COMPARISON OF DEEP HOLE DRILLING PERFORMANCE ON SUS 304 USING ROTATING AND NON-ROTATING DRILL BITS UNDER REDUCED QUANTITY NANO-LUBRICATION CONDITIONS

Mai Thi Thu Ha[1], Nguyen Van Du[2], Ho Ky Thanh[2*]
[1]Thai Nguyen High School for Gifted Students, [2]TNU - University of Technology

ARTICLE INFO

Received: 16/8/2025
Revised: 24/9/2025
Published: 24/9/2025

KEYWORDS

Deep hole drilling
Chip morphology
Thrust force
Hole diameter
Burr

ABSTRACT

This paper presents the experimental investigation comparing the performance of deep hole drilling on SUS 304 stainless steel using two configurations: rotating drill and stationary drill. The experiments were conducted under reduced quantity lubrication conditions, with a coolant flow rate of 0.25 L/min and a pump pressure of 1.5 bar. The nanofluid coolant was prepared through a two-step process: first, graphene nanoparticles were dispersed into an emulsion using ultrasonic agitation; then, the resulting mixture was diluted with tap water to obtain the final working fluid. The results indicate that the nanofluid coolant enhances chip evacuation efficiency, thereby improving the stability of the drilling process. Comparative analysis between the two configurations reveals that the rotating drill setup provides better chip breakability, generating fragmented chips that facilitate smoother evacuation. Furthermore, this configuration yields lower and more stable thrust forces, smaller burr height at the hole exit, and extended tool life.

SO SÁNH HIỆU QUẢ KHOAN LỖ SÂU THÉP SUS 304 GIỮA MŨI KHOAN QUAY VÀ KHÔNG QUAY TRONG ĐIỀU KIỆN BÔI TRƠN TƯỚI TRÀN GIẢM THIỂU DUNG DỊCH NANO

Mai Thị Thu Hà[1], Nguyễn Văn Dự[2], Hồ Ký Thanh[2*]
[1]Trường THPT Chuyên Thái Nguyên, [2]Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 16/8/2025
Ngày hoàn thiện: 24/9/2025
Ngày đăng: 24/9/2025

TỪ KHÓA

Khoan lỗ sâu
Hình thái phoi
Lực dọc trục
Đường kính lỗ
Ba via

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm so sánh hiệu quả khoan lỗ sâu trên thép không gỉ SUS 304 theo hai phương án: mũi khoan quay và mũi khoan không quay. Các thí nghiệm được thực hiện trong điều kiện bôi trơn tưới tràn giảm thiểu, với lưu lượng và áp lực bơm lần lượt là 0,25 lít/phút và 1,5 bar. Dung dịch trơn nguội nano được chuẩn bị theo quy trình hai bước: đầu tiên, phân tán nano graphene vào emulsi bằng phương pháp siêu âm; sau đó, dung dịch thu được được hòa tan với nước máy để tạo thành dung dịch sử dụng trong quá trình gia công. Kết quả nghiên cứu cho thấy, dung dịch trơn nguội nano góp phần cải thiện khả năng thoát phoi, từ đó nâng cao độ ổn định của quá trình khoan. So sánh giữa hai phương án cho thấy, phương án sử dụng mũi khoan quay có khả năng bẻ phoi tốt hơn, tạo phoi vụn hợp lý, giúp cải thiện hiệu quả thoát phoi. Ngoài ra, phương án này còn cho lực dọc trục nhỏ và ổn định hơn, chiều cao ba via ở cuối lỗ thấp hơn, và tuổi bền của mũi khoan cao hơn.

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13428

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

1. Giới thiệu

Khoan là quá trình gia công cắt gọt phổ biến nhất trong sản xuất cơ khí [1]. So với các quá trình gia công cắt gọt khác, khoan được đánh giá một quá trình gia công phức tạp, điều kiện khắc nghiệt hơn, khả năng thoát phoi và thoát nhiệt kém hơn do vùng cắt chìm sâu trong lòng chi tiết. Nghiên cứu trước đây cho thấy, dung dịch trơn nguội không thể cấp trực tiếp đến vùng cắt bằng phương pháp tưới tràn từ bên ngoài khi tỉ lệ chiều sâu lỗ và đường kính mũi khoan (ký hiệu là L/D) lớn hơn 3 [2]. Do vậy, điều kiện gia công càng trở nên khắc nghiệt hơn khi khoan lỗ sâu, là các lỗ có tỉ lệ L/D lớn hơn 5 [3]. Trong khoan lỗ sâu, do bị cản trở nên lượng phoi tạo thành thường lớn hơn so với lượng phoi thoát ra, tạo nên xu hướng kẹt phoi trong rãnh xoắn [4]. Do rãnh chứa phoi nhỏ nên kẹt phoi là một trong những nguyên nhân chính làm giảm hiệu quả và khả năng áp dụng của khoan lỗ sâu khi dùng mũi khoan xoắn chính [5]. Hiện tượng kẹt phoi xảy ra làm giảm chất lượng bề mặt lỗ, làm gãy mũi khoan. Do vậy, cải thiện khả năng thoát phoi là điều kiện tiên quyết giúp cải thiện hiệu quả quá trình khoan lỗ sâu.

Nhiều giải pháp khác nhau đã được nghiên cứu để cải thiện điều kiện thoát phoi và nâng cao hiệu quả quá trình khoan lỗ sâu. Khoan gián đoạn có thể cải thiện khả năng thoát phoi, giảm mài mòn dụng cụ nên tăng được số lỗ khoan [6], [7]. Tuy vậy, khoan gián đoạn cần thiết bị hiện đại, lập trình chính xác, hiệu quả sản xuất thấp do có thời gian dừng gia công. Khoan có rung động siêu âm trợ giúp cũng là một giải pháp được quan tâm nghiên cứu gần đây [8], [9]. Tuy nhiên, giải pháp này làm tăng chi phí đầu tư và không linh hoạt do phải thiết kế, chế tạo hệ thống gá kẹp dụng cụ khá phức tạp. Một hướng nghiên cứu khác được triển khai là áp dụng giải pháp bôi trơn tối thiểu (MQL) [10]. Tuy vậy, hệ thống MQL đòi hỏi áp lực lớn, thiết bị phức tạp nên khó áp dụng trong thực tiễn sản xuất. Ngoài ra, hiệu quả bôi trơn và làm mát bằng MQL khá hạn chế khi khoan lỗ sâu. Một số nghiên cứu khác đề xuất giải pháp khoan lỗ sâu dưới điều kiện bôi trơn làm mát ở áp suất cao, sử dụng mũi khoan có lỗ dẫn dung dịch trơn nguội bên trong [3], [11]. Tuy nhiên, để thoát phoi hiệu quả thì áp lực đòi hỏi phải đạt từ 40 bar trở lên, dẫn đến gia tăng chi phí sản xuất do phải đầu tư vào hệ thống công nghệ.

Giải pháp sử dụng dung dịch trơn nguội nano graphene bôi trơn bằng phương pháp tưới tràn giảm thiểu (Reduced Quantity Lubrication – RQL) lần đầu tiên được áp dụng thành công khi khoan lỗ sâu thép không gỉ SUS 304 (với tỉ lệ L/D = 8) [8]. Trong đó, lưu lượng và áp suất cấp dung dịch trơn nguội lần lượt là 0,25 L/ph và 1,5 bar. Kết quả thực nghiệm cho thấy, hiệu quả của giải pháp RQL bằng dung dịch nano khi áp dụng đối khoan lỗ sâu theo phương pháp khoan thông thường khá tương đồng so với khi khoan có rung động siêu âm trợ giúp, tuy nhiên thiết bị đơn giản hơn. Chế độ cắt hợp lý khi khoan trong điều kiện RQL đã được xác định và được kiểm chứng sau đó [12]. Mặc dù vậy, các thí nghiệm chỉ thực hiện theo phương án mũi khoan không quay (gia công trên máy tiện) [8], [12] ít gặp trong thực tế sản xuất. Do đó, việc triển khai nghiên cứu, so sánh phương án mũi khoan không quay (khoan theo phương ngang) với phương án mũi khoan quay (khoan theo phương thẳng đứng) cho phép khẳng định hiệu quả thực sự của giải pháp bôi trơn RQL trong khoan lỗ sâu.

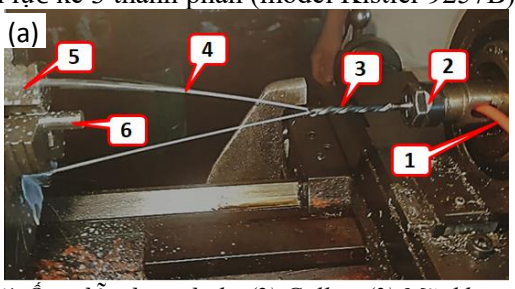
Bài báo này có mục tiêu so sánh, đánh giá hiệu quả của quá trình khoan lỗ sâu theo hai phương án: mũi khoan không quay và mũi khoan quay. Trong đó, các thông số đầu vào và kết quả nghiên cứu về phương án mũi khoan không quay, đã được công bố trước đây [12], được sử dụng làm giá trị tham chiếu. Vật liệu gia công được lựa chọn là thép không gỉ SUS 304, một loại vật liệu khó gia công cắt gọt điển hình [13]. Việc phân tích, so sánh giữa hai phương án khoan được thực hiện theo các tiêu chí định tính gồm khả năng hoàn thành lỗ khoan và hình thái phoi tạo thành; và các tiêu chí mang tính định lượng gồm lực dọc trục, chiều cao ba via, số lỗ có thể khoan thành công ở chế độ cắt hợp lý.

Các nội dung tiếp theo của bài báo được trình bày theo bố cục sau: Phần 2 trình bày chi tiết về thiết lập hệ thống thí nghiệm, chuẩn bị vật liệu và dung dịch trơn nguội, thiết kế thí nghiệm. Phần 3 trình bày và thảo luận về các kết quả thí nghiệm sơ bộ (tiểu mục 3.1), và các phân tích chi tiết (tiểu mục 3.2). Phần 4 là kết luận và đề xuất các nghiên cứu tiếp theo.

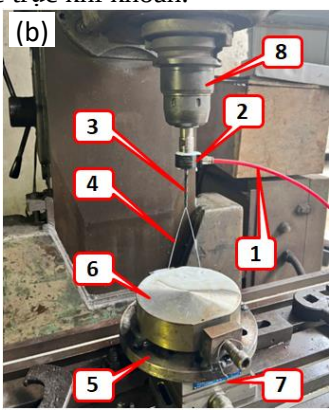
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Xây dựng sơ đồ thí nghiệm

Hệ thống thiết bị thí nghiệm tương ứng phương án mũi khoan không quay và phương án mũi khoan quay được xây dựng. Hình 1.a là hệ thống thí nghiệm khoan theo phương án mũi khoan không quay, thiết bị được sử dụng là máy tiện vạn năng cỡ nhỏ, model Takasawa 550. Khoan theo phương án này, mũi khoan được cố định trên đài gá dao nhờ hệ thống kẹp chặt tích hợp cảm biến lực (load cell) đo lực dọc trục. Phôi gia công được kẹp chặt trên mâm cặp ba trấu của máy và thực hiện chuyển động quay với tốc độ *n* (vòng/phút). Trong khi đó, để triển khai khoan theo phương án mũi khoan quay, hệ thống thí nghiệm được xây dựng trên máy phay vạn năng, model Niigata 2UMB (xem Hình 1.b). Mũi khoan được kẹp chặt trên trục chính quay với tốc độ *n* (vòng/phút). Phôi được cố định trên bàn máy nhờ hệ thống kẹp chặt. Hệ thống kẹp chặt này cố định trên lực kế 3 thành phần (model Kistler 9257B) để đo lực dọc trục khi khoan.



(1) Ống dẫn dung dịch; (2) Collet; (3) Mũi khoan; (4) Dòng dung dịch; (5) Kẹp chặt phôi; (6) Phôi gia công; (7) Lực kế 3 thành phần; (8) Trục chính



Hình 1. *Ảnh chụp hệ thống thiết bị thí nghiệm: (a) phương án mũi khoan không quay, thực hiện gia công trên máy tiện; (b) phương án mũi khoan quay, thực hiện gia công trên máy phay*

Mũi khoan xoắn Nachi Aqua DEXOH8D đường kính 5 mm có hai lỗ dẫn dung dịch trơn nguội được sử dụng cho cả hai phương án gia công. Mũi khoan này có chiều dài phần rãnh xoắn 55 mm và góc đỉnh mũi khoan 135°. Một bơm cỡ nhỏ có lưu lượng 0,25 lít/phút và áp suất 1,5 bar được sử dụng để cấp dung dịch trơn nguội trực tiếp vào vùng cắt. Điều kiện bôi trơn được sử dụng cho toàn bộ các thí nghiệm là bôi trơn tưới tràn giảm thiểu.

2.2. Chuẩn bị phôi

Phôi thép không gỉ SUS 304 được chuẩn bị phù hợp cho mỗi phương án thí nghiệm. Phương án mũi khoan không quay sử dụng phôi hình trụ có đường kính 10 mmm, dài 40 mm, mỗi phôi gia công một lỗ khoan. Trong khi đó, phương án mũi khoan quay sử dụng phôi có đường kính 150 mm, chiều cao 40 mm, mỗi phôi có thể gia công nhiều lỗ. Quá trình khoan tạo lỗ thông trên suốt chiều dài (hoặc chiều cao) của phôi, do đó tỉ lệ L/D = 8 trong toàn bộ các thí nghiệm. Ngoài ra, tất cả các lỗ trước khi khoan đều được khoan tâm để định vị chính xác vị trí lỗ khoan.

2.3. Chuẩn bị dung dịch trơn nguội

Để bôi trơn làm nguội khi khoan, trong nghiên cứu này, dung dịch trộn nano graphene được sử dụng. Dung dịch này có thành phần theo thể tích gồm 90% nước máy và 10% emulsi trộn nano graphene. Trong đó, Caltex Aquatex 3180 là emulsi được lựa chọn do khả năng dễ hòa tan vào nước và hiệu quả bôi trơn làm mát tốt. Quá trình chuẩn bị dung dịch nano được thực hiện theo quy trình hai bước [12]. Trước tiên, nano graphene được trộn với emulsi Caltex Aquatex 3180 theo tỉ lệ khối lượng 0,1% nano graphene và 99,9% emulsi. Quá trình phân tán nano graphene trong emulsi được thực hiện bằng cách sử dụng một đầu khuấy siêu âm cỡ nhỏ, hoạt

động ở tần số 20 kHz, phân tán trong 30 phút. Sau đó, dung dịch emulsi phân tán đều nano graphene được hòa trộn với nước máy thông thường do emulsi dễ dàng hòa tan vào nước.

Trong quá trình thí nghiệm, một loại dung dịch trơn nguội khác cũng được sử dụng để tham chiếu. Dung dịch trơn nguội này có thành phần theo thể tích 90% nước máy và 10% emulsi, gọi là dung dịch emulsi thông thường.

Sau khi chuẩn bị, độ nhớt của các loại dung dịch trơn nguội được đo theo phương pháp quay bằng máy đo độ nhớt NDJ-8S. Quá trình đo được thực hiện ở nhiệt độ phòng với tốc độ quay là 60 vòng/phút, trong khi các điều kiện khác được cố định. So với nước máy, độ nhớt tương đối của dung dịch nano graphene là 1,35, lớn hơn so với của dung dịch emulsi thông thường là 1,20.

2.4. Thiết kế thí nghiệm

Nhằm so sánh hiệu quả khoan lỗ sâu giữa hai phương án, mũi khoan quay và mũi khoan không quay, các thí nghiệm được triển khai theo hai nhóm, gồm: (1) thí nghiệm sơ bộ; và (2) thí nghiệm so sánh, đánh giá về hiệu quả quá trình khoan. Trong đó, thí nghiệm sơ bộ được triển khai nhằm đánh giá khả năng hoàn thành lỗ khoan ở các chế độ gia công khác nhau. Mỗi chế độ gia công sử dụng một mũi khoan mới và được thực hiện ba lần. Chế độ cắt được lựa chọn gồm tốc độ quay *n* và lượng chạy dao vòng *f*, như tổng hợp trong Bảng 1.

Thí nghiệm so sánh, đánh giá hiệu quả quá trình khoan được thực hiện sau đó nhằm phân tích chi tiết về hình thái phoi tạo thành, lực dọc trục thu được, ba via hình thành ở cuối lỗ khoan, số lỗ khoan được và biến động lực dọc trục khi khoan liên tiếp các lỗ bằng cách sử dụng một mũi khoan hoàn toàn mới ở chế độ cắt hợp lý.

Lưu ý rằng, do sự khác biệt về thiết bị công nghệ nên tốc độ quay và lượng tiến dao trong trường hợp mũi khoan không quay và mũi khoan quay có sự chênh lệch nhỏ. Trong đó, chế độ cắt khi khoan theo phương án mũi khoan quay được lựa chọn trên cơ sở tham chiếu kết quả công bố trước đây đối với trường hợp mũi khoan không quay [12]. Các kết quả phân tích, đánh giá cũng tập trung so sánh theo chế độ cắt hợp lý đã công bố khi khoan phương án mũi khoan không quay (n = 500 vòng/phút và f = 0,07 mm/vòng, điều kiện bôi trơn RQL bằng dung dịch nano).

3. Kết quả và thảo luận

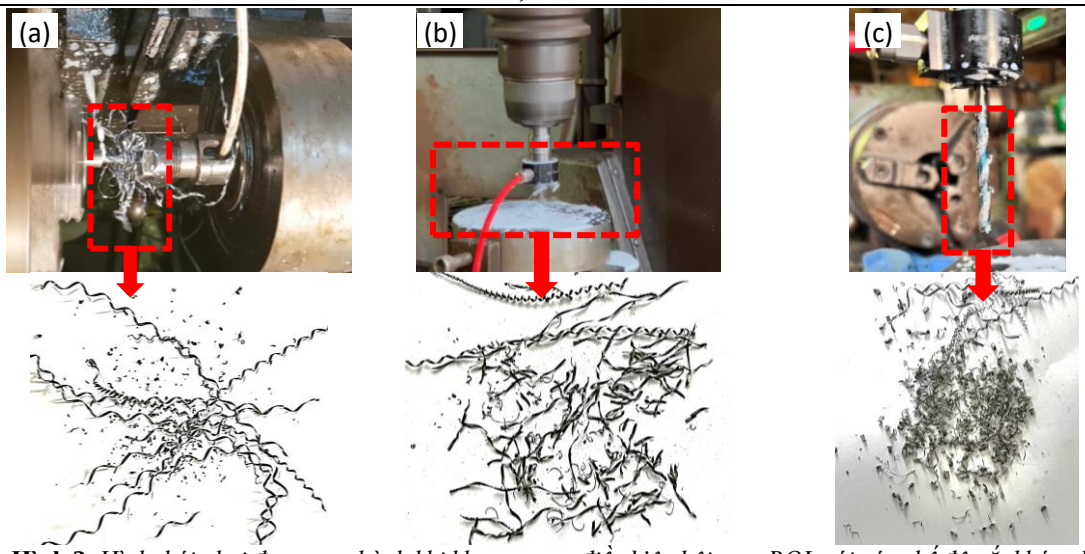
3.1. Thí nghiệm sơ bộ

Kết quả thí nghiệm sơ bộ về khả năng hoàn thành lỗ khoan được tổng hợp trong Bảng 1. Trong đó, chế độ gia công hoàn thành lỗ khoan ký hiệu là "✓", trường hợp không hoàn thành được ký hiệu là "×". Có thể nhận thấy, khi khoan trong điều kiện bôi trơn RQL bằng dung dịch nano graphene, tất cả các chế độ gia công theo cả hai phương án đều có thể hoàn thành lỗ khoan. Trong khi đó, sử dụng dung dịch emulsi thông thường với cùng điều kiện bôi trơn RQL như với dung dịch nano, quá trình khoan chỉ có thể hoàn thành lỗ ở chế độ cắt nhỏ. Với phương án mũi khoan không quay, mũi khoan gãy khi khoan ở lượng tiến dao *f* từ 0,07 mm/vòng trở lên. Khi khoan theo phương án mũi khoan quay, khả năng hoàn thành lỗ khoan chỉ có thể thực hiện ở tốc độ *n* nhỏ hơn 870 vòng/phút và lượng tiến dao *f* từ 0,06 mm/vòng trở xuống. Kết quả thí nghiệm sơ bộ có thể nhận định, so với dung dịch emulsi thông thường, việc sử dụng dung dịch nano với độ nhớt cao hơn nên có khả năng bôi trơn tốt hơn, qua đó giúp cải thiện khả năng thoát phoi, giảm kẹt phoi [14]. Do đó, dung dịch nano giúp tăng khả năng hoàn thành lỗ khoan, kể cả khi gia công ở chế độ cắt lớn.

Tuy vậy, giữa hai phương án khoan có sự khác biệt đáng kể về hình thái phoi tạo thành. Khi khoan theo phương án mũi khoan không quay, phoi tạo thành thường có dạng dây dài, quấn xung quanh mũi khoan ở cuối quá trình gia công (xem Hình 2.a). Ngược lại, phoi tạo thành theo phương án mũi khoan quay trong điều kiện bôi trơn RQL bằng dung dịch nano thường có dạng dây ngắn (Hình 2.b). Trong khi đó, với dung dịch emulsi thông thường, phoi tạo thành có xu hướng bị nghiền vụn khi chiều sâu lỗ khoan tăng lên (xem Hình 2.c).

Bảng 1. *Kết quả thí nghiệm sơ bộ về khả năng hoàn thành lỗ khoan*

Thứ tự	Chế độ cắt		Loại dung dịch trơn nguội	
	Tốc độ quay n (vòng/phút)	*Lượng chạy dao f (mm/vòng)*	*Nano*	*Emulsi thông thường*
A. Phương án khoan mũi khoan không quay (khoan trên máy tiện)				
1	300	0,05	✓	✓
2	550	0,05	✓	✓
3	300	0,07	✓	×
4	550	0,07	✓	×
5	300	0,09	✓	×
6	550	0,09	✓	×
B. Phương án khoan mũi khoan quay (khoan trên máy phay)				
1	430	0,04	✓	✓
2	610	0,04	✓	✓
3	870	0,04	✓	✓
4	430	0,06	✓	✓
5	610	0,06	✓	✓
6	870	0,06	✓	×
7	430	0,10	✓	×
8	610	0,10	✓	×
9	870	0,10	✓	×



Hình 2. *Hình thái phoi được tạo thành khi khoan trong điều kiện bôi trơn RQL với các chế độ cắt khác nhau:*
(a) mũi khoan không quay, n = 500 vòng/phút và f = 0,07 mm/vòng, dung dịch nano;
(b) mũi khoan quay, n = 610 vòng/phút và f = 0,06 mm/vòng, dung dịch nano;
(c) mũi khoan quay, n = 610 vòng/phút và f = 0,06 mm/vòng, dung dịch emulsi

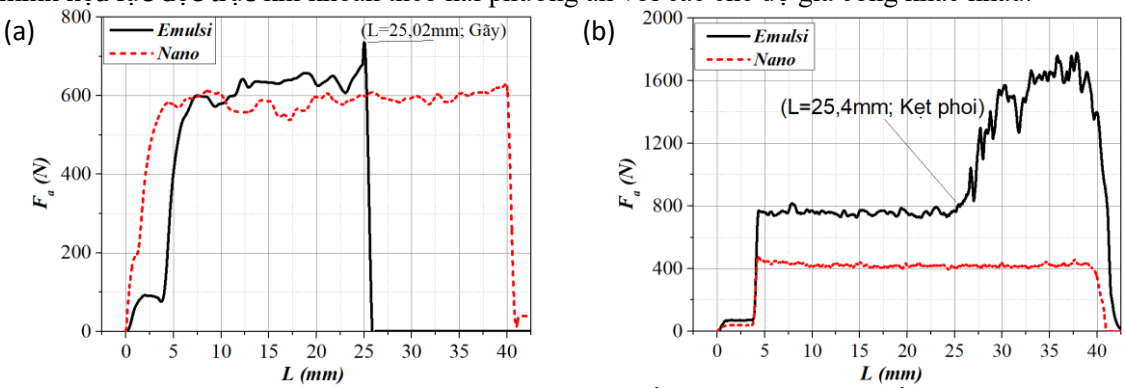
Nghiên cứu trước đây cho thấy, ứng suất kéo, nén phức tạp trong quá trình tạo phoi, thoát phoi là nguyên nhân gây ra hiệu ứng phoi răng cưa [15]. Khoảng cách răng cưa giảm khi sử dụng dung dịch trơn nguội nano so với khi sử dụng dung dịch trơn nguội thông thường. Khi khoan theo phương án mũi khoan không quay, do mũi nằm ngang, phoi được tạo ra mặc dù xuất hiện hiệu ứng răng cưa nhưng nằm trong lòng rãnh xoắn nên hầu như ít bị bẻ gãy mà chỉ bị đẩy thoát ra ngoài. Quá trình thoát ra phoi trong điều kiện bôi trơn bằng dung dịch nano dễ dàng hơn nên hiện tượng kẹt phoi ít xảy ra. Trong khi đó, phoi được tạo thành khi khoan theo phương án mũi khoan quay sẽ nằm trong rãnh xoắn, quay cùng mũi khoan và chuyển động thoát ra ngoài theo phương thẳng đứng. Khi đó, ngoài ma sát cản trở chuyển động thoát ra ngoài, phoi còn chịu tác dụng của trọng lực cũng có xu hướng cản trở sự thoát phoi. Chuyển động phức tạp này kết hợp với hiệu ứng răng cưa của phoi khi khoan có thể là

nguyên nhân làm cho phoi dễ bị gãy hơn so với phương án mũi khoan không quay. Khi khoan trong điều kiện bôi trơn RQL bằng dung dịch nano, cản trở do ma sát nhỏ hơn nên phoi thoát ra ngoài dễ dàng hơn. Ngoài ra, chiều dài phoi bị bẻ gãy hợp lý hơn là nguyên nhân phoi không bám dính lên mũi khoan. Trong khi đó, sử dụng dung dịch emulsi thông thường, do khả năng bôi trơn kém hơn nên phoi không thoát kịp ra ngoài khi tăng chiều sâu lỗ. Vì vậy, chúng có xu hướng bị nghiền vụn, bám dính trên rãnh thoát phoi, gây kẹt phoi, có thể phá hủy mũi khoan khi chế độ cắt tăng.

3.2. So sánh, đánh giá hiệu quả quá trình khoan lỗ sâu

3.2.1. So sánh về lực dọc trục

Khả năng thoát phoi có thể đánh giá định lượng qua lực dọc trục nhận được khi khoan. Hình 3 minh họa lực dọc trục khi khoan theo hai phương án với các chế độ gia công khác nhau.

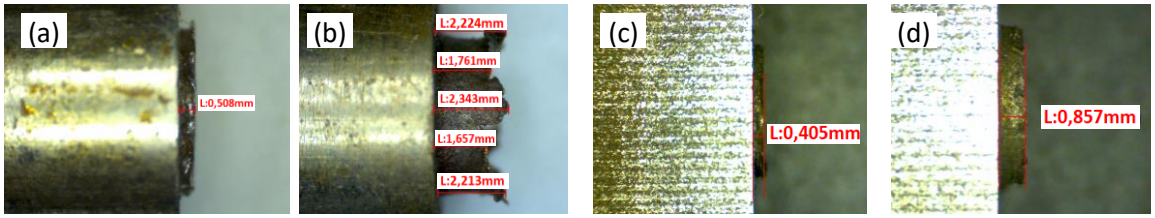


Hình 3. *So sánh lực dọc trục nhận được khi khoan trong điều kiện bôi trơn RQL bằng hai loại dung dịch emulsi và nano: (a) mũi khoan không quay, n = 500 vòng/phút và f = 0,07 mm/vòng; (b) mũi khoan quay, n = 610 vòng/phút và f = 0,06 mm/vòng*

Hình 3 cho thấy, lực dọc trục khi khoan trong điều kiện bôi trơn RQL bằng dung dịch emulsi (đường liền màu đen) có xu hướng gia tăng đột ngột khi chiều sâu đạt khoảng 25mm (tương ứng khi L/D ≈ 5). Điều này có thể là do hiện tượng kẹt phoi xảy ra. Hiện tượng kẹt phoi làm gãy mũi khoan khi khoan theo phương án mũi khoan không quay. Trong khi đó, với phương án mũi khoan quay, quá trình phoi bị nghiền vụn (xem Hình 2.c) có thể là nguyên nhân làm cho mũi khoan không bị gãy. Hình 3 cũng cho thấy, lực dọc trục thu được khi bôi trơn RQL bằng dung dịch nano (đường nét đứt, màu đỏ) trong trường hợp mũi khoan quay nhỏ hơn, ổn định hơn so với trường hợp mũi khoan không quay. Rõ ràng, hiện tượng phoi bị bẻ gãy với chiều dài khá hợp lý khi mũi khoan quay bôi trơn RQL bằng dung dịch nano giúp cải thiện khả năng thoát phoi, giảm hiện tượng kẹt phoi là nguyên nhân giúp giảm lực dọc trục thoát phoi. Đây cũng là nguyên nhân giúp lực dọc trục ổn định hơn và nhỏ hơn so với phương án mũi khoan không quay.

3.2.2. So sánh về ba via hình thành cuối lỗ khoan

Hình 4 trình bày kết quả xác định chiều cao ba via ở cuối lỗ khoan nhận được khi khoan ở các chế độ gia công khác nhau. Ba via khi khoan trong điều kiện bôi trơn RQL bằng dung dịch nano (xem Hình 4.a và c) thấp hơn đáng kể so với khi sử dụng dung dịch emulsi thông thường (xem Hình 4.b và d). Nguyên nhân có thể liên quan trực tiếp đến khả năng bôi trơn dẫn đến thoát phoi kém hơn của dung dịch emulsi, làm cho phoi điền đầy rãnh thoát khi chiều sâu lỗ khoan tăng lên. Ở thời điểm mũi khoan thoát ra khỏi lỗ, hiện tượng đùn vật liệu chiếm ưu thế mạnh hơn so với sự bóc tách vật liệu để tạo phoi, dẫn đến việc tạo ra các ba via với chiều cao lớn hơn. Bên cạnh đó, so với chiều cao ba via nhận được ở chế độ cắt hợp lý khi mũi khoan không quay (xem Hình 4.a), kết quả nhận được khi khoan theo phương án mũi khoan quay ở chế độ cắt gần tương đồng (xem Hình 4.c) nhỏ hơn đáng kể. Rõ ràng, khoan trong điều kiện mũi khoan quay có tác dụng bẻ phoi tốt hơn, cải thiện điều kiện gia công, từ đó giảm chiều cao ba via.

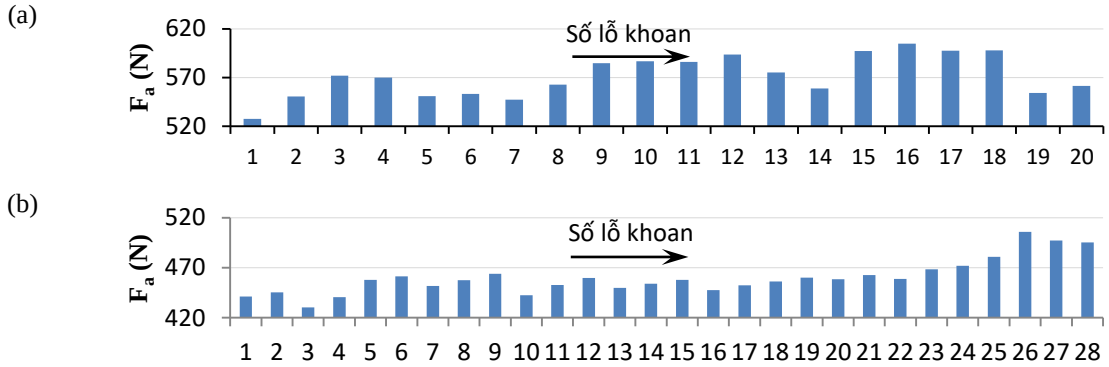


Mũi khoan không quay | Mũi khoan không quay | Mũi khoan quay | Mũi khoan quay

Hình 4. *So sánh chiều cao ba via ở các chế độ gia công khác nhau: (a) n = 500 vòng/phút và f = 0,07 mm/vòng, dung dịch nano; (b) n = 500 vòng/phút và f = 0,05 mm/vòng, dung dịch emulsi; (c) n = 610 vòng/phút và f = 0,06 mm/vòng, dung dịch nano; (d) n = 610 vòng/phút và f = 0,06 mm/vòng, dung dịch emulsi*

3.2.3. So sánh số lượng lỗ khoan được và biến động lực dọc trục giữa các lỗ khoan

Ở chế độ cắt hợp lý (n = 550 vòng/phút và f = 0,07 mm/vòng), một mũi khoan mới có thể khoan liên tục 20 lỗ khi khoan theo phương án mũi khoan không quay [12]. Với phương án mũi khoan quay, khi thực hiện ở chế độ cắt tương đồng (n = 610 vòng/phút và f = 0,06 mm/vòng), kết quả cho thấy một mũi khoan mới có thể khoan liên tục 28 lỗ. Biến động lực dọc trục ghi được theo từng lỗ khi khoan của hai phương án này được thể hiện trên Hình 5.



Hình 5. *Lực dọc trục khi khoan liên tục trong điều kiện bôi trơn RQL bằng dung dịch nano: (a) mũi khoan không quay, gia công ở chế độ cắt hợp lý n = 500 vòng/phút và f = 0,07 mm/vòng; (b) mũi khoan quay, gia công ở chế độ cắt n = 610 vòng/phút và f = 0,06 mm/vòng*

Kết quả từ Hình 5 cho thấy, lực dọc trục khi mũi khoan không quay lớn hơn khoảng 20% so với khi mũi khoan quay. Rõ ràng, việc phoi bị bẻ gãy phù hợp giúp cải thiện điều kiện thoát phoi, qua đó giúp quá trình khoan ổn định hơn và giảm lực dọc trục. Rõ ràng, sự ổn định khi khoan theo phương án mũi khoan quay giúp cho lực dọc trục ít biến động hơn giữa các lỗ khoan, nghĩa là mài mòn dụng cụ ít hơn.

4. Kết luận

So sánh hiệu quả khoan lỗ sâu trên thép không gỉ SUS 304 giữa hai phương án: mũi khoan quay và mũi khoan không quay, dưới điều kiện bôi trơn tưới tràn giảm thiểu đã được thực hiện. Kết quả thực nghiệm cho thấy, dung dịch trơn nguội trộn hạt nano graphene có khả năng cải thiện đáng kể hiệu quả thoát phoi, góp phần cải thiện khả năng gia công. So sánh giữa hai phương án khoan cho thấy, phương án mũi khoan quay đạt hiệu quả vượt trội về khả năng bẻ phoi, lực cắt dọc trục ổn định, chiều cao ba via thấp hơn và tuổi bền dụng cụ cao hơn. Những kết quả này cho thấy tiềm năng ứng dụng thực tiễn của phương án mũi khoan quay kết hợp với dung dịch nano trong gia công lỗ sâu vật liệu khó gia công cắt gọt.

Các nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào tối ưu hóa chế độ khoan khi mũi khoan quay nhằm giảm mòn dụng cụ và tăng số lượng lỗ khoan. Đồng thời, cần đánh giá ảnh hưởng của thông số cắt đến chất lượng hình học lỗ khoan như độ trụ, độ tròn và độ chính xác đường kính.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] M. Tolouei-Rad and M. Aamir, "Analysis of the Performance of Drilling Operations for Improving Productivity," in *Drilling Technology*, M. Tolouei-Rad, Ed.: IntechOpen, 2021, pp. 1-15, doi: 10.5772/intechopen.96497.

[2] A. Eltaggaz and I. Deiab, "Comparison of between direct and peck drilling for large aspect ratio in Ti-6Al-4V alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 2797-2805, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03314-z.

[3] M. L. Polli and M. J. Cardoso, "Effects of process parameters and drill point geometry in deep drilling of SAE 4144M under MQL," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, 2018, Art. no. 137, doi: 10.1007/s40430-018-1062-3.

[4] C. Han, D. Zhang, M. Luo, and B. Wu, "Chip evacuation force modelling for deep hole drilling with twist drills," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, pp. 3091-3103, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2488-6.

[5] S. Tamura and T. Matsumura, "Cutting process in non-step drilling of deep hole with tool wear progress," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 18, no. 4, 2024, doi: 10.1299/jamdsm.2024jamdsm0045.

[6] S. H. R. Heinemann, G. Barrow, and G. Petuelli, "The Performance of Small Diameter Twist Drills in Deep-Hole Drilling," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 128, pp. 884-892, 2006, doi: 10.1115/1.2335859.

[7] T. Aized and M. Amjad, "Quality improvement of deep-hole drilling process of AISI D2," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, pp. 2493-2503, 2013, doi: 10.1007/s00170-013-5178-4.

[8] T.-D. Hoang, Q.-H. Ngo, N.-H. Chu, T.-H. Mai, T. Nguyen, K.-T. Ho, *et al.*, "Ultrasonic assisted nano-fluid MQL in deep drilling of hard-to-cut materials," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 37, pp. 712-721, 2021, doi: 10.1080/10426914.2021.1981936.

[9] N.-H. Chu and V. Q. Vu, "Torque evaluation in ultrasonic-assisted deep hole drilling of AISI-304 stainless steel," *Machining Science and Technology*, vol. 29, pp. 623-652, 2025, doi: 10.1080/10910344.2025.2513032.

[10] D. A. Stephenson, E. Hughey, and A. A. Hasham, "Air flow and chip removal in minimum quantity lubrication drilling," *Procedia Manufacturing*, vol. 34, pp. 335-342, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.171.

[11] A. Baumann, E. Oezkaya, D. Schnabel, D. Biermann, and P. Eberhard, "Cutting-fluid flow with chip evacuation during deep-hole drilling with twist drills," *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 89, pp. 473-484, 2021, doi: 10.1016/j.euromechflu.2021.07.003.

[12] T.-D. Hoang, T.-H. Mai, and V.-D. Nguyen, "Enhancement of Deep Drilling for Stainless Steels by Nano-Lubricant through Twist Drill Bits," *Lubricants*, vol. 10, 2022, Art. no. 173, doi: 10.3390/lubricants10080173.

[13] A. Kumar, R. Sharma, S. Kumar, and P. Verma, "A review on machining performance of AISI 304 steel," *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 2945-2951, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.003.

[14] S. Hu, C. Li, Z. Zhou, B. Liu, Y. Zhang, M. Yang, *et al.*, "Nanoparticle-enhanced coolants in machining: mechanism, application, and prospects," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 18, 2024, Art. no. 53, doi: 10.1007/s11465-023-0769-8.

[15] H. Hegab, H. A. Kishawy, M. H. Gadallah, U. Umer, and I. Deiab, "On machining of Ti-6Al-4V using multi-walled carbon nanotubes-based nano-fluid under minimum quantity lubrication," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, pp. 1593-1603, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2028-4.