn. Kết quả này trùng khớp với kết quả nghiên cứu công bố trong [14].

4. Kết luận

MQCL sử dụng dung dịch nano Al_2O_3 có tác động tốt đến quá trình cắt khi phay thép Hardox 500 nên đã ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt và trị số nhám R_a . Kết quả phân tích phương sai trong thiết kế thí nghiệm tối ưu Box - Behnken đã chỉ ra lượng chạy dao, nồng độ hạt nano ảnh hưởng lớn đến trị số nhám R_a , vận tốc cắt ít ảnh hưởng hơn. Kết quả cho thấy khi tăng vận tốc cắt, tăng lượng chạy dao thì R_a tăng. Khi thay đổi nồng độ hạt nano thì trị số R_a thay đổi, cho trị số nhám bề mặt nhỏ nhất $R_a = 0,082$ μm khi nồng độ 0,7626%; vận tốc cắt 80 m/phút và lượng chạy dao 0,08 mm/răng.

Các kết quả nghiên cứu, ứng dụng MQCL sử dụng dung dịch nano Al_2O_3 trên dung dịch nền là dầu gạo vào quá trình phay thép Hardox 500 có ý nghĩa khoa học và thực tiễn. Việc sử dụng giải pháp này đã góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế-kỹ thuật khi gia công thép Hardox 500, nằm trong nhóm vật liệu khó gia công. Trị số nhám bề mặt R_a đạt được trong nghiên cứu này nhỏ ($R_a = 0,0822 \mu m - 0,203 \mu m$ - tương đương với mài tinh) nên có thể thay thế một phần cho nguyên công mài.

Những đóng góp mới của nghiên cứu: bước đầu ứng dụng MQCL vào quá trình gia công vật liệu khó gia công và thử nghiệm thành công dầu gạo làm dung dịch trơn nguội. Dầu gạo là loại dầu thực vật sẵn có ở Việt Nam, không độc hại, thân thiện môi trường. Từ đây mở ra hướng nghiên cứu mới trong gia công sạch, thân thiện với môi trường.

Để đánh giá chính xác hơn hiệu quả của MQCL, cần có nghiên cứu tổng thể và đánh giá kết quả thông qua các chỉ tiêu khác như nhiệt cắt, lực cắt, mòn và tuổi bền của dụng cụ và giá thành gia công, v. v.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - Đại học Thái Nguyên đã tài trợ cho công trình được trình bày trong bài viết này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Data sheet 152uk Hardox® 500 2018-02-12; Website www.ssab.com; SSAB, Stockholm, SWEDEN.
- [2]. J. Paulo Davim, *Machining of hard materials*, London: Springer -Verlag London Limited, 2011.
- [3]. Trần Minh Đức, Trần Thế Long, Phạm Quang Đông, “Effect of the alumina nanofluid concentration on minimum quantity lubrication hard machining for sustainable production”, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Doi.org/10.1177/0954406219861992, 2019.
- [4]. J. Barry, G. Byrne, “The mechanisms of chip formation in machining hardened steels”, *Trans ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, 124, pp. 528-535, 2002.
- [5]. T. Tamizharasan, T. Selvaraj, A. N. Haq, “Analysis of tool wear and surface finish in hard turning”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, pp. 671 -679, 2006.
- [6]. A. Uysala, F. Demirena, E. Altana, “Applying Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method on Milling of Martensitic Stainless Steel by Using Nano MoS_2 Reinforced Vegetable Cutting Fluid”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, pp. 2742-2747, 2015.
- [7]. A. K.Sharma, A. K. Tiwar, A. R. Dixit, “Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review”, *J. Clean. Prod.*, Vol. 127, pp. 1-18, 2016.
- [8]. Duc Tran Minh, Long Tran The and Ngoc Tran Bao, “Performance of Al_2O_3 Nanofluid in minimum quantity lubrication in hard milling of $60Si_2Mn$ steel using cemented carbide tools”, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, pp. 1-9, 2017.
- [9]. T. M. Duc, T. T. Long, P. Q. Dong, T. B. Ngoc, “Applied Research of Nanofluids in MQL to Improve Hard Milling Performance of $60Si_2Mn$ Steel Using Carbide Tools”, *Am. J. Mech. Eng.*, 5, pp. 228-233, 2017.
- [10]. T. Luo, X. Wein, X. Huang, L. Huang, F. Yang, “Tribological properties of Al_2O_3 nanoparticles as lubricating oil additives”, *Ceramics International*, Vol. 40, pp. 7143-7149, 2014.
- [11]. R. K. Singh, A. K. Sharma, A. R. Dixit, A. K. Tiwari, A. Pramanik, A. Mandal, “Performance evaluation of alumina-graphene hybrid nanocutting fluid in hard turning”, *J. Clean. Prod.*, Vol. 162, pp. 830-845, 2017.
- [12]. B. Rahmati, A. A. Sarhan, M. Sayuti, “Morphology of surface generated by end milling AL6061-T6 using molybdenum disulfide (MoS_2) nanolubrication in end milling machining”, *J. Clean. Prod.*, Vol. 66, pp. 685-691, 2014.
- [13]. R. W. Maruda, G. M. Krolczyk, E. Feldshtein, F. Pusavec, M. Szydlowski, S. Legutko, A. Sobczak-Kupiec, “A study on droplets sizes, their distribution and heat exchange for minimum quantity cooling lubrication (MQCL)”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 100, pp. 81-92, 2016.
- [14]. G. Krolczyk, R. Maruda, J. Krolczyk, P. Nieslony, S. Wojciechowski, S. Legutko, “Parametric and nonparametric description of the surface topography in the dry and MQCL cutting

conditions”, *Measurement*, Vol. 121, pp. 225-239, 2018.

[15]. R. W. Maruda, G. M. Krolczyk, S. Wojciechowski, K. Zak, W. Habrat, P. Nieslony, “Effects of extreme pressure and antiwear additives on surface topography and tool wear during MQCL turning of AISI 1045 steel”, *J.*

Mech. Sci. Technol., Vol. 32, pp. 1585-1591, 2018.

[16]. Pham Quang Dong, Tran Minh Duc, and Tran The Long, “Performance Evaluation of MQCL Hard Milling of SKD 11 Tool Steel Using MoS₂ Nanofluid”, *Metals*, 9(6), pp. 658, Doi: 10.3390/met9060658, 2019.