



NGHIÊN CỨU THỬ NGHIỆM ẢNH HƯỞNG CỦA KẾT CẤU VI MÔ BỀ MẶT ĐẾN ĐẶC TÍNH MA SÁT - MÒN VÀ HIỆU SUẤT VẬN HÀNH CỦA BƠM PIT TÔNG HƯỚNG TRỤC KIỂU ĐĨA NGHIÊNG

Xu Ping¹, Luo Jing¹, Lê Văn Lợi^{1,2,*}

¹Trường Đại học Kỹ thuật Liêu Ninh, 88 Yulong, Fuxin, Liaoning, Trung Quốc

²Viện Cơ khí Năng lượng và Mỏ - Vinacomin, 565 Nguyễn Trãi, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 02/5/2025

Ngày nhận bài sửa: 20/7/2025

Ngày chấp nhận đăng: 05/8/2025

^{1,2,*}Tác giả liên hệ:

Email: loile.iemm@gmail.com

TÓM TẮT

Trong bối cảnh yêu cầu nâng cao hiệu suất vận hành và tuổi thọ của các thiết bị cơ khí-thủy lực ngày càng trở nên cấp thiết, việc nghiên cứu các giải pháp nhằm giảm thiểu tổn thất do ma sát-mòn và nâng cao hiệu quả bôi trơn trong các cặp ma sát làm việc dưới tải trọng lớn, áp suất cao và tốc độ cao là vấn đề mang tính cấp thiết. Trên thế giới, giải pháp tạo kết cấu vi mô (micro-texture) trên bề mặt các cặp ma sát đã trở thành một bước tiến đột phá trong lĩnh vực ma sát học. Các cấu trúc vi mô như rãnh nhỏ, hố lõm, lồi hoặc các kết cấu đặc biệt khác có khả năng cải thiện đáng kể hiệu quả bôi trơn, giảm hệ số ma sát và mòn. Các dạng kết cấu vi mô như rãnh nhỏ, hố lõm, lồi hoặc hình dạng đặc thù đã được áp dụng thành công tại nhiều quốc gia như Hoa Kỳ, Áo, Thổ Nhĩ Kỳ, Nga và đặc biệt là Trung Quốc, giúp giảm hệ số ma sát tới 20%, kéo dài tuổi thọ chi tiết từ 15% đến 35%, đồng thời tiết kiệm năng lượng và giảm chi phí bảo trì. Bài báo trình bày nghiên cứu thử nghiệm nhằm đánh giá hiệu quả ứng dụng thực tế ảnh hưởng của kết cấu vi mô trong việc cải thiện hiệu suất ma sát-mòn và bôi trơn của bơm pit tông hướng trục kiểu đĩa nghiêng, góp phần làm rõ vai trò của kỹ thuật tạo hình kết cấu vi mô bề mặt trong việc giảm thiểu ma sát-mòn, kiểm soát trạng thái bôi trơn và nâng cao hiệu quả tổng thể của thiết bị thủy lực. Kết quả nghiên cứu không chỉ cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng kết cấu vi mô vào các thiết bị thủy lực, mà còn mở ra tiềm năng triển khai trong các hệ thống cơ khí - năng lượng hoạt động trong điều kiện khắc nghiệt, đặc biệt là trong ngành công nghiệp khai khoáng và công nghiệp nặng tại Việt Nam.

Từ khóa: kết cấu vi mô, ma sát - mòn, bôi trơn, rò.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh yêu cầu nâng cao hiệu suất vận hành và kéo dài tuổi thọ cho các thiết bị cơ khí-thủy lực ngày càng trở nên cấp thiết, việc giảm thiểu tổn thất do ma sát và mòn trong các cặp ma sát làm việc dưới điều kiện tải trọng lớn, tốc độ cao, áp suất cao là một trong những thách thức lớn đối với ngành kỹ thuật cơ khí hiện nay. Theo Holmberg và cộng sự [4], riêng các ngành công nghiệp lớn, tổn thất năng lượng do ma sát chiếm trung bình (20÷25)% tổng năng lượng đầu vào, trong đó tổn hao do ma sát hệ thống truyền động cơ khí lên tới (30÷40)% năng lượng. Theo Guo P. và cộng sự [5], tuổi thọ trung bình của các chi tiết ma sát (bạc trượt,

@ Hội Khoa học và Công nghệ Mỏ Việt Nam ổ lăn, pit tông, xy lanh, ...) có thể giảm đến (35 ÷ 45)% khi bị ảnh hưởng bởi mòn và rò, làm tăng gấp đôi tần suất sửa chữa, bảo dưỡng so với thiết bị sử dụng công nghệ kiểm soát ma sát tiên tiến. Bên cạnh đó, tình trạng rò lưu chất qua các khe hở mòn trên bề mặt tiếp xúc cũng dẫn đến giảm hiệu suất tổng thể của thiết bị. Thống kê của Lugt (2016) [6], trong các hệ thống thủy lực thiết bị mỏ, lưu lượng rò có thể chiếm (10÷20)% tổng lưu lượng bơm ra, trực tiếp làm giảm áp suất vận hành, tăng tiêu thụ nhiên liệu và nguy cơ mất an toàn. Ngoài ra, theo nghiên cứu của Kenneth Holmberg (2017) [7], các tổn thất năng lượng do ma sát và rò nếu không được kiểm soát có thể làm giảm tuổi thọ của



toàn hệ thống thiết bị mỏ và năng lượng xuống chỉ còn 50÷70% so với thiết kế ban đầu.

Trong hơn hai thập kỷ qua, các nghiên cứu về kết cấu bề mặt (surface texture- “vân”, “hoa vân” bề mặt) ma sát đã đạt được nhiều tiến bộ trong cải thiện khả năng chống mài mòn chi tiết máy (dụng cụ gia công, cặp ma sát trong máy), và cải thiện tính năng bôi trơn, làm kín của các thiết bị cơ khí. Tuy nhiên, cùng với sự phát triển mạnh mẽ của khoa học kỹ thuật, môi trường làm việc của các hệ thống ma sát (cặp ma sát) trong các thiết bị cơ khí cũng khắc nghiệt hơn: nhiệt độ, áp suất cao; ăn mòn; oxy hóa mạnh, ... Trong điều kiện làm việc như vậy, các phương pháp bôi trơn và giảm ma sát truyền thống đã không còn phù hợp. Tạo kết cấu bề mặt tức là tạo các “vân”, “hoa vân” với hình dạng với kích thước nhất định trên bề mặt cặp ma sát. Các “hoa vân”, “vân” bề mặt có kích thước rất nhỏ, cho nên kết cấu bề mặt này còn được gọi là kết cấu vi mô bề mặt. Đây cũng là một trong những phương pháp hiệu quả để nâng cao khả năng chịu lực bề mặt, cải thiện đặc tính ma sát bề mặt và kéo dài thời gian sử dụng của cặp ma sát. Bơm pit tông hướng trục kiểu đĩa nghiêng là một loại bơm sử dụng nhiều, nhưng chưa có nghiên cứu nào tiến hành đánh giá toàn diện hiệu quả ma sát - mòn, hình thái bề mặt sau mài mòn, cũng như ảnh hưởng của kết cấu vi mô đến hiệu suất vận hành thực tế của bơm.

Xuất phát từ thực tiễn trên, nghiên cứu này tiến hành thử nghiệm trên cặp bạc trượt của bơm pit tông hướng trục kiểu đĩa nghiêng, sử dụng dạng kết cấu vi mô dạng elip parabol lệch (EOOPT-Elliptical Opening Offset Parabola Micro-Texture). Mục tiêu là đánh giá sự thay đổi đặc tính ma sát - mòn thông qua quan sát hình thái bề mặt sau mài mòn, đồng thời phân tích hiệu suất vận hành của bơm. Kết quả nghiên cứu không chỉ cung cấp cơ sở dữ liệu thực nghiệm, nhằm kiểm chứng, đánh giá hiệu quả và tiềm năng ứng dụng kết cấu vi mô trong giảm thiểu tổn thất năng lượng do ma sát-mòn, kiểm soát bôi trơn cặp ma sát bạc trượt, mà còn mở ra hướng ứng dụng công nghệ kết cấu vi mô vào các thiết bị cơ khí-thủy lực trong lĩnh vực công nghiệp mỏ và năng lượng tại Việt Nam.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Trong khuôn khổ nghiên cứu này, nhóm tác giả trình bày một phần kết quả phân tích lý thuyết và quá trình thử nghiệm đánh giá ảnh hưởng của kết cấu vi mô đối với đặc tính của cặp bạc trượt trong bơm pit tông hướng trục, nhằm làm rõ hiệu quả của kỹ thuật này trong việc giảm ma sát và nâng cao khả năng bôi trơn.

2.1. Lý thuyết ảnh hưởng của kết cấu vi mô đối với đặc tính ma sát và bôi trơn

Đối tượng nghiên cứu là cặp bạc trượt của bơm pit tông hướng trục kiểu đĩa nghiêng 10SCY14-1B. Phân tích được thực hiện trong điều kiện giả định bôi trơn thủy động học hoàn toàn, bỏ qua hiệu ứng xâm thực, coi dầu thủy lực là chất lỏng Newton không nén với độ nhớt không đổi. Khi bỏ qua áp lực thể tích, phương trình Navier-Stokes được sử dụng để mô tả dòng chảy bôi trơn [1÷3].

Thông qua giải các phương trình dòng chảy của bạc trượt, có thể thu được hiệu suất ma sát mòn và hiệu quả bôi trơn của màng dầu cặp ma sát như sau [3]:

$$\mu_{ms} = \frac{F_{ms}}{W_{TB}} = \frac{\iint_{\Omega} \Pi_{x,y} dx dy}{\iint_{\Omega} p_{x,y} dx dy}$$

(1)

$$Q_{rl} = \iint_S \vec{V} dx dy$$

(2)

trong đó: W_{TB} là áp lực chịu tải, Pa; $p_{x,y}$ là áp lực chịu tải tại điểm, Pa; Ω là diện tích tiếp xúc trực tiếp mm^2 ; F_{ms} là lực ma sát, N; $\Pi_{x,y}$ là ứng suất cắt của màng dầu, Pa; S là diện tích màng dầu, mm^2 ; Q_{rl} là lượng rò, mL/min; $\vec{V}$ là vector tốc độ dầu bôi trơn, m/s.

2.2. Lý thuyết tính toán hiệu suất bơm

Hiệu suất của bơm pit tông hướng trục kiểu đĩa nghiêng được xác định thông qua mối quan hệ giữa lưu lượng lý thuyết, lưu lượng thực tế và các dạng tổn thất phát sinh trong quá trình làm việc. Về nguyên tắc, bơm thủy lực lý tưởng sẽ biến đổi hoàn toàn năng lượng cơ học từ trục dẫn động thành năng lượng thủy lực của dòng chất lỏng mà không xảy ra tổn thất. Tuy nhiên, trong thực tế, luôn tồn tại các dạng tổn thất như rò nội tại, biến dạng đàn hồi chi tiết, ma sát và các yếu tố thủy động học khác, làm cho lưu lượng thực tế nhỏ hơn lưu lượng lý thuyết.

Lưu lượng lý thuyết của bơm pit tông hướng trục kiểu đĩa nghiêng được tính theo công thức:

$$Q_{LT} = q_{LX} \cdot n, \quad L/min$$

(3)

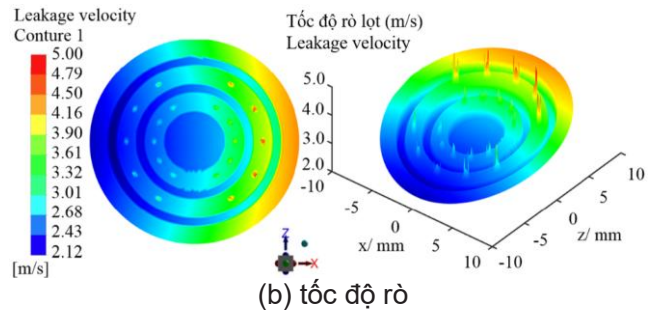
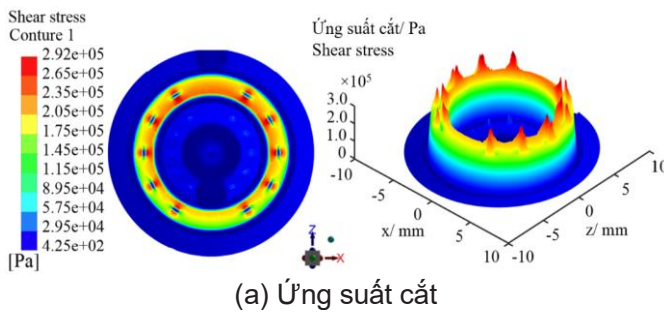


Trong đó: Q_{LT} là Lưu lượng lý thuyết, (L/min); q_{LX} là lưu lượng đơn vị tính cho 1 vòng quay, mL/r; n là tốc độ quay của trục bơm, r/min.

Lưu lượng thực tế (Q_{TT}) được đo trực tiếp bằng lưu lượng kế tại các mức áp suất làm việc khác nhau. Thông số này sẽ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố rò nội tại (internal leakage) do khe hở mòn, độ nhám bề mặt, và hiệu quả bôi trơn của màng dầu. Hiệu suất thể tích phản ánh tỷ lệ giữa lưu lượng thực tế và lưu lượng lý thuyết, được xác định theo công thức:

$$\eta_{TT} = \frac{Q_{TT}}{Q_{LT}} \cdot 100\%$$

(4)



Hình 1. Kết quả mô phỏng hiệu suất ma sát mòn và bôi trơn màng dầu

Căn cứ công thức (1)~(2) kết hợp kết quả mô phỏng CFD tính toán được hệ số ma sát, lưu lượng rò lần lượt là 0,00452; 32,05mL/min. So với cặp ma sát không có kết cấu vi mô, hệ số ma sát giảm 22,47% và lượng rò giảm 12,03% [3].

2.4. Thử nghiệm hiệu suất ma sát-mòn và bôi trơn

2.4.1. Chuẩn bị mẫu thử

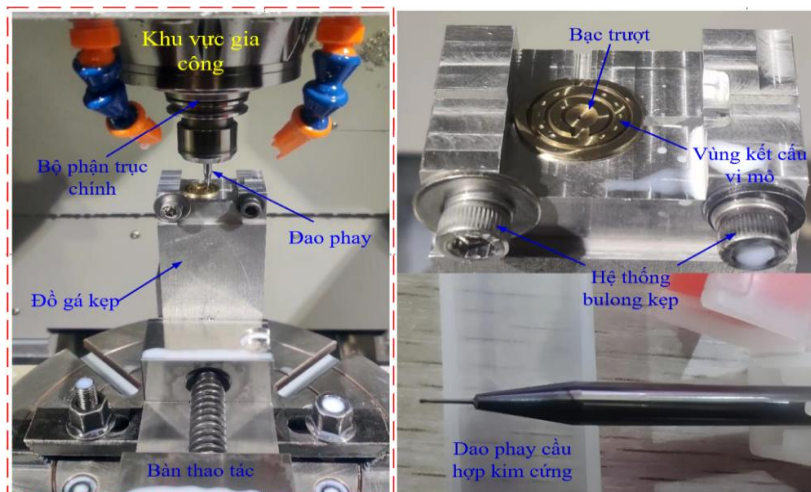
Dựa trên kết quả nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng theo điều kiện làm việc thực tế của thiết bị,

Trong đó: η_{TT} là hiệu suất thực tế tính toán tại mức áp suất thử nghiệm, %; Q_{TT} là Lưu lượng thực đo được từ thiết bị tại mức áp suất thử nghiệm, L/min.

2.3. Nghiên cứu đặc tính ma sát mòn và hiệu suất bôi trơn

Dựa trên các tham số đặc trưng tối ưu thu được trong quá trình tối ưu hóa, một mô hình màng dầu cặp bạc trượt với EOOPT đã được tái thiết lập và tiến hành phân tích mô phỏng dòng chảy thông qua CFD, các bước tiến hành được thực hiện [1][3]. Kết quả mô phỏng thu được các biểu đồ phân bố ứng suất cắt, tốc độ rò dòng chảy, được thể hiện tại Hình 1.

nhóm nghiên cứu đã lựa chọn thiết kế kết cấu vi mô EOOPT với các tham số hình học và phân bố tối ưu lần lượt ($A = 300 \mu\text{m}$; $B = 150 \mu\text{m}$; $C = 40 \mu\text{m}$; $D = 50 \mu\text{m}$; $E = 32^\circ$; $F = 28,75^\circ$) và tiến hành chế tạo mẫu thử trên bề mặt bạc trượt. Quá trình gia công được thực hiện trên thiết bị gia công chính xác 5 trục SmartCNC500E-DRTD, cho phép tạo hình chính xác các biên dạng vi mô với độ lặp lại cao, đảm bảo đồng đều hóa cấu trúc bề mặt theo thiết kế mô phỏng (Hình 2) [3].



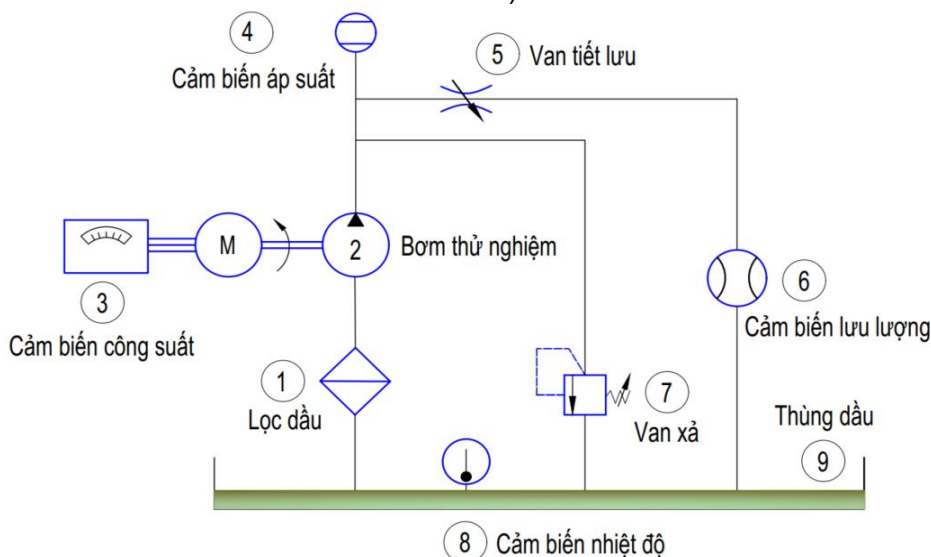
Hình 2. Hình ảnh gá đặt và gia công hố lõm vi mô EOOPT trên bạc trượt



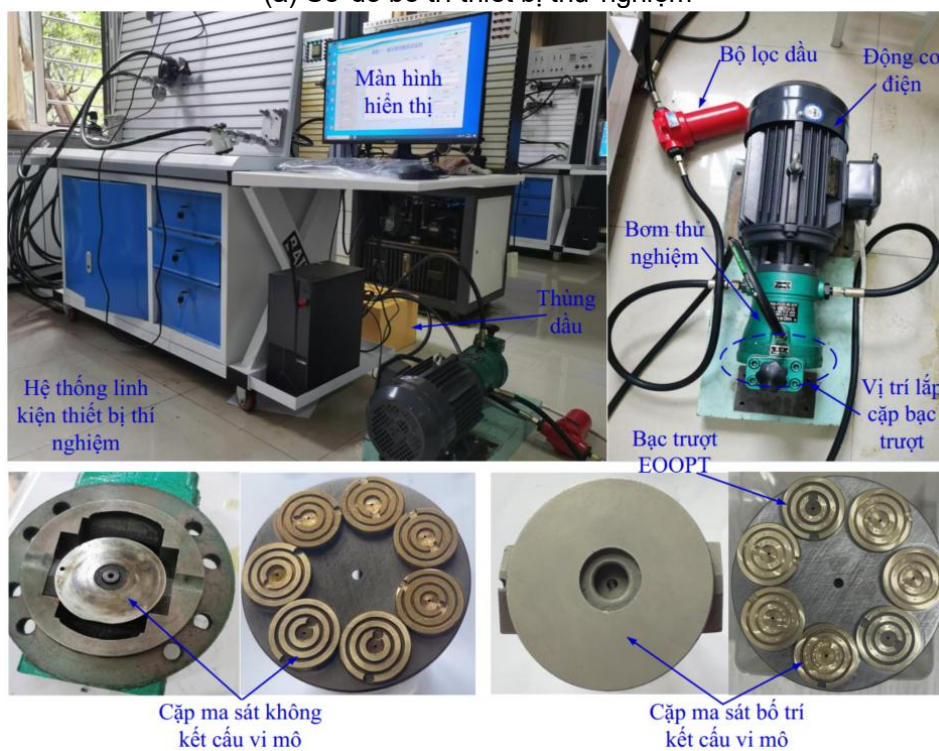
2.4.2. Thiết lập hệ thống thử nghiệm

Để đánh giá ảnh hưởng của kết cấu vi mô EOOPT đến hiệu suất làm việc của cặp ma sát trong bơm pit tông hướng trục 10SCY14-1B, nhóm nghiên cứu đã xây dựng mô hình thử nghiệm hiệu suất bơm chuyên dụng, cho phép đo đạc các thông số vận hành trong điều kiện mô phỏng thực tế. Hệ thống thử nghiệm bao gồm bơm thử nghiệm được dẫn động bởi động cơ điện công suất ổn định mã hiệu YE2-112-4 ($P = 4,4 \text{ kW}$; $U = 220/380 \text{ V}$; $n =$

1440 r/min), tích hợp bộ lọc dầu, thùng dầu hồi và vị trí lắp cặp bạc trượt có thể thay thế linh hoạt giữa các mẫu thử. Thiết bị được kết nối với hệ thống hiển thị và ghi nhận dữ liệu tự động, bao gồm cảm biến đo lưu lượng, áp suất, nhiệt độ và mô-men xoắn, giúp theo dõi tức thời và chính xác các chỉ tiêu vận hành chính. Dữ liệu được hiển thị trực quan trên màn hình giám sát trung tâm, phục vụ cho quá trình phân tích, so sánh hiệu suất giữa các mẫu bạc trượt có và không có kết cấu vi mô (Hình 3).



(a) Sơ đồ bố trí thiết bị thử nghiệm



(b) hình ảnh hệ thống thử nghiệm và các mẫu thử

Hình 3. Mô hình thử nghiệm hiệu suất bơm với các cặp mẫu thử



2.5. Kết quả và phân tích thử nghiệm

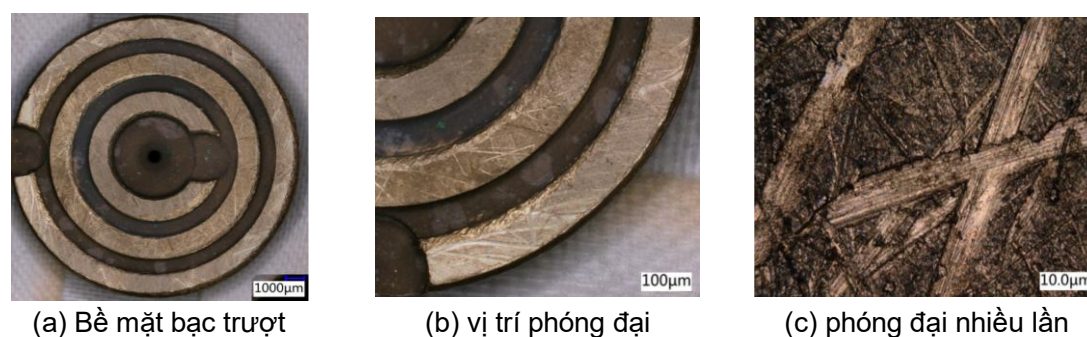
2.5.1. Kết quả và phân tích hiệu suất mài mòn

Để kiểm tra hình thái bề mặt của các bạc trượt trước và sau khi mài mòn, nhóm nghiên cứu đã sử dụng hệ thống kính hiển vi kỹ thuật số VHX-5000

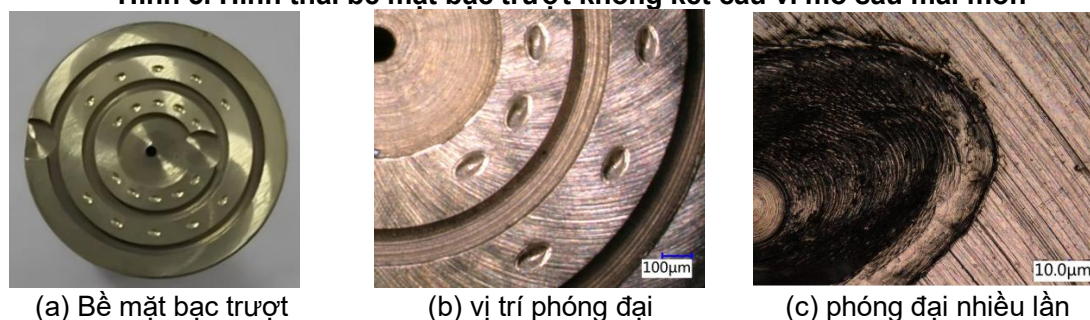
Keyence và kính hiển vi laser quét đồng tiêu OLS4000. Sau chu trình vận hành mài mòn, các mẫu bạc trượt được tháo ra, làm sạch sau đó thực hiện các bước đo kiểm, kết quả đo kiểm hình thái bề mặt các mẫu thử trước và sau mài mòn được trình bày tại Bảng 1, Bảng 2 và Hình 4 đến Hình 7.



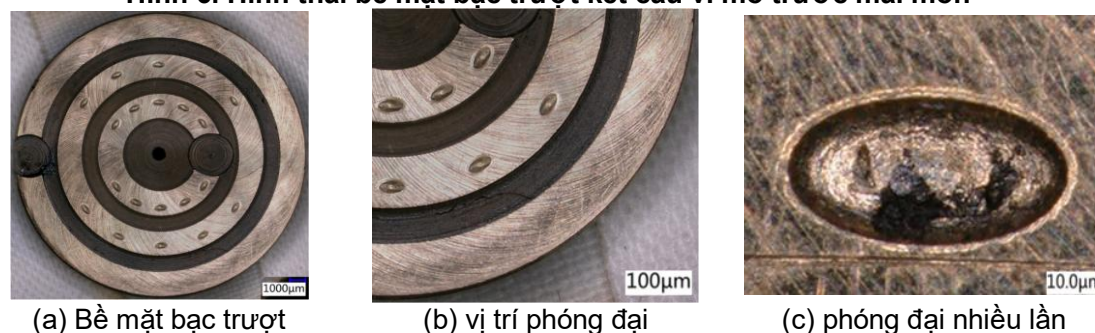
Hình 4. Hình thái bề mặt bạc trượt không kết cấu vi mô trước mài mòn



Hình 5. Hình thái bề mặt bạc trượt không kết cấu vi mô sau mài mòn



Hình 6. Hình thái bề mặt bạc trượt kết cấu vi mô trước mài mòn



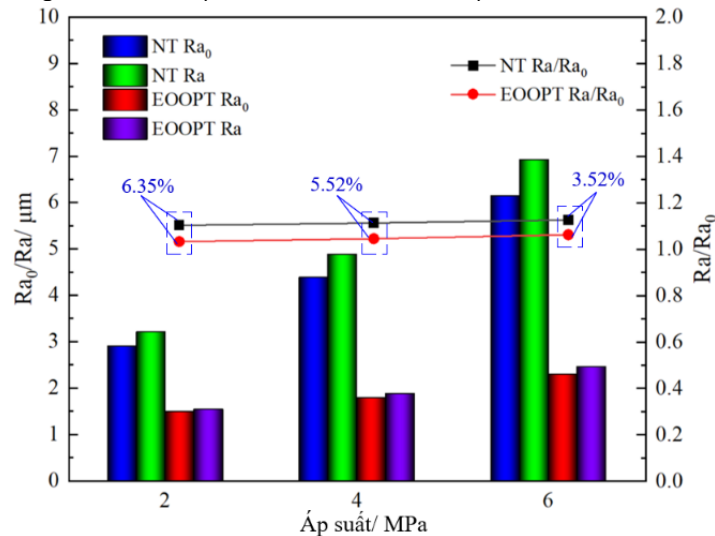
Hình 7. Hình thái bề mặt bạc trượt kết cấu vi mô sau mài mòn

Bảng 1. Độ nhám bề mặt các mẫu thử theo phương ngang



TT	Áp lực ($\times 10^6 \text{Pa}$)	Độ nhám bề mặt trước mài mòn $Ra_0/\mu\text{m}$		Độ nhám bề mặt sau mài mòn $Ra/\mu\text{m}$		Tỷ lệ trước và sau mài mòn Ra/Ra_0	
		NT	EOOPT	NT	EOOPT	NT	EOOPT
1	2	2,91	1,50	3,21	1,55	1,103	1,033
2	4	4,42	1,79	4,89	1,88	1,106	1,045
3	6	6,25	2,30	6,92	2,46	1,108	1,069

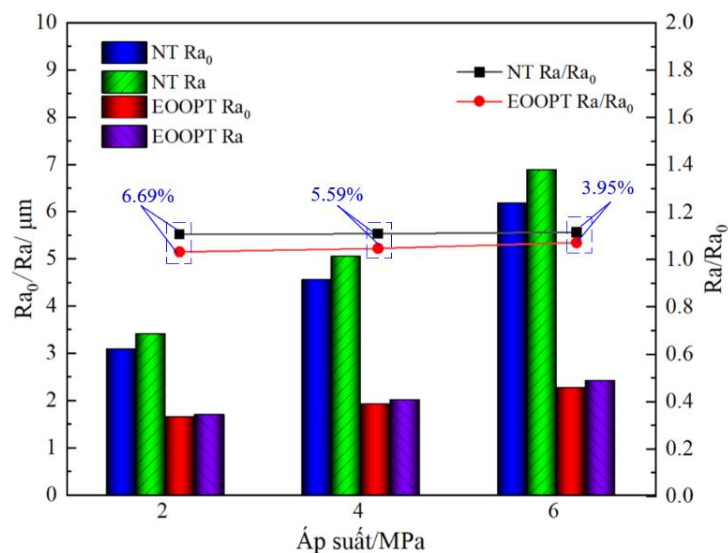
Ghi chú: NT- Bề mặt không vi cấu trúc (Non-Textured surface)



Hình 8. So sánh độ nhám bề mặt bạc trượt trước sau mài mòn theo phương ngang

Bảng 2. Độ nhám bề mặt các mẫu thử theo phương dọc

TT	Áp lực ($\times 10^6 \text{Pa}$)	Độ nhám bề mặt trước mài mòn $Ra_0/\mu\text{m}$		Độ nhám bề mặt sau mài mòn $Ra/\mu\text{m}$		Tỷ lệ trước sau mài mòn Ra/Ra_0	
		NT	EOOPT	NT	EOOPT	NT	EOOPT
1	2	3,09	1,66	3,42	1,71	1,106	1,032
2	4	4,56	1,93	5,06	2,02	1,109	1,047
3	6	6,18	2,27	6,89	2,43	1,115	1,071

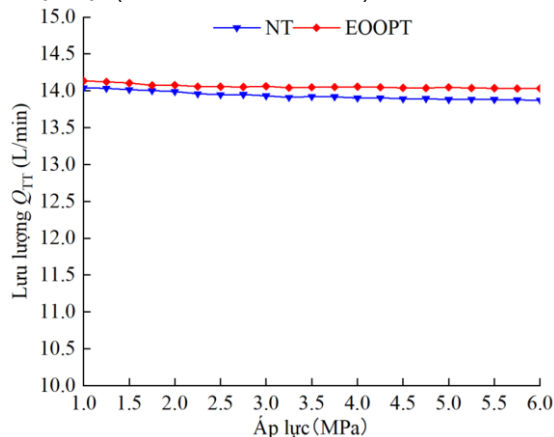


Hình 9. So sánh độ nhám bề mặt bạc trượt trước sau mài mòn theo phương dọc

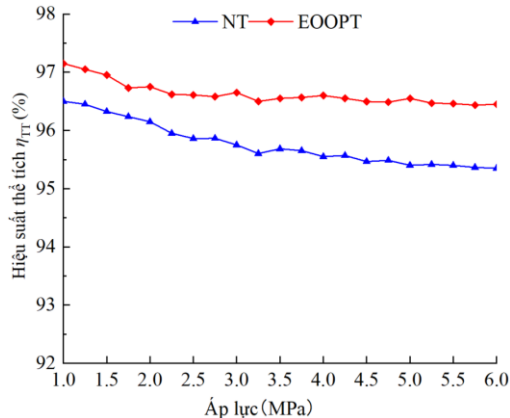


2.5.2. Kết quả và phân tích hiệu suất vận hành

Trong nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu tiến hành đo đặc và phân tích hai loại bơm pit tông hướng trục, một loại lắp bạc trượt nguyên mẫu (NT) và một loại lắp bạc trượt kết cấu vi mô tối ưu (EOOPT), ở khoảng áp suất thử nghiệm từ $(1 \times 10^6 \div 6 \times 10^6)$ Pa. Tiến hành đánh giá sự thay đổi lưu lượng đầu ra của bơm theo áp suất (đường đặc tính lưu lượng) và sự thay đổi hiệu suất thể tích theo áp suất (hiệu suất thể tích), kết quả được thể hiện tại (Hình 10 và Hình 11).



Hình 10. Đường đặc tính quan hệ giữa áp suất và lưu lượng



Hình 11. Mối quan hệ giữa áp lực-hiệu suất thể tích

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Thông qua quan sát (Hình 4 □ Hình 7), có thể nhận thấy hình thái bề mặt bạc trượt có những biến đổi rõ rệt trước và sau quá trình mài mòn. Ở trạng thái trước khi thử nghiệm mài mòn, mẫu bạc trượt không có vi cấu trúc (NT) và bạc trượt có kết cấu EOOPT đều thể hiện rõ các đặc trưng hình học với các rãnh và kết cấu bề mặt đồng đều, các hoa văn được phân bố ổn định và có độ bóng mịn nhất định. Điều này cho thấy các mẫu thử đáp ứng các yêu

cầu về chất lượng bề mặt kỹ thuật gia công (Hình 4, Hình 6).

Sau khi tiến hành thử nghiệm mài mòn, bề mặt của cả hai loại bạc trượt đều xuất hiện các vết trầy xước và tổn thương ở những mức độ khác nhau. Đáng chú ý, bạc trượt NT thể hiện rõ sự suy giảm chất lượng bề mặt hơn, với sự xuất hiện phổ biến của các vết xước ngang sâu, không đồng đều, làm giảm đáng kể độ nhẵn bóng và tính ổn định của bề mặt tiếp xúc (Hình 5). Ngược lại, bạc trượt EOOPT cho thấy mức độ tổn thương do mài mòn thấp hơn rõ rệt. Các vết trầy xước tập trung chủ yếu tại vùng các hố lõm vi mô, điều này chỉ ra rằng vi cấu trúc có vai trò quan trọng trong việc hạn chế sự lan rộng của các vết mài mòn, giúp duy trì tính toàn vẹn tương đối của bề mặt (Hình 7).

Từ Hình 6 và 7 có thể thấy, khi bơm pit tông hướng trục vận hành dưới cùng các thông số làm việc, dù xét theo phương ngang hay phương dọc thì tỷ lệ độ nhám bề mặt của bạc trượt EOOPT sau mài mòn so với trước mài mòn đều nhỏ hơn bạc trượt NT. Hiệu quả tích cực này xuất phát từ khả năng tạo ra hiệu ứng bôi trơn thủy động học và chức năng lưu giữ các hạt mài của hố lõm EOOPT được bố trí trên bề mặt bạc trượt. Các đặc tính này giúp duy trì màng dầu bôi trơn ổn định, từ đó hạn chế tiếp xúc trực tiếp giữa các bề mặt ma sát, giảm đáng kể hiện tượng mài mòn sinh ra do các hạt mài. Điều này một mặt đã xác minh tính đúng đắn của kết quả mô phỏng trước đó về hiệu suất ma sát giữa cặp bạc trượt có và không có kết cấu vi mô, mặt khác cũng tiếp tục khẳng định rằng: bạc trượt có kết cấu vi mô được thiết kế tối ưu có hiệu quả rõ rệt trong việc giảm ma sát, từ đó nâng cao hiệu suất cơ học tổng thể của bơm pit tông hướng trục.

Từ Hình 8 có thể nhận thấy rằng, cả bơm thử nghiệm sử dụng bạc trượt NT và bơm sử dụng bạc trượt EOOPT đều có xu hướng giảm lưu lượng khi áp suất vận hành tăng lên. Hiện tượng này được giải thích dựa trên cơ sở lý thuyết như sau: bề mặt đáy bạc trượt phải chịu ứng suất nén tỷ lệ thuận với áp suất làm việc, đồng thời cần thích ứng với tốc độ trượt tương đối phát sinh từ chuyển động quay của trục bơm. Khi một trong hai yếu tố áp suất hoặc tốc độ tăng, tổn thất công suất do ma sát tại bề mặt tiếp xúc cũng tăng theo và chuyển hóa thành nhiệt năng, gây ra hiện tượng gia tăng nhiệt độ bề mặt. Khi nhiệt độ bề mặt tăng cao, độ nhớt của dầu bôi trơn sẽ giảm, dẫn đến gia tăng rò, từ đó làm giảm lưu lượng tổng thể của bơm.

Trong điều kiện thử nghiệm nhận thấy, bơm sử dụng bạc trượt EOOPT có lưu lượng cao hơn so với bơm sử dụng bạc trượt NT ở cùng mức áp suất. Điều này chứng tỏ, trong quá trình chuyển động tương đối giữa bạc trượt và đĩa nghiêng, các hố



chứa dầu nhỏ trên bề mặt bạc trượt đã phát huy tác dụng tạo ra hiệu ứng áp lực động đáng kể. Hiệu ứng áp lực động này làm gia tăng áp suất chịu tải của màng dầu, đồng thời thúc đẩy sự biến dạng đàn hồi cục bộ của màng dầu, tạo ra vùng áp suất cao cục bộ, qua đó giảm đáng kể lượng rò và nâng cao lưu lượng dầu ra. Theo dữ liệu thu thập từ cảm biến đo lưu lượng, lưu lượng trung bình của bơm có kết cấu EOOPT dao động từ $14,03 \div 14,15$ L/min, cao hơn từ $0,78\% \div 1,15\%$ so với bơm mẫu thử NT $13,87 \div 14,04$ L/min.

Trong quá trình vận hành, bơm pit tông hướng trục phát sinh chủ yếu hai dạng tổn thất chính là tổn thất thể tích và tổn thất cơ học. Tổn thất thể tích xuất phát chủ yếu từ hiện tượng rò nội tại, trong khi tổn thất cơ học phát sinh từ năng lượng bị tiêu hao dưới dạng ma sát. Hiệu suất thể tích là chỉ số then chốt để đánh giá mức độ tổn thất rò bên trong bơm, phản ánh trực tiếp mức độ ổn định và hiệu quả hoạt động của bơm trong các điều kiện vận hành khác nhau (Hình 9).

Từ hình 9 có thể thấy, hiệu suất thể tích của 2 loại bơm thử nghiệm đều có xu hướng giảm khi áp suất thử nghiệm tăng lên, phù hợp với lý thuyết và thực tế vận hành khi gia tăng rò theo áp suất tăng dần. Dựa trên các kết quả thực nghiệm kết hợp công thức (3~4) tính toán thu được, hiệu suất thể tích của bơm thử nghiệm có kết cấu EOOPT đạt từ $96,45\% \div 97,15\%$, cao hơn so với bơm với NT đạt từ $95,35\% \div 96,5\%$ trong cùng điều kiện áp suất. Như vậy, hiệu suất thể tích của bơm có kết cấu EOOPT được nâng cao từ $0,65\% \div 1,1\%$ so với bơm với NT.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Lê Văn Lợi, Xu Ping, Yu Yinghua, Trần Văn Hiệp (2022). Ứng dụng phương pháp taguchi xám trong tối ưu hóa phân tích ảnh hưởng của kết cấu vi mô bề mặt đối với đặc tính ma sát-mòn cặp gối trượt-đĩa nghiêng trong bơm pit tông hướng trục. *Tạp chí Công nghiệp Mỏ*, số (6):38-49.
- [2]. Lê Văn Lợi, Xu Ping, Yu Yinghua, Nguyễn Duy Trung (2023). Quy luật ảnh hưởng của tham số kết cấu vi mô dạng đặc biệt đến hiệu suất ma sát của cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng bơm pit tông hướng trục và thiết kế tối ưu hóa tham số vi mô. *Hội nghị KHTQ về Cơ khí- Điện-Tự động hóa (MEAE-2023)*, 166-186.
- [3]. Le Van Loi (2024). Optimum design and performance analysis of special surface micro-texture slipper pair for swash plate axial pit tông pump. *Liaoning: Liaoning Technical University*.
- [4]. Holmberg. K & Erdemir. A. (2017). Influence of Tribology on Global Energy Consumption, *Costs and Emissions, Friction*, 5(3):263-284.
- [5]. Guo P., Yan Z., Xu J., Shen Y., et al (2024). Wear life prediction of pit tông ring and cylinder liner based on integration of experiment and bench test data. *Engineering Failure Analysis*, 161, 108259.
- [6]. Lug P. M., (2016). Modern advancements in lubricating grease technology. *Tribology international*, 97, 467-477.
- [7]. Kenneth Holmberg, Päivi Kivikytö-Reponen, Pirita Härkisaari, et al (2017). Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, 115, 116-139.
- [8]. Gachot.C, Rosenkranz.A, Hsu.S.M, Costa. H.L, (2017). A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement, *Wear*, 372-373, 21-41.

Kết quả này một lần nữa xác nhận tính chính xác của mô hình mô phỏng, trong dự báo lượng rò của bạc trượt với kết cấu EOOPT là thấp hơn so với bạc trượt NT. Hơn nữa, điều này khẳng định tính đúng đắn ứng dụng kết cấu vi mô trong việc giảm thiểu lượng rò màng dầu, từ đó nâng cao lưu lượng tổng thể của bơm.

Qua đây có thể khẳng định rằng bơm pit tông hướng trục sử dụng bạc trượt có kết cấu EOOPT thể hiện ưu thế hơn về lưu lượng dầu ra và hiệu suất thể tích so với bơm nguyên mẫu khi hoạt động trong cùng điều kiện. Điều này chứng minh một cách thuyết phục rằng việc ứng dụng EOOPT là giải pháp tối ưu nhằm giảm thiểu lượng rò, từ đó nâng cao hiệu quả tổng thể của bơm pit tông hướng trục.

4. KẾT LUẬN

➤ Kết quả nghiên cứu thực nghiệm đã khẳng định tính hiệu quả áp dụng kết cấu vi mô bề mặt trong việc cải thiện đặc tính làm việc của cặp ma sát trong bơm pit tông. Thông qua việc thiết kế, tối ưu hóa và ứng dụng dạng kết cấu EOOPT phù hợp, hiệu suất cặp ma sát đã được nâng cao rõ rệt, góp phần làm giảm tổn thất năng lượng, giảm mài mòn và tăng độ tin cậy trong quá trình vận hành;

➤ Kết quả tính toán được hiệu suất vận hành của bơm qua việc áp dụng kết cấu vi mô trên bề mặt cặp bạc trượt, từ đó cho thấy hoàn toàn có thể áp dụng cho các cặp ma sát còn lại của bơm pit tông để tiếp tục làm giảm thiểu hiệu suất ma sát hơn nữa, giúp gia tăng hiệu suất thể tích, từ đó làm gia tăng hiệu suất tổng thể của bơm pit tông □



- [9]. Shahzad A, Haque UU, Lazoglu I, (2022). Effect of the micro-textured pit tông on the performance of a hermetic reciprocating compressor. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 237(5):1107-1118.
- [10]. Xu Ping, Luo Jing, Dong L. P, Yuying Hua, et al (2024). Multi-objective optimization of parabolic micro-textures with elliptical openings for slipper pair of axial pit tông pumps, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 43(7):1189-1198.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE EFFECT OF SURFACE MICRO-TEXTURE ON FRICTION-WEAR CHARACTERISTICS AND OPERATIONAL PERFORMANCE OF SWASH PLATE AXIAL PISTON PUMP

Ping Xu¹, Jing Luo¹, Loi Van Le^{1,2,*}

¹Liaoning Technical University, 88 Yulong, Fuxin, Liaoning, China

²Vinacomin Institute of Energy and Mining Mechanical Engineering, 565 Nguyen Trai, Ha Noi, Vietnam

ARTICLE INFOR

TYPE: Research Article

Received: 02/8/2025

Revised: 18/9/2025

Accepted: 20/9/2025

^{1,2,*} Corresponding author:

Email: loile.iemm@gmail.com

ABSTRACT

In the context of the increasingly urgent demand for enhancing the operational efficiency and extending the service life of mechanical-hydraulic equipment, research into solutions that minimize friction- and wear-induced losses while improving lubrication performance in friction pairs operating under high load, high pressure, and high-speed conditions has become essential. Globally, the application of surface micro-texturing to friction pairs has emerged as a breakthrough in the field of tribology. Micro-textures such as micro-grooves, dimples, protrusions, and other specialized geometries have demonstrated a remarkable ability to improve lubrication effectiveness, reduce friction coefficients, and mitigate wear. These micro-texture designs have been successfully applied in several countries, including the United States, Austria, Turkey, Russia, and particularly China, achieving reductions in friction coefficient of up to 20%, extending component lifespan by 15%–35%, while also saving energy and lowering maintenance costs. This study presents an experimental investigation evaluating the practical effectiveness of micro-textures in improving the friction-wear performance and lubrication characteristics of a swash plate axial piston pump. The results contribute to clarifying the role of surface micro-texturing in reducing friction and wear, controlling lubrication regimes, and enhancing the overall efficiency of hydraulic equipment. The findings not only provide a scientific basis for applying micro-texture technology in hydraulic devices but also reveal its potential for deployment in mechanical and energy systems operating under harsh conditions, particularly in Vietnam's mining and heavy industries.

Keywords: micro-texture, friction and wear, lubrication, leakage.

@ Vietnam Mining Science and Technology Association