

TỐI ƯU HÓA THIẾT KẾ VÀ PHÂN TÍCH TÍNH NĂNG CẤU TRÚC VI MÔ ĐẶC BIỆT CỦA BỀ MẶT CẶP MA SÁT LÓT XY LANH-XÉC MĂNG ĐỘNG CƠ

Lê Văn Lợi, Zhu Huajie, Xu Ping, Yu Yinghua
Trường Đại học Kỹ thuật Liêu Ninh, Trung Quốc
Email:loi.iemm@gmail.com

TÓM TẮT

Để nghiên cứu các cấu trúc vi mô nâng cao hiệu suất cặp ma sát của động cơ ô tô, lựa chọn cặp ma sát lót xy lanh-xéc măng làm đối tượng nghiên cứu. Trong nghiên cứu, sử dụng lý thuyết quy hoạch thử nghiệm toàn phần (Central composite design- CCD), lý thuyết tối ưu hóa thiết kế bề mặt và phương pháp mô phỏng động học dòng chảy (Computational Fluid Dynamics –CFD) để nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số cấu trúc vi mô dạng parabol không đối xứng có cửa mở hình elip đến hệ số ma sát và khả năng chịu lực của cặp ma sát. Thiết lập mô hình toán học tương ứng và sử dụng thuật toán tối ưu hóa cá voi (Whale Optimization Algorithm -WOA) để thực hiện tối ưu hóa đa mục tiêu của các tham số vi cấu trúc vi mô. Tiến hành phân tích mô phỏng, so sánh với cặp ma sát nguyên mẫu không cấu trúc vi mô, từ đó đánh giá về khả năng chịu tải và hệ số ma sát của cặp ma sát lót xy lanh-xéc măng.

Từ khóa: lót xy lanh-xéc măng; hệ số ma sát; tải trọng; cấu trúc vi mô; thuật toán tối ưu hóa cá voi.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong khi động cơ đốt trong làm việc, các cặp ma sát phát sinh nhiệt ma sát, dẫn đến tổn hao năng lượng. Trong đó, phát nhiệt của cặp ma sát lót xy lanh-xéc măng chiếm tỷ trọng tương đối lớn [6,7]. Các nghiên cứu chỉ ra rằng, giảm 10% tổn thất năng lượng do ma sát thì có thể tiết kiệm được khoảng 1,5% tiêu hao nhiên liệu [10]. Vì vậy, giảm ma sát lót xy lanh- xéc măng luôn được quan tâm.

Công nghệ bề mặt hay kỹ thuật vi mô bề mặt được coi là một phương tiện hữu hiệu để cải thiện hiệu suất ma sát và giảm mài mòn của các cặp ma sát [1,4,12,13], ứng dụng đối với cặp ma sát lót xy lanh- xéc măng có thể nâng cao hiệu quả sử dụng. Cụ thể như: nghiên cứu quy luật ảnh hưởng rãnh lõm vi mô đến hệ số ma sát [8]; nghiên cứu thử nghiệm quy luật ảnh hưởng của độ sâu và mật độ diện tích của cấu trúc vi mô đến hệ số ma sát [12]; nghiên cứu so sánh lực ma sát không gia công cấu trúc vi mô với cặp có gia công [9]; nghiên cứu ảnh hưởng tỷ lệ diện tích của các vùng phân bố cấu trúc vi mô khác nhau của bề mặt xy lanh động cơ đến khả năng làm việc của cặp ma sát lót xy lanh-xéc măng [14]; nghiên cứu quy luật ảnh hưởng của tỷ lệ chiếm diện tích của cấu trúc vi mô có cửa mở dạng hình tròn đối với tính năng mài mòn của cặp ma sát [15].

Cho đến nay, các nghiên cứu trên thế giới được thực hiện về ứng dụng cấu trúc vi mô bề mặt trong cặp ma sát lót xy lanh-xéc măng đã thu được những thành quả to lớn, nhưng hình dạng cấu trúc vi mô vẫn còn đơn giản không thuận tiện để tối ưu hóa, và việc chọn lựa lý thuyết thiết kế tối ưu hóa đối với các tham số đặc trưng của cấu trúc vi mô để tiến hành thiết kế tối ưu hóa đa mục tiêu vẫn ít được đề cập đến. Trong bài báo này, cấu trúc vi mô dạng parabol không đối xứng có cửa mở hình elip được lựa chọn làm đối tượng nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số đặc trưng của cấu trúc vi mô mới đến hiệu suất ma sát, mài mòn và chịu tải của cặp ma sát lót xy lanh-xéc măng. Mô hình toán học tương ứng được thiết lập và lý thuyết thiết kế tối ưu hóa đa mục tiêu được lựa chọn để khai thác triệt để tiềm năng của cấu trúc vi mô bề mặt nhằm nâng cao hiệu suất toàn diện của cặp ma sát này.

Bài báo này trình bày ứng dụng thuật toán tối ưu cá voi (WOA) kết hợp phần mềm tối ưu hóa thiết kế Design-Expert và CFD trong việc nghiên cứu khảo sát, tối ưu hóa bài toán ảnh hưởng của các tham số hình dạng cấu trúc vi mô khác nhau đến tính năng của cặp ma sát lót xy lanh- xéc măng của động cơ ô tô.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Lựa chọn, phân tích tính năng cặp ma sát lót xy lanh- xéc măng nguyên mẫu

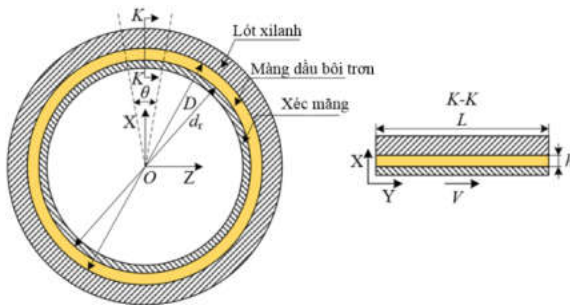
2.1.1. Lựa chọn cặp ma sát lót xy lanh- xéc măng nguyên mẫu

Các thông số chính, cấu trúc chủ yếu của cặp ma sát lót xy lanh-xéc măng của mẫu nghiên cứu thể hiện trong Bảng 1 và Hình H.1.

Để nâng cao hiệu quả tính toán và đảm bảo độ chính xác của kết quả mô phỏng cặp ma sát lót xy lanh-xéc măng được tiến hành chia nhỏ, và lựa chọn một phần cung tròn tương ứng với một góc (Hình H.1) để tiến hành phân tích và thiết lập điều kiện biên tuần hoàn tại bề mặt phân chia.

Bảng 1. Thông số chủ yếu cặp lót xy lanh-xéc măng và dầu bôi trơn

TT	Thông số	Đơn vị	Giá trị	Ghi chú
1	Đường kính trong lót xy lanh (D)	mm	102	
2	Đường kính ngoài xéc măng (d _t)	mm	101.98	
3	Độ dày màng dầu (h)	µm	10	
4	Mật độ dầu bôi trơn	kg/m ³	890	
5	Độ nhớt dầu bôi trơn	kg/(m·s)	0.009	
6	Chiều dày xéc măng (L)	mm	1.8	



H.1. Hình vẽ mô phỏng cặp ma sát lót xy lanh-xéc măng

2.1.2. Lý thuyết bôi trơn chất lỏng cặp ma sát lót xy lanh-xéc măng

Phương trình Navier-Stokes đối với chất lỏng không nén ép, theo [2,12] ta có:

$$\nabla(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{4}{3} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \frac{1}{3} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) \quad (1)$$

$$\nabla(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{4}{3} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \frac{1}{3} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \right) \quad (2)$$

$$\nabla(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{4}{3} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \frac{1}{3} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial y} \right) \quad (3)$$

Trong đó: *u, v, w*- Vecto vận tốc theo ba hướng (x, y, z); *ρ* - Mật độ dầu bôi trơn, kg/m³; *μ*-Độ nhớt dầu bôi trơn, kg/(m.s); *p*- Áp suất tại mọi điểm trường chất lỏng, Pa.

Thông qua giải các phương trình (1, 2, 3) ở trên, có thể thu được tải trọng, lực cắt, lực ma sát của màng dầu bôi trơn, theo [1,2,11] có:

Tải trọng của màng dầu bôi trơn

$$W = \iint p dx dy \quad (4)$$

Ứng suất cắt giữa màng dầu bôi trơn và bề mặt rắn tiếp xúc

$$F_f = \iint \eta \frac{\partial u}{\partial z} dx dy \quad (5)$$

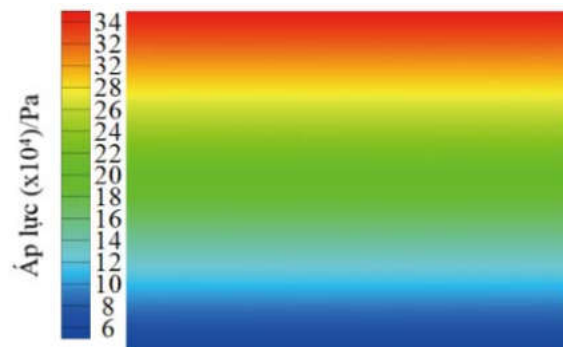
trong đó: *p* là áp suất màng dầu bôi trơn khu vực tính toán, Pa; *η* là độ nhớt động học của chất lỏng, kg/(m·s)

Sau khi thu được tải trọng, ứng suất cắt, triển khai bước tiếp theo là xác định hệ số ma sát (*μ_t*):

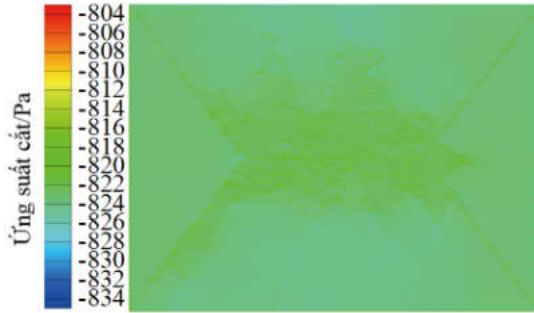
$$\mu_t = \frac{W}{F_f} \quad (6)$$

2.1.3. Tính toán hệ số ma sát và phân tích tải trọng tác dụng cặp ma sát lót xy lanh- xéc măng

Độ mòn của cặp lót xy lanh-xéc măng tương đối nghiêm trọng trong điều kiện tốc độ thấp và áp suất thấp, do vậy lựa chọn tốc độ và áp suất thấp (áp suất dầu vào: 0,4 MPa; áp suất dầu ra: 0,1 MPa; tốc độ chuyển động của xéc măng: 3,4 m/s) là điều kiện biên mô phỏng thực tế làm việc [16]. Đối với phân tích mô hình nguyên mẫu, chọn góc cắt: 3.6⁰, do kích thước tương đối của cấu trúc vi mô rất nhỏ so với bán kính quay tương đối của lót xy lanh- xéc măng, do đó phân tích mô phỏng thực tế tiếp sau đó sử dụng mô hình phẳng thay thế mô hình mặt cong. Sử dụng Fluent Meshing trong Fluent để tiến hành chia lưới đa diện phân chia mô hình, kích thước lưới nhỏ nhất là 2µm, lớn nhất là 5µm. Nhập các thông số phân tích trong Bảng 1 vào Fluent để tiến hành phân tích, sau cùng thu được biểu đồ mô phỏng áp suất và ứng suất cắt của cặp ma sát lót xy lanh- xéc măng nguyên mẫu như trong Hình H.2 và Hình H.3.



H.2. Biểu đồ phân bố áp lực mặt xéc măng



H.3. Biểu đồ phân bố ứng suất cắt mặt xúc măng

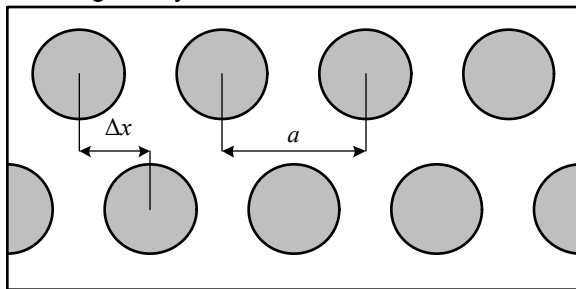
Theo công thức (4), (5), (6), và biểu đồ tại các Hình H.1; H.3 có tính đến dự phòng xác định được khả năng chịu lực đơn vị của màng dầu bôi trơn của cặp ma sát nguyên mẫu là 249000 Pa, và hệ số ma sát là 0,0081.

2.2. Xây dựng và tối ưu hóa thông số đơn nguyên cấu trúc vi mô

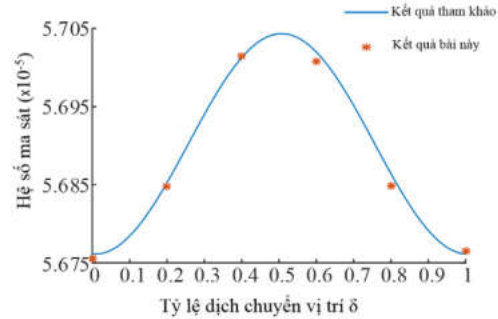
2.2.1. Kiểm tra mô hình

Để đánh giá chính xác hơn ảnh hưởng của chất lượng và kích thước của lưới đến kết quả tính toán trong quá trình phân tích mô phỏng, cho kích thước mắt lưới tối đa và tối thiểu toàn bộ đến $\frac{1}{2}$ và $\frac{1}{5}$ của độ dày màng dầu.

Phương pháp trong nghiên cứu này được chọn sử dụng để tính toán cấu trúc ba chiều trong tài liệu [17], và kết quả tính toán được so sánh với tài liệu tham khảo, trong đó, tỷ lệ dịch chuyển vị trí $\delta = \frac{\Delta x}{a}$ như trong (Hình H.2). Quy luật biến thiên của hệ số ma sát với tỷ lệ dịch chuyển vị trí cấu trúc vi mô khi tỷ lệ dịch chuyển vị trí được chọn là 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 và 1 được so sánh với tài liệu tham khảo, như thể hiện trong (Hình H.3), các kết quả thu được về cơ bản phù hợp với định luật biến thiên của hệ số ma sát với tốc độ dịch chuyển vị trí, so với số liệu trong [17], sai số tối đa trong nghiên cứu này là 1,4% khi tốc độ dịch chuyển cấu trúc vi mô cố định là 0,6. Có thể thấy rằng phương pháp tính toán mô phỏng cấu trúc hóa của cặp ma sát xúc măng- lót xy lanh là chính xác.



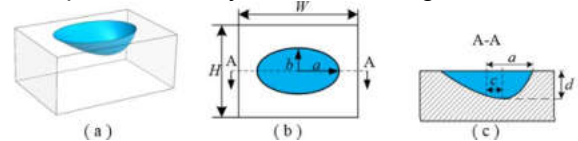
H.4. Phân bố cấu trúc vi mô trên bề mặt



H.5. So sánh kết quả nghiên cứu với số liệu trong [17]

2.2. Xây dựng và tối ưu hóa thông số đơn nguyên cấu trúc vi mô

Đơn nguyên cấu trúc vi mô được xây dựng có dạng parabol không đối xứng có cửa mở hình elip (Hình H.6) và có các thông số hình học chủ yếu bao gồm: a, b- lần lượt là bán kính dài, bán kính ngắn của hình elip; c- độ dịch chuyển (khoảng lệch hay khoảng cách từ đường thẳng nối điểm thấp nhất của parabol tương ứng với độ sâu mặt cắt đường thẳng nối điểm tâm của hình elip), d- chiều sâu cắt lớn nhất. Vì elip dị hướng nên có thể biến đổi thành hình tròn, và parabol không đối xứng có thể biến đổi thành parabol đối xứng, hình tam giác và hình bán nguyệt (những hình cắt này có được trong những nội dung nghiên cứu liên quan), đây có thể tăng không gian tối ưu hóa cho các thông số cấu trúc vi mô, và sau đó thu được các thông số cấu trúc vi mô tối ưu nhất liên quan đến hiệu suất của cặp ma sát lót xy lanh- xúc măng.



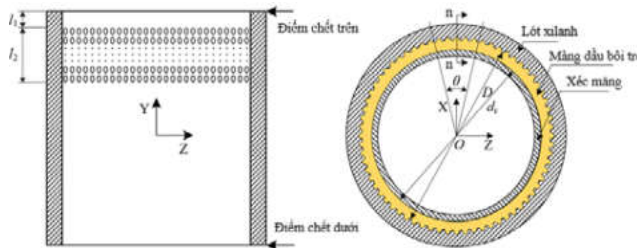
H.6. Hình dạng đơn nguyên cấu trúc vi mô dạng parabol không đối xứng

a- hình 3D; b- hình chiếu bằng; c- mặt cắt

Để mô tả đặc tính phân bố của cấu trúc vi mô, chọn sử dụng thông số e để biểu thị làm đặc trưng cho mật độ của cấu trúc vi mô bề mặt phân tích (Hình H.6).

$$e = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{W \cdot H} \tag{7}$$

Sơ đồ cấu trúc cặp ma sát lót xy lanh- xúc măng thể hiện trên Hình H.7, tức gia công cấu trúc vi mô trên bề mặt tương ứng của lót xy lanh. Khoảng cách của vùng cấu trúc đến điểm chết trên là $l_1 = 5 \text{ mm}$; chiều cao của khu vực cấu trúc $l_2 = 10 \text{ mm}$.



Hình 7. Cấu trúc vi mô bề mặt cặp ma sát lót xy lanh-xéc măng

Các điều kiện biên tuần hoàn cần đảm bảo hai bề mặt biên tuần hoàn tương ứng, cho nên các giá trị khác nhau được sử dụng cho góc cắt của các mô hình để đảm bảo rằng mặt phẳng cắt nằm giữa vị trí của hai cấu trúc liền nhau.

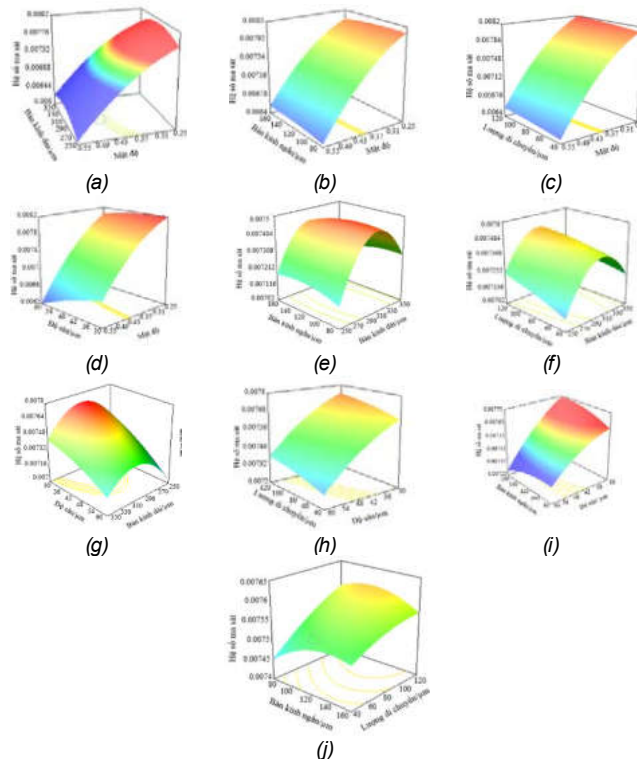
Thông qua nghiên cứu quy luật ảnh hưởng của các thông số cấu trúc vi mô đối với cặp ma sát lót xy lanh- xéc măng, thực hiện tối ưu hóa thông số bằng lý thuyết bề mặt và phần mềm Design-Expert. Sử dụng CCD trong phần mềm Design-Expert, xây dựng 32 nhóm tổ hợp thử nghiệm với 05 tham số và 05 mức giá trị cấu trúc vi mô (Bảng 2), tiến hành phân tích mô phỏng hệ số ma sát và lực phân bố, kết quả được trình bày trên Bảng 2.

Bảng 2. Thông số cấu trúc vi mô và kết quả phân tích mô phỏng

TT	Thông số kỹ thuật					Hệ số ma sát	Tải đơn vị (Pa)
	a	b	c	d	e		
1	300	120	85	45	0.40	0.0077	249529
2	300	40	80	45	0.40	0.0072	250405
3	350	80	120	60	0.25	0.0079	249352
4	300	120	160	45	0.40	0.0074	250882
5	300	120	80	75	0.40	0.0068	248449
6	250	80	120	30	0.25	0.0081	251068
7	350	160	120	60	0.55	0.0061	249769
8	300	120	80	45	0.40	0.0077	249529
9	300	120	80	15	0.40	0.0075	252971
10	200	120	80	45	0.40	0.0061	251594
11	350	160	40	60	0.25	0.0076	249412
12	350	80	40	30	0.25	0.0077	250862
13	300	120	80	45	0.40	0.0077	249529
14	300	120	80	45	0.40	0.0077	249529
15	250	160	120	60	0.25	0.0078	248401
16	300	120	80	45	0.40	0.0072	249529
17	350	80	120	30	0.55	0.0066	255009
18	350	80	40	60	0.55	0.0061	249630
19	300	120	80	45	0.40	0.0077	249529
20	250	160	40	30	0.25	0.0081	249430
21	250	80	120	60	0.55	0.0061	250506
22	250	160	120	30	0.55	0.0069	253963
23	350	160	40	30	0.55	0.0067	250955
24	250	160	40	60	0.55	0.0061	249052
25	400	160	80	45	0.40	0.0067	252916
26	300	120	80	45	0.70	0.0062	251186
27	250	80	40	60	0.25	0.0078	248768
28	300	120	0	45	0.40	0.0072	249022

TT	Thông số kỹ thuật					Hệ số ma sát	Tải đơn vị (Pa)
	a	b	c	d	e		
29	300	200	80	45	0.40	0.0072	249325
30	300	120	80	45	0.10	0.0085	249352
31	350	160	120	30	0.25	0.0078	252867
32	250	80	40	30	0.55	0.0065	251615

Từ Bảng 2 ta thấy số liệu hai thông số đặc trưng của cấu trúc vi mô bề mặt đối với hệ số ma sát và khả năng chịu tải. Để xác định quy luật ảnh hưởng của các thông số đặc trưng khác nhau đến hệ số ma sát và khả năng chịu tải, xây dựng đồ thị quan hệ 2 tham số đặc trưng của cấu trúc vi mô của hệ số ma sát như trong Hình H.8.

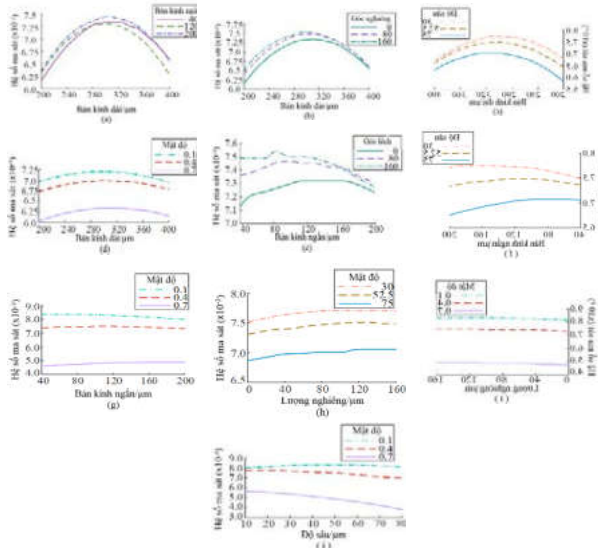


H.8. Đồ thị ảnh hưởng của các nhân tố đến hệ số ma sát

Trên các Hình H.8a÷H.8d có thể thấy, khi mật độ là yếu tố chính so với các yếu tố khác tương ứng, thì biên độ biến thiên men theo phương hướng mật độ tương đối lớn, tức mật độ có ảnh hưởng tương đối rõ rệt đến hệ số ma sát của bề mặt xéc măng so với bán kính dài, bán kính ngắn, lượng nghiêng và độ sâu. Trên các Hình H.8e÷H.8g - Ảnh hưởng của bán kính dài, bán kính ngắn, lượng nghiêng và độ sâu rõ rệt hơn đối với hệ số ma sát bề mặt xéc măng; Trên các Hình H.8h÷H.8i- Độ sâu có ảnh hưởng lớn hơn so với hai thông số còn lại. Trên Hình H.8j- Lượng dịch chuyển có ảnh hưởng đáng kể hơn đối với hệ số ma sát bề mặt xéc măng. Do vậy thứ tự ảnh hưởng

của 5 thông số đến hệ số ma sát là: mật độ > bán kính dài > độ sâu > độ lệch > bán kính ngắn. Tương tự, thứ tự ảnh hưởng của 05 thông số đến khả năng chịu lực phân bố: mật độ > độ sâu > độ lệch > bán kính dài > bán kính ngắn.

Để phân tích quan hệ giữa các nhân tố khác nhau, xây dựng đồ thị quan hệ giữa các nhân tố. Trên Hình H.9 thể hiện đồ thị quan hệ giữa các nhân tố liên quan với hệ số ma sát.



H.9. Biểu đồ tác dụng qua lại các phần tử hệ số ma sát

Từ Hình H.9 thấy, tồn tại rất nhiều quan hệ giữa các nhân tố, trong đó sự biến đổi của bán kính dài và mật độ, bán kính ngắn và mật độ, độ lệch và độ sâu, độ lệch và mật độ có xu hướng tương đối nhất quán, không xuất hiện giao thoa, tức sự tương tác giữa các yếu tố trên là tương đối yếu. Tương tự, ảnh hưởng của các nhân tố khác nhau đến khả năng chịu tải đơn vị, sự biến đổi đồ thị giữa bán kính dài và độ sâu, bán kính dài và mật độ, bán kính ngắn và độ sâu, bán kính ngắn và mật độ có xu hướng tương đối nhất quán, cũng không xuất hiện giao thoa, tức sự tương tác giữa các nhân tố trên là tương đối yếu. Để tối ưu hóa, sẽ không còn được xem xét các yếu tố tương tác yếu khi xây dựng mô hình ảnh hưởng phản hồi. Từ các nghiên cứu trên, thu được các biểu thức của hệ số ma sát và khả năng chịu lực đơn vị

$$\begin{aligned}
 F_f = & -2.2581 \times 10^{-3} + 5.7979 \times 10^{-5} \times a + 1.34158 \times 10^{-5} \times b + \\
 & + 7.20764 \times 10^{-6} \times c + 1.50005 \times 10^{-5} \times d + 4.69605 \times 10^{-3} \times e - \\
 & - 1.38203 \times 10^{-8} \times a \times b - 1.10265 \times 10^{-8} \times a \times c + \\
 & + 6.51222 \times 10^{-8} \times a \times d - 1.23906 \times 10^{-8} \times b \times c - \\
 & - 7.85385 \times 10^{-8} \times b \times d - 4.57251 \times 10^{-5} \times d \times e - \\
 & - 9.66139 \times 10^{-8} \times a^2 - 1.86249 \times 10^{-8} \times b^2 - 7.874 \times 10^{-9} \times c^2 - \\
 & - 2.08881 \times 10^{-7} \times d^2 - 0.010098 \times e^2
 \end{aligned} \quad (8)$$

Biểu thức khả năng chịu tải đơn vị được biểu thị:

$$\begin{aligned}
 F_N = & 2.63953 \times 10^5 - 86.19629 \times a + 29.87213 \times b + \\
 & + 41.11381 \times c + 38.48307 \times d - 34631.82789 \times e - \\
 & - 0.023127 \times a \times b + 0.033276 \times a \times c + 0.04264 \times b \times c - \\
 & - 0.92507 \times c \times d + 49.76516 \times c \times e - 119.19748 \times d \times e + \\
 & + 0.15454 \times a^2 - 0.132 \times b^2 - 0.11836 \times c^2 + \\
 & + 9.24237 \times 10^{-4} \times d^2 + 57707.88626 \times e^2
 \end{aligned} \quad (9)$$

2.3. Tối ưu hóa thông số dựa trên thuật toán tối ưu hóa cá voi (WOA)

2.3.1. Nguyên lý thuật toán tối ưu hóa cá voi

Năm 2016, Giáo sư Seyedali Mirjalili căn cứ vào quá trình săn mồi của cá voi, đã đề xuất một thuật toán tối ưu hóa toàn cục cá voi, và thể hiện hành vi săn mồi này bằng một phương pháp mô hình toán học bao vây con mồi, kiếm ăn bằng lưới bong bóng xoắn ốc và tìm kiếm con mồi, bao gồm: 1-Theo dõi và tiếp cận con mồi; 2-Truy đuổi, bao vây và quấy nhiễu con mồi cho đến khi con mồi ngừng di chuyển; 3-Tấn công con mồi.

Bao vây con mồi

Cá voi lưng gù có thể nhận ra con mồi và bao vây chúng. Vị trí nghiệm tối ưu trong không gian tìm kiếm là không biết được, nên giả định rằng, lời giải tốt nhất hiện thời là vị trí gần nhất xung quanh con mồi. Sau khi xác định được cá thể tìm kiếm tốt nhất, các cá thể khác sẽ cập nhật vị trí của mình theo cá thể tìm kiếm tốt nhất đó. Hành vi này được thể hiện bởi các biểu thức sau:

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (10)$$

$$\vec{X}^*(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (11)$$

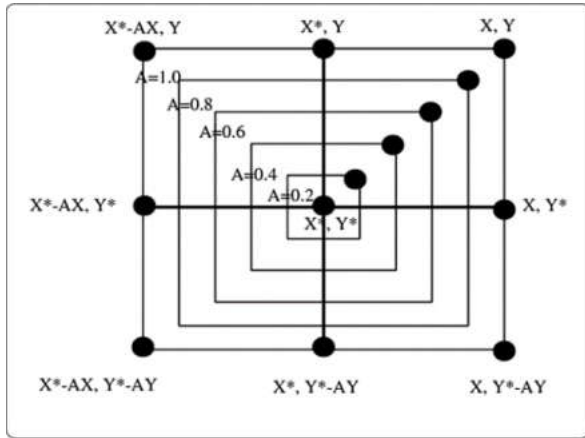
Với t là vòng lặp hiện tại; \vec{A} và \vec{C} là các vector hệ số; $\vec{X}^*(t)$ là vector vị trí tốt nhất đạt được; $\vec{X}(t)$ là vector vị trí. Quan trọng ở đây là \vec{X}^* cần được cập nhật trong mỗi $(t+1)$ lần lặp nếu có kết quả tối ưu hơn.

Vec tơ \vec{A} và \vec{C} được tính như sau:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (12)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r} \quad (13)$$

Trong đó: \vec{r} là một vector ngẫu nhiên trong khoảng $[0, 1]$ và \vec{a} là hệ số chỉ định có độ dài mô đun giảm tuyến tính từ 2 về 0 trong quá trình tính toán.



H.10. Vị trí tối ưu trong không gian 2D [6]

Giai đoạn săn mồi

Quá trình săn mồi của cá voi lưng gù được thể hiện bằng 2 cơ chế chính:

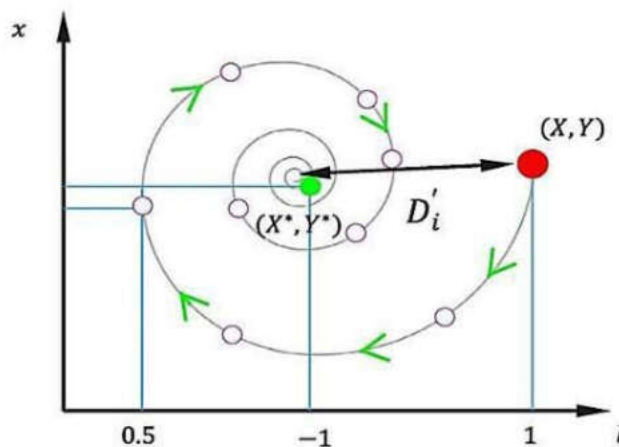
- Cơ chế thu hẹp vòng vây: hành vi này có thể đạt được bằng cách giảm giá trị của a trong phương trình (12). Giá trị của a giảm từ 2 xuống 0 trong quá trình lặp, do đó A sẽ nhận giá trị trong khoảng $[-a; a]$. Chính vì vậy, vị trí mới có thể được định nghĩa bất cứ nơi nào giữa vị trí ban đầu và các vị trí tốt nhất hiện tại.

- Cơ chế cập nhật vị trí theo hình xoắn ốc: ngoài việc cập nhật vị trí so với con mồi theo quỹ đạo hình tròn, cá voi lưng gù còn tiếp cận con mồi theo quỹ đạo hình xoắn ốc. Phương trình hình xoắn ốc như sau:

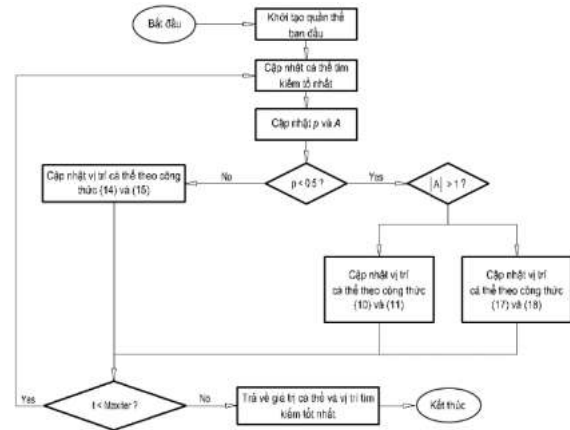
$$\vec{X}(t+1) = D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (14)$$

$$D' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (15)$$

Trong đó: D' chỉ ra khoảng cách của con cá voi thứ i tới con mồi; b là hằng số xác định hình dạng của đường xoắn ốc lô-ga-rít; l là một số ngẫu nhiên nằm trong đoạn $[-1, 1]$.



H.12. Cập nhật vị trí theo hình xoắn ốc [16]



H.13. Lưu đồ giải thuật của thuật toán tối ưu WOA

Giả định rằng có xác suất 50% cá voi lưng gù sẽ lựa chọn một trong hai cơ chế chuyển động trình bày ở các biểu thức (10), (11), (14), (15) ta có được: Phương trình cập nhật vị trí của cá voi lưng gù:

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A}D & p \leq 0,5 \\ D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & p > 0,5 \end{cases} \quad (16)$$

Với p là số ngẫu nhiên nằm trong khoảng $[0; 1]$

Tấn công con mồi

Khi tấn công con mồi, mô hình toán học được thể hiện như sau:

$$\vec{E} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}| \quad (17)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (18)$$

trong đó: \vec{X}_{rand} là một vectơ ngẫu nhiên (cá voi ngẫu nhiên) trong quần thể.

2.3.2. Thiết lập mô hình thông số tối ưu hóa

Để xác định các thông số của cấu trúc vi mô nhằm giảm hệ số ma sát của cặp lót xy lanh- xéc măng và tối đa hóa khả năng chịu lực đơn vị, các hệ số trên được lấy làm hàm mục tiêu, và khả năng chịu lực đơn vị của mẫu có cấu trúc vi mô lớn hơn của mẫu không có cấu trúc vi mô và hệ số ma sát của cấu trúc vi mô nhỏ hơn hệ số ma sát không có cấu trúc là điều kiện ràng buộc. Mô hình toán học tối ưu hóa cuối cùng được thiết lập như sau:

$$\max F(P) = 0.5 \cdot f_1(P) + 0.5 \cdot f_2(P)$$

$$s.t. \begin{cases} f_1(P) > 1 \\ f_2(P) > 1 \\ P = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5]T \\ 200 \leq P_1 \leq 400 \\ 40 \leq P_2 \leq 200 \\ 0 \leq P_3 \leq 160 \\ 30 \leq P_4 \leq 75 \\ 0.1 \leq P_5 \leq 0.7 \end{cases} \quad (19)$$

Trong đó:

- $f_1(P)$ là tỷ số giữa hệ số ma sát của cặp ma sát nguyên mẫu với hệ số ma sát của cặp ma sát cấu trúc vi mô;

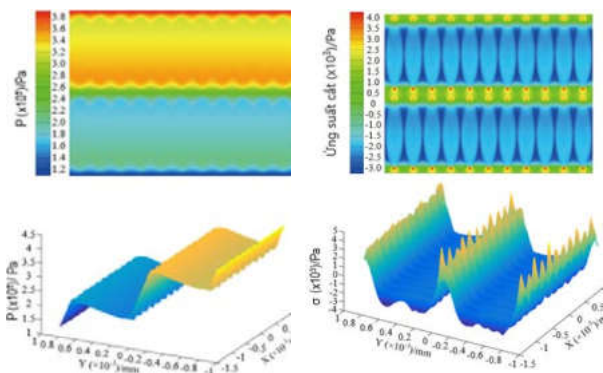
- $f_2(P)$ là tỷ số giữa khả năng chịu lực đơn vị của cặp ma sát cấu trúc vi mô với khả năng chịu lực đơn vị của cặp ma sát nguyên mẫu;

- P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 lần lượt là tham số cấu trúc vi mô (a, b, c, d, e) (Bảng 2).

2.3.3. Phân tích tối ưu hóa hệ số ma sát và lực đơn vị

Mô hình tối ưu hóa toán học được đưa vào thuật toán tối ưu hóa cá voi (WOA), thông qua mô phỏng Malab tiến hành phân tích, lặp lại nhiều lần để thu được giá trị toàn cục tối ưu nhất. Giá trị cấu trúc vi mô tối ưu đạt được: bán kính dài: 389,863 μm ; bán kính ngắn: 107.936 μm ; độ lệch: 138.675 μm ; độ sâu: 41.9449 μm ; mật độ: 0.688536; hệ số ma sát: 0.0053; lực đơn vị: 256556 Pa. Tiến hành làm tròn các giá trị tham số này ta được: bán kính dài: 390 μm ; bán kính ngắn: 108 μm ; độ lệch: 139 μm ; độ sâu: 42 μm ; mật độ: 0.69

Các tham số sau khi tối ưu hóa được tiến hành xây dựng và thiết lập để phân tích mô phỏng, thu được biểu đồ đám mây phân bố áp suất và biểu đồ phân bố ứng suất cắt bề mặt xéc măng của mô hình tối ưu nhất (các Hình H. 14; H. 15).



H.14. Đồ thị phân bố áp lực mặt xéc măng

H.15. Đồ thị phân bố ứng suất cắt mặt xéc măng

Căn cứ vào phương trình (4) và (6) có hệ số ma sát của mô hình tối ưu nhất là 0.0055, lực đơn vị: 255645 Pa. So với các giá trị thu được trong các mô hình dự đoán trước trong các biểu thức (8) và

(9), sai số hệ số ma sát là 3,77%, sai số tải trọng 0,3564%. Chứng tỏ tính đúng đắn của mô hình để dự đoán hệ số ma sát và khả năng chịu lực đơn vị của các tham số hình dạng cấu trúc vi mô được thiết lập trước đó.

Do hình elip có thể chuyển đổi thành hình tròn khi bán kính dài và bán kính ngắn bằng nhau, để so sánh ảnh hưởng của cấu trúc vi mô cửa mở dạng elip và dạng hình tròn đến tính năng cặp lót xy lanh-xéc măng, lấy bán kính dài tối ưu nhất của parabol có cửa mở dạng elip làm bán kính của cấu trúc vi mô cửa mở dạng hình tròn. Khi đó độ lệch cấu trúc vi mô cửa mở dạng hình tròn lúc này bằng 0; độ sâu, mật độ và các tham số của mô hình parabol có cửa mở dạng elip tối ưu nhất quán.

Bảng 3. So sánh hiệu suất cặp ma sát không cấu trúc và có cấu trúc vi mô khác nhau

TT	Hình dạng bề mặt cặp ma sát	Hệ số ma sát	Tỷ lệ thay đổi	Lực đơn vị, Pa	Tỷ lệ thay đổi
1	Không kết cấu	0.0081	×	249000	×
2	Cấu trúc vi mô dạng parabol cửa mở hình elip	0.0055	-32.1%	255645	2,67%
3	Cấu trúc vi mô dạng bán nguyệt cửa mở hình tròn	0.0063	-22.2%	250187	0,47%

Từ Bảng 3 thấy, so với cặp ma sát không có cấu trúc, hiệu suất của cặp ma sát có cấu trúc vi mô dạng parabol cửa mở hình elip và cặp ma sát có cấu trúc vi mô sâu dạng bán nguyệt cửa mở hình tròn đều được cải thiện rõ rệt, nhưng hiệu suất cải thiện của cấu trúc vi mô dạng parabol cửa mở hình elip đối với hiệu suất của cặp ma sát là tốt hơn, điều này chứng tỏ tính ưu việt của cấu trúc vi mô dạng parabol cửa mở hình elip.

3. KẾT LUẬN

➢ Khi cấu trúc vi mô dạng parabol có cửa mở hình elip được bố trí trên bề mặt lót xy lanh, mức độ ảnh hưởng của các tham số cấu trúc vi mô đối với hệ số ma sát và tải trọng của cặp ma sát lót xy lanh- xéc măng lần lượt như sau: (1) mật độ > bán kính dài > độ sâu > khoảng lệch tâm > bán kính ngắn và (2) mật độ > độ sâu > khoảng lệch tâm > bán kính dài > bán kính ngắn;

➤ Thông qua phân tích ảnh hưởng bề mặt đã thu được mô hình dự đoán về khả năng ảnh hưởng của các tham số đặc trưng của cấu trúc vi mô dạng parabol có cửa mở hình elip đối với hệ số ma sát và tải trọng của cặp ma sát lót xy lanh- xéc măng với độ chính xác tương đối cao;

➤ Các tham số hình dạng cấu trúc vi mô tối ưu nhất thu được bằng cách tiến hành tối ưu hóa mục tiêu để có hệ số ma sát nhỏ nhất, lực đơn vị (sức chịu tải) lớn nhất: bán kính dài elip: 390 μ m, bán kính ngắn elip: 108 μ m, độ lệch: 139 μ m, độ sâu:

42 μ m, mật độ: 0.69. Lúc này, hệ số ma sát và lực đơn vị của cặp ma sát lót xy lanh- xéc măng lần lượt là 0.0055 và 255645Pa, so với cặp ma sát nguyên mẫu không cấu trúc vi mô, hệ số ma sát giảm 32,1% trên cơ sở nâng cao khả năng chịu tải 2,67%;

➤ So với cấu trúc vi mô mặt cắt hình bán nguyệt cửa mở hình tròn, cấu trúc vi mô dạng parabol cửa mở hình elip có hiệu suất tốt hơn về độ khả năng kháng mòn giảm ma sát và tăng khả năng chịu tải của cặp ma sát \square

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Lê Văn Lợi, Xu Ping, Yu Yinghua (2022), Tình hình nghiên cứu kết cấu bề mặt trong bôi trơn và giảm ma sát của hệ thống ma sát. Tạp chí Công nghiệp Mỏ, Số 5-2022, Hà Nội.
2. Nguyễn Anh Tuấn, Bùi Văn Gòn. Lý thuyết bôi trơn ướt. Nhà xuất bản Xây dựng. Hà Nội -2006.
3. Ezhilmaran V. et al (2018). Investigation on generation of laser assisted dimples on piston ring surface and influence of dimple parameters on friction[J]. Surface and coatings technology, 2018, 335:314-326.
4. Fiaschi G et al (2019), Tribological response of laser-textured steel pins with low-dimensional micrometric patterns[J]. Tribology International, 2019, 149(5):105548
5. Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95(5):51-67.
6. Murat K. et al (2011), Friction and wear studies between cylinder liner and piston ring air using Taguchi design method [J]. Advances in engineering software, 2011,42(3): 59503.
7. Tang Ling, He Pengfei, Ma Guozheng, et al. Research progress on surface performance enhancement of cylinder liner-piston ring friction pair[J]. Surface Technology, 2019,48(08):185-198.
8. Tianchi Qin, Chiharu Tadokoro, Shinya Sasaki. The Effects of Surface Texturing on Friction Performance under Reciprocating Sliding Condition[J]. Key Engineering Materials, 2017, 739:36-41.
9. Venkateswara Babu P, Ismail Syed, Satish Ben Beera. Influence of positive texturing on friction and wear properties of piston ring-cylinder liner tribo pair under lubricated conditions [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2019,71(04):515-524.
10. Ye Nianye, Mu Jianhua, Huang Zhongwen. Comparative experimental study on friction power of naturally aspirated gasoline engine[J]. Vehicle engine, 2013(2):10-13.
11. 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[D].北京, 清华大学出版社, 2008.
12. 于英华, 杨帅彬, 曹茂林, 沈佳兴, 阮文新. 滑动轴承表面椭圆偏置类抛物线微织构研究[J/OL]. 表面技术:1-10[2022-01-26].
13. 童文俊, 王明环, 邱国志等. 摩擦副表面气膜屏蔽微细电解加工微织构及摩擦性能分析[J].中国机械工程, 2020,31(11):1331-1336.
14. 佟德辉, 尹必峰, 徐波等. 缸套表面分区差异织构的润滑摩擦性能研究[J].内燃机学报, 2021, 39(05):451-458.
15. 徐阳阳, 韩晓光, 徐久军等. 激光表面织构微坑形貌及面积占有率对氮化气缸套摩擦学性能的影响[J].中国表面工程, 2021,34(04):149-157.
16. 李岩霖, 吉华,王天豪,李倩,冯东林. 基于 CFD 的均布圆形微孔活塞环数值分析[J].机械, 2019,46(06):18-22.
17. 王洪涛, 朱华. 圆柱形微凹坑排布形式对织构表面摩擦性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2014,34(04):414-419.



OPTIMAL DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF MICROTTEXTURE ON SPECIAL-SHAPED SURFACE OF ENGINE PISTON RING-CYLINDER LINER

Le Van Loi, Zhu Huajie, Xu Ping, Yu Yinghua

ABSTRACT

In order to explore the microtexture that is more conducive to improving the performance of the piston ring-cylinder liner friction pair of an automobile engine, taking an engine piston ring-cylinder liner friction pair as a prototype. Central composite design (CCD) and response surface optimization theory are comprehensively used, and the CFD method is used to study the influence of characteristic parameters of asymmetrical parabolic micro texture, having elliptical gap on the friction coefficient and bearing capacity of the piston ring-cylinder liner friction pair. Establishment of corresponding mathematical model, and use the whale optimization algorithm to carry out multi-objective optimization design of the micro texture parameters. Implementation of simulation analysis, compare with the prototype friction pair without microstructure, from which to evaluate the load capacity and coefficient of friction of the piston ring-cylinder liner friction pair.

Keywords: piston ring-cylinder liner, coefficient of friction, bearing capacity, microtexture, whale optimization algorithm

Ngày nhận bài: 14/9/2022;

Ngày gửi phản biện: 16/9/2022;

Ngày nhận phản biện: 05/10/2022;

Ngày chấp nhận đăng: 12/10/2022.

Trách nhiệm pháp lý của các tác giả bài báo: Các tác giả hoàn toàn chịu trách nhiệm về các số liệu, nội dung công bố trong bài báo theo Luật Báo chí Việt Nam.