

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 PISTON

*NCS. Lê Văn Lợi, GS.TS. Xu Ping, GS.TS. Yu Ying Hua, NCS. Nguyễn Văn Tân
Đại học Kỹ Thuật Công Trình Liêu Ninh, Trung Quốc*

Tóm tắt: Đề nghiên cứu ảnh hưởng của kết cấu vi mô, nâng cao hiệu suất cặp ma sát của bơm piston hướng trục kiểu đĩa nghiêng, lựa chọn cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng làm đối tượng nghiên cứu. Bài báo phân tích và đánh giá ảnh hưởng các thông số hình học của kết cấu vi mô đến khả năng chịu tải và hệ số ma sát trong điều kiện làm việc áp cao. Ứng dụng phương pháp Taguchi xây dựng ma trận và phân tích quan hệ xám GRA để phân tích mức độ ảnh hưởng của các thông số kết cấu vi mô đến khả năng chịu tải và hệ số ma sát. Kết quả nghiên cứu chứng minh khả năng chịu tải và hệ số ma sát của màng dầu cặp ma sát của các yếu tố kết cấu vi mô đường kính, độ sâu, mật độ phân bố tương ứng là 12,9 MPa, 0,00356. Quá trình phân tích mức độ ảnh hưởng của các tham số kết cấu vi mô của cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng đối với khả năng chịu tải là: Đường kính > mật độ > độ sâu, và đối với hệ số ma sát lần lượt là: Độ sâu kết cấu > mật độ > đường kính.

Từ khóa: Gối trượt-đĩa nghiêng, hệ số ma sát, kết cấu vi mô, taguchi xám, tải trọng, tối ưu hóa.

1 Đặt vấn đề

Trong hơn nửa thế kỷ qua, các nghiên cứu về kết cấu bề mặt (Surface Texture) đã đạt được những bước tiến dài trong vấn đề cải thiện khả năng chống mài mòn của dụng cụ gia công, khả năng chống mài mòn và tính năng bôi trơn và làm kín của các cặp ma sát trong các thiết bị cơ khí. 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. Trong quá trình gia công kết cấu vi mô bề mặt, các thông số hình học của kết cấu như đường kính, chiều sâu, mật độ phân bố là những yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu tải và đặc tính chống ma sát mòn. Do đó, phân tích ảnh hưởng của một số yếu tố công nghệ đến khả năng chịu tải và hệ số ma sát của màng dầu khe hở giữa các cặp ma sát là vô cùng cần thiết hiện nay.

Taguchi là một phương pháp tối ưu hóa (TUH) thực nghiệm được đưa ra bởi Taguchi [1, 2]. Hiện nay, phương pháp được sử dụng phổ biến trong thiết kế công nghiệp. Theo phương pháp Taguchi, một loạt các thí nghiệm

được thực hiện theo các bảng trực giao được Taguchi đưa ra dựa trên nguyên tắc là cặp trạng thái của các yếu tố điều khiển trong hai cột bất kì có xác suất xuất hiện như nhau. Với một bộ tham số gia công kết cấu vi mô (hình dạng kết cấu, chiều sâu và mật độ phân bố), yếu tố đầu ra quan tâm là khả năng chịu tải và hệ số ma sát của mỗi trường hợp trong đó mỗi yếu tố quan tâm được mô phỏng nhắc lại nhiều lần để đảm bảo sự phản ánh chính xác mức ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến đầu ra quan tâm. Một số tác giả đã sử dụng phân tích Taguchi [3-7] xác định mức độ ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến hàm mục tiêu nhưng các hàm mục tiêu và hàm biên lại được xây dựng bằng các phương pháp truyền thống.

Phương pháp phân tích quan hệ xám là một phương pháp thống kê hiệu quả để đo mức độ gần đúng giữa các đối tượng bằng cách sử dụng cấp quan hệ xám. Nó được phát triển bởi Deng [8] và đã được ứng dụng thành công trong nhiều lĩnh vực khác nhau [9, 10]. Mức độ thông tin trong phân tích mối quan hệ xám giúp quá trình ra quyết định được dễ dàng hơn trong các

tình huống khó khăn [11, 12]. Phương pháp này đã được cải tiến và phát triển thành phân tích mối quan hệ mờ xám FGRA. Đây là một phương pháp tiếp cận dựa trên một hệ thống mờ được phát triển dựa trên các hệ số và mức quan hệ xám. Mô hình này xem xét tất cả các tiêu chí khác nhau, bao gồm cả sự không chắc chắn về trọng số và tầm quan trọng của các tiêu chí

Xuất phát từ những phân tích trên, bài báo này đưa ra hướng nghiên cứu nhằm tìm ra những nhân tố tác động chính ảnh hưởng đến hệ số ma sát và khả năng chịu lực của màng dầu cặp ma sát. Dựa trên thuật toán phân tích mờ xám kết hợp với phân tích Taguchi ứng dụng trong phân tích ảnh hưởng của các thông số hình học kết cấu vi mô đến tính năng cặp ma sát gói trượt-đĩa nghiêng của bơm piston hướng trục [13].

2 Nội dung nghiên cứu

2.1 Khái quát về phương pháp Taguchi xám

TUH một mục tiêu thường được lựa chọn sử dụng vì thuật giải đơn giản và thường cho lời giải tường minh. Tuy nhiên, hầu hết các lựa chọn (hay quyết định) gặp trên thực tế phải thỏa mãn đồng thời không phải một mà một số tiêu chí, trong đó có những tiêu chí mâu thuẫn nhau. Trong những trường hợp đó, lựa chọn TUH đồng thời xét đến một số tiêu chí gọi là TUH đa mục tiêu (Multi Objective Optimization).

Bài toán TUH đa mục tiêu chính là bài toán TUH tổng quát, được phát biểu như sau:

Cực tiểu hóa hàm mục tiêu (a) với các điều kiện ràng buộc (b).

$$\begin{aligned} \min y &= [y_1(x) \dots y_z(x)]^T & (a) \\ f(x) &= \begin{cases} g = [g_1(x) \dots g_{m1}(x)]^T \leq 0 \\ h = [h_1(x) \dots h_{m2}(x)]^T = 0 \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \end{cases} & (b) \end{aligned}$$

Trong đó: $x = [x_1, \dots, x_i, \dots, x_n]^T$ – vector các biến đầu vào (Input), cũng là biến điều khiển (Control Variable); $y = [y_1, \dots, y_j, \dots, y_z]^T$ – vector mục

tiêu, mỗi hàm biểu diễn một tiêu chí TUH; trong (b), lần lượt là ràng buộc dạng bất đẳng thức, dạng đẳng thức và điều kiện biên.

Nếu (a) chỉ có một hàm mục tiêu $y(x)$ duy nhất ($z = 1$) thì có mô hình TUH một mục tiêu. Như vậy, TUH một mục tiêu là trường hợp riêng của TUH tổng quát, khi số hàm mục tiêu là 1.

Đích cuối cùng của TUH là chọn ra được một nghiệm tối ưu. Bài toán TUH đa mục tiêu có một tập hợp các nghiệm tối ưu và không có nghiệm nào là tối ưu tuyệt đối, nên nghiệm cuối cùng sẽ được chọn theo quan điểm của người ra quyết định. Quan điểm chọn thể hiện mức ưu tiên giữa các tiêu chí, như một thông tin bổ sung. Theo phương thức đưa ra thông tin bổ sung, xuất hiện ba nhóm phương pháp: (1) Đưa ra trước khi TUH; (2) Đưa ra sau khi TUH; và (3) Đưa ra trong khi TUH. Bài báo này trình bày một trong các phương pháp thuộc nhóm (1): Phương pháp Taguchi xám và ứng dụng của nó vào TUH lựa chọn các thông số hình học trong phân tích ảnh hưởng của nhóm kết cấu vi mô đối với hệ số ma sát và khả năng chịu tải của cặp ma sát gói trượt-đĩa nghiêng của bơm piston hướng trục kiểu đĩa nghiêng 250CY14-1B.

Trong lý thuyết thông tin, người ta thường đặt ra các quan hệ tuyệt đối, thuộc hai thái cực (như 1 và 0; trắng và đen), dựa vào đó để đánh giá các sự vật, hiện tượng. Trên thực tế, các quan hệ kiểu đó hầu như không tồn tại, mà thường gặp các quan hệ giữa hai thái cực được gọi là các quan hệ xám (Grey Relation – GR). TUH một mục tiêu là TUH tuyệt đối, trong đó tiêu chí được chọn đạt mức tốt nhất (tối ưu), còn các tiêu chí khác hoàn toàn không được xét đến. Trong TUH đa mục tiêu, nghiệm tối ưu không thể đáp ứng tốt nhất mọi tiêu chí, mà mỗi tiêu chí chỉ nhận được giá trị nằm giữa mức tốt nhất và mức xấu nhất, nên được gọi là TUH xám. Tên đầy đủ của nó là TUH dựa trên phân tích quan hệ xám (Grey Relational Analysis Based Optimization).

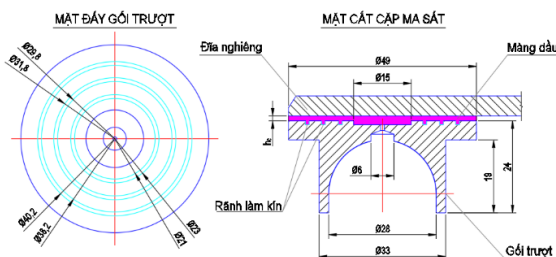
Phương pháp Taguchi được ứng dụng khá rộng rãi trong TŨH các thông số công nghệ, khi dữ liệu đầu vào là số liệu rời rạc, kể cả không phải dạng số. Tuy nhiên, Taguchi nguyên gốc chỉ giải được bài toán TŨH một mục tiêu. Phương pháp Taguchi xám kết hợp phương pháp Taguchi với phân tích quan hệ xám, có thể dùng trong TŨH đa mục tiêu. Tên đầy đủ của Taguchi xám là Taguchi dựa trên phân tích quan hệ xám (Taguchi Based on Grey Relational Analysis). Thuật giải Taguchi xám không phức tạp lắm, nhất là khi sử dụng kèm các phần mềm chuyên dùng như Minitab, Design Expert...

2.2 Lựa chọn, phân tích tính năng cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng nguyên mẫu

Các thông số chính, cấu trúc chủ yếu của cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng của mẫu nghiên cứu thể hiện trong bảng 1 và hình 1.

Bảng 1: Thông số kỹ thuật bơm piston hướng trục loại 250MCY14

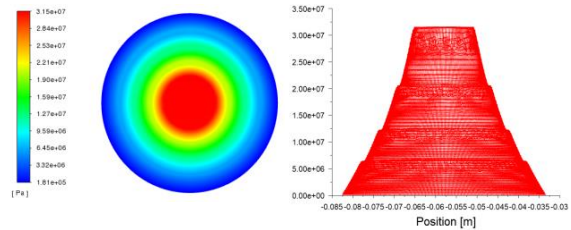
TT	Thông số kỹ thuật	Đơn vị	Giá trị
1	Áp suất làm việc, p	MPa	31,5
2	Tốc độ quay trục chính, n	r/min	1500
3	Bán kính phân chia piston, R	mm	58
4	Đường kính đầu tròn piston, d	mm	35
5	Số lượng piston, Z	-	7
6	Góc lệch đĩa nghiêng, β	-	19,5
7	Đường kính lỗ cấp dầu bôi trơn trong piston, d ₀	mm	1.5
8	Chiều dài lỗ cấp dầu bôi trơn trong piston, l ₀	mm	35,55
9	Mật độ dầu thủy lực, ρ	kg/m ³	872,5
10	Độ nhớt, ν	m ² /s (40 °C)	115.10 ⁻⁶
11	Độ nhớt động học, μ	Pa.s	0,155



Hình 1: Kết cấu hình học cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng bơm piston

Để nâng cao hiệu quả tính toán và đảm bảo độ chính xác của kết quả mô phỏng cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng, thực hiện chia nhỏ và lựa chọn 1 trong số 7 gối trượt đại diện cho nhóm gối trượt (hình 1) để tiến hành phân tích và thiết lập điều kiện biên tuần hoàn tại bề mặt phân chia.

Sử dụng Fluent Meshing trong Fluent để tiến hành chia lưới đa diện phân chia mô hình. Tổng số phần tử lưới trong mô hình hữu hạn khoảng 134487, số nút khoảng 167238, trong đó trên 98% chất lượng lưới trên 0,5 μm, nhỏ nhất 0,35 μm. Nhập các thông số phân tích trong bảng 1 vào Ansys Fluent để tiến hành phân tích, sau cùng thu được biểu đồ mô phỏng áp suất màng dầu phân bố trên mặt đáy và phân bố áp suất ngoài các rãnh làm kín của của cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng nguyên mẫu như hình 2.



a) Phân bố áp suất bề mặt đáy b) Phân bố áp suất ngoài rãnh làm kín

Hình 2: Áp suất phân bố trên bề mặt cặp ma sát gối trượt

Thông qua tính toán áp suất và ứng suất cắt trên bề mặt cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng trong bơm piston hướng trục kiểu đĩa nghiêng loại 250CY14-1B, trong điều kiện tải trọng làm việc áp suất cao 31,5 MPa, kết hợp biểu đồ hình 2, khả năng chịu tải và hệ số ma sát của màng dầu khe hở của cặp ma sát lần lượt là 12044342,11 Pa và 0,00387.

2.3 Ứng dụng phương pháp Taguchi xám trong TŨH thông số hình học kết cấu vi mô

2.3.1 Xây dựng và TŨH thông số đơn nguyên kết cấu vi mô

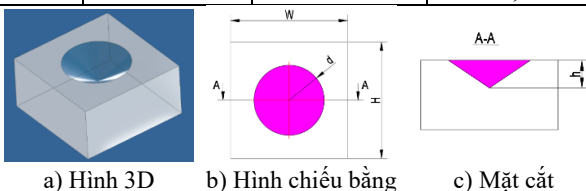
Thiết kế thực nghiệm Taguchi là một phương pháp được sử dụng phổ biến trong điều

tra các thông số đầu ra của quá trình công nghệ thu được từ các thông số đầu vào theo nhiều yếu tố và mức. Phương pháp này được áp dụng thành công cho nhiều lĩnh vực khác nhau nhằm mục đích tiết kiệm thời gian, tiền bạc và thu được các thông số tối ưu [4-7]. Chìa khóa của cách tiếp cận này là tạo ra một bảng thiết kế trực giao trên cơ sở các yếu tố và mức tác động được điều tra. Các yếu tố được xem xét trong quá trình đánh giá ảnh hưởng của nó đến khả năng chịu tải và hệ số ma sát, bao gồm đường kính cửa mở, chiều sâu kết cấu, mật độ phân bố kết cấu trên diện tích mặt đáy của gối trượt, như được mô tả trên

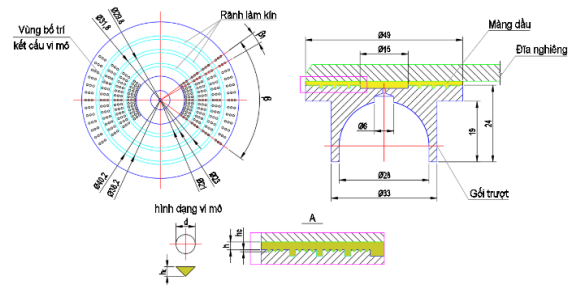
Căn cứ vào một số nghiên cứu và quá trình nghiên cứu kiểm tra khảo sát một số đơn nguyên vi mô có cửa mở hình tròn biên dạng tròn, trụ, tam giác cân, tam giác góc lệch (những nghiên cứu liên quan)..., nhận thấy đơn nguyên kết cấu vi mô dạng tam giác cân với cửa mở hình tròn có hệ số ma sát và khả năng chịu tải tốt hơn, do đó trong nghiên cứu này tác giả đi sâu vào giải quyết bài toán tối ưu với đơn nguyên vi mô dạng tam giác cân, với thông số đơn nguyên kết cấu vi mô bề mặt như sau: đường kính cửa mở $d = 200 \div 600 \mu\text{m}$; độ sâu $h = 50 \div 300 \mu\text{m}$; mật độ phân bố kết cấu $\Delta = 20 \div 100\%$

Bảng 2: Thông số hình học thực nghiệm ảnh hưởng khả năng chịu tải và hệ số ma sát

TT	Đường kính D (μm)	Độ sâu H (μm)	Mật độ phân bố Δ (%)
1	200	40	0,2
2	300	80	0,4
3	400	120	0,6
4	500	160	0,8
5	600	200	1,0



Hình 3: Hình dạng đơn nguyên cấu trúc vi mô dạng tam giác cân cửa mở hình tròn



Hình 4: Hình vẽ mô phỏng cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng

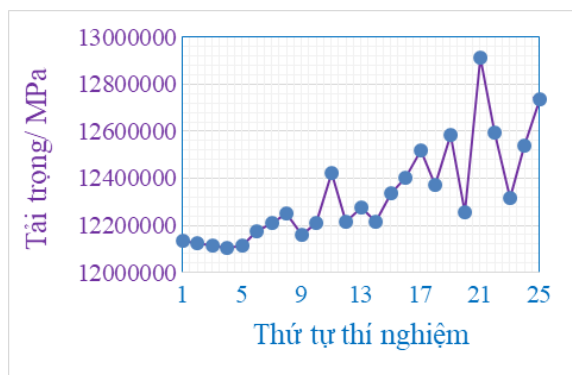
2.3.2 Kết quả phân tích ảnh hưởng của một số thông số hình học đến khả năng chịu tải và hệ số ma sát của kết cấu vi mô bề mặt

Mô hình kết cấu vi mô với các thông số khác nhau được mô phỏng bằng phần mềm Fluent. Lưới mô phỏng và điều kiện biên giống như điều kiện làm việc thực tế. Chỉ tiêu đánh giá tổ hợp các thông số, chẳng hạn như sử dụng phương pháp phân tích truyền thống thì cần $5^5 = 3125$ bộ thí nghiệm, nhưng sử dụng bảng thí nghiệm trực giao để thiết kế thí nghiệm trực giao thì chỉ cần 25 bộ thí nghiệm để thu được khả năng chịu tải màng dầu. Sự kết hợp tham số của hình dạng ô đơn vị tương ứng với hệ số ma sát có thể làm giảm đáng kể thời gian tính toán mô phỏng. Trong bài báo này, bảng thực nghiệm trực giao theo phương pháp Taguchi L25 (5^5) được sử dụng để mô phỏng và 25 bộ kết quả mô phỏng cuối cùng thu được như trong bảng 3.

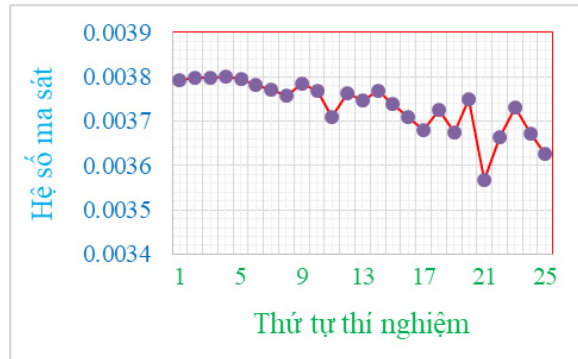
Kết quả thực nghiệm Taguchi L25 (5^5) như thể hiện trên bảng 3 cho thấy khả năng chịu tải trọng của màng dầu tăng lên rõ rệt và hệ số ma sát của bề mặt được bố trí kết cấu vi mô giảm mạnh. Hình 3 và 4 thể hiện kết quả thí nghiệm các trường hợp theo các điều kiện đầu vào như đường kính, độ sâu và mật độ phân bố khác nhau, tương ứng với khả năng chịu tải và hệ số ma sát. Kết quả cho thấy, khi với áp lực vào và áp lực rò lọt là như nhau cho ra khả năng chịu tải và hệ số ma sát tương ứng với các điều kiện kết cấu hình học và mật độ phân bố khác nhau là khác nhau.

Bảng 3: Kết quả phân tích ảnh hưởng thông số hình học của kết cấu vi mô đến khả năng chịu tải và hệ số ma sát của cặp ma sát gói trượt-đĩa nghiêng

Thí nghiệm m	Thông số hình học			Kết quả thí nghiệm	
	Đường kính D (μm)	Độ sâu H (μm)	Mật độ phân bố Δ (%)	Tải trọng (MPa)	Hệ số ma sát μ_t (x 10 ³)
1	200	40	0,2	12,134	3,792661
2	200	80	0,4	12,123	3,982330
3	200	120	0,6	12,116	3,797579
4	200	160	0,8	12,106	3,800059
5	200	200	1,0	12,116	3,796213
6	300	80	0,4	12,212	3,768992
7	300	120	0,6	12,178	3,781709
8	300	160	0,8	12,211	3,771946
9	300	200	1,0	12,249	3,758075
10	300	40	0,2	12,159	3,783755
11	400	120	0,6	12,218	3,769559
12	400	160	0,8	12,338	3,738120
13	400	200	1,0	12,424	3,710756
14	400	40	0,2	12,217	3,762985
15	400	80	0,4	12,277	3,747809
16	500	160	0,8	12,373	3,725660
17	500	200	1,0	12,587	3,673745
18	500	40	0,2	12,258	3,750000
19	500	80	0,4	12,401	3,709417
20	500	120	0,6	12,521	3,679306
21	600	200	1,0	12,596	3,663837
22	600	40	0,2	12,319	3,730824
23	600	80	0,4	12,541	3,672356
24	600	120	0,6	12,739	3,627305
25	600	160	0,8	12,915	3,567290



Hình 3: Đồ thị biểu diễn sự thay đổi tải trọng của các thí nghiệm



Hình 4: Đồ thị biểu diễn sự thay đổi giá trị hệ số ma sát của các thí nghiệm

Khi so sánh mức độ ảnh hưởng giữa thông số hình học, độ sâu kết cấu và mật độ phân bố kết cấu vi mô nhận thấy trong cùng một điều kiện làm việc với các thông số công nghệ khác nhau đều cho thấy khả năng chịu tải, hệ số ma sát của màng dầu giữa khe hở cặp ma sát cũng rất khác nhau và được thể hiện trong bảng 4.

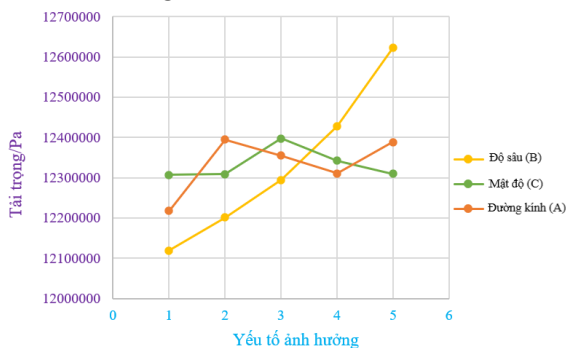
Bảng 4: Thứ tự chính yếu ảnh hưởng của các thông số đến khả năng chịu tải và hệ số ma sát của màng dầu cặp ma sát gói trượt-đĩa nghiêng

Thí nghiệm	Đường kính (A)	Độ sâu (B)	Mật độ (C)
K ₁₁	12119068,6	12306579,8	12217268,6
K ₁₂	12201541,6	12308661,8	12394262,2
K ₁₃	12294225,4	12397243,6	12354331,4
K ₁₄	12427873,2	12342235,6	12310292,2
K ₁₅	12621910,0	12309898,0	12388464,4
R ₁	502841,4	90663,8	176993,6
Thứ tự chính yếu	A > C > B		
Phương án tối ưu	A5	B3	C2
K ₂₁	0,003796949	0,003744142	0,003764045
K ₂₂	0,003772895	0,003714875	0,003739361
K ₂₃	0,003745846	0,003740527	0,003731092
K ₂₄	0,003707626	0,003731568	0,003720615
K ₂₅	0,003652322	0,003744526	0,003720525
R ₂	0,000144627	0,000029652	0,000043519
Thứ tự chính yếu	B > C > A		
Phương án tối ưu	A5	B2	C5

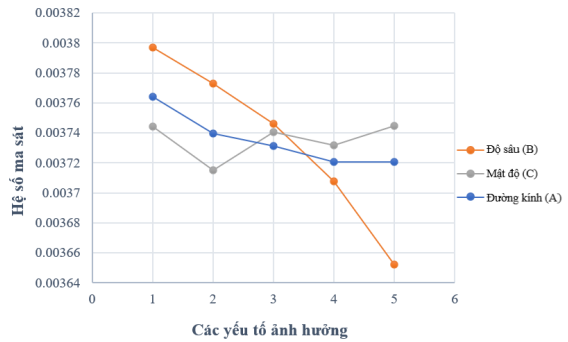
Với: $K_{11}, K_{12}, K_{13}, K_{14}, K_{15}$ – lần lượt đại diện cho giá trị trung bình của áp suất màng dầu trong mỗi cấp của ba yếu tố ảnh hưởng; R_1 – phạm vi áp suất màng dầu; $K_{21}, K_{22}, K_{23}, K_{24}, K_{25}$ – đại diện giá trị trung bình của hệ số ma sát trong ở mỗi cấp của các yếu tố ảnh hưởng; R_2 – phạm vi của hệ số ma sát.

Qua phân tích bảng 4, có thể thấy rằng, khi coi khả năng chịu tải màng dầu là chỉ tiêu đánh giá thì thấy đường kính của kết cấu vi mô hình tròn là tham số ảnh hưởng quan trọng nhất trong ba tham số và sự kết hợp tối ưu giữa ba tham số lúc này là A5B3C2. Tương tự khi coi hệ số ma sát là chỉ tiêu đánh giá thì độ sâu kết cấu vi mô là tham số ảnh hưởng quan trọng nhất trong ba tham số và sự kết hợp tối ưu giữa ba tham số lúc này là A5B2C5. Đồng thời, có thể thấy rằng thứ tự chính yếu của các tham số ảnh hưởng đến khả năng chịu tải của màng dầu là: Tham số A (đường kính kết cấu vi mô) > yếu tố C (mật độ phân bố kết cấu vi mô) > yếu tố B (độ sâu kết cấu vi mô). Thứ tự chính yếu của các tham số ảnh hưởng đến hệ số ma sát là: Yếu tố B (độ sâu kết cấu vi mô) > yếu tố C (mật độ phân bố kết cấu vi mô) > tham số A (đường kính kết cấu vi mô).

Từ bảng 4 ta có đồ thị đường cong ảnh hưởng của năm cấp độ từng tham số ảnh hưởng đến khả năng chịu tải và hệ số ma sát của màng dầu, như trong các hình 5 và 6.



Hình 5: Biểu đồ ảnh hưởng của các tham số kết cấu vi mô đến khả năng chịu tải



Hình 6: Biểu đồ ảnh hưởng của các tham số kết cấu vi mô đến hệ số ma sát

2.4 Thiết kế TUGH tham số hình học kết cấu vi mô

Trong bài báo này, việc thiết kế TUGH ảnh hưởng của các tham số kết cấu vi mô được thực hiện thông qua lý thuyết hệ xám. Phân tích hệ xám (Grey Relational Analysis) là phương pháp sử dụng mức độ quan hệ xám để nghiên cứu và xác định mức độ tương tác giữa các yếu tố khác nhau trong hệ thống hoặc mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố đến hành vi chính của hệ thống. Phương pháp phân tích này không nhạy cảm với số lượng mẫu và mẫu có thường xuyên hay không, nó có nhiều ứng dụng và quá trình tính toán được đơn giản hóa và tinh gọn, rất thuận tiện, luôn thống nhất tốt giữa kết quả định lượng và kết quả phân tích định tính.

2.4.1 Bước phân tích

Nếu số phần tử cần khảo sát là n và có m chỉ tiêu đánh giá thì mỗi giá trị thuộc tính của các chỉ tiêu đánh giá tương ứng với từng tổ hợp phương án là $x_i(k)$, trong đó $i \in [1, n]$, $k \in [1, m]$, khi đó ma trận so sánh được viết như sau:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(m) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n(1) & x_n(2) & \cdots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Do đơn vị và kích thước của mỗi chỉ tiêu đánh giá thường khác nhau, nên không thể so sánh được với nhau. Do vậy, cần phải tiến hành chuẩn hóa từng chỉ tiêu căn cứ thuộc tính giá trị

của từng chỉ tiêu khác nhau, thông thường có bốn chỉ tiêu chuẩn hóa, bao gồm chỉ tiêu lợi ích, chỉ tiêu giá thành, chỉ tiêu khoảng thời gian và chỉ tiêu loại cố định, được biến đổi dựa trên phạm vi nào đó. Các số liệu đo, cũng là tiêu chí TUI, ở đây là khả năng chịu tải và hệ số ma sát có thứ nguyên, miền giới hạn và chiều biến thiên khác nhau. Sau khi được chuẩn hóa, số liệu không thứ nguyên, giới hạn trong khoảng [0, 1] và “lớn tốt hơn”.

Đối với tiêu chí lợi ích, tức là dạng “lớn tốt hơn” ở đây là khả năng chịu tải, ta có:

$$y_i(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (2)$$

Đối với tiêu chí giá thành, tức là dạng “nhỏ tốt hơn” ở đây là (hệ số ma sát) ta có:

$$y_i(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (3)$$

Trong đó: $i = 1, 2, \dots, n$ – số thứ tự thí nghiệm, $n = 25$; $k = 1, 2, \dots, m$ – thông số đo, $k = 2$ (khả năng chịu tải và hệ số ma sát).

Trong các chỉ tiêu đánh giá trên, chỉ tiêu lợi ích thuộc chỉ số tỷ lệ thuận, tức là khi giá trị của nó tăng lên thì kết quả mục tiêu tốt hơn; chỉ tiêu giá thành thuộc chỉ số tỷ lệ nghịch, tức là khi giá trị của nó tăng lên thì kết quả mục tiêu tệ hơn hay nói cách khác chỉ tiêu càng nhỏ sẽ càng tốt; chỉ tiêu cố định không có yêu cầu tuyệt đối về giá trị của chỉ tiêu loại trừ, miễn là giá trị của nó dao động trong một phạm vi giá trị cụ thể hoặc giá trị của nó gần vô hạn với một giá trị cụ thể, thì đó là chỉ tiêu tốt nhất; chỉ tiêu về khoảng thời gian cần phải thỏa mãn rằng giá trị của nó nằm trong một phạm vi nhất định của một khoảng thời gian nhất định hoặc tiếp cận vô hạn với một khoảng nhất định, đó là một chỉ tiêu tốt hơn. Bằng cách biến đổi và thay đổi ma trận quyết định [X] bằng cách chọn loại chỉ tiêu thích hợp, có thể thu được ma trận chuẩn hóa $Y (y_i)_{n \times m}$ không thứ nguyên, cụ thể là:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1(1) & y_1(2) & \dots & y_1(m) \\ y_2(1) & y_2(2) & \dots & y_2(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_n(1) & y_n(2) & \dots & y_n(m) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ma trận tham chiếu là một tiêu chuẩn tham chiếu lý tưởng về mặt lý thuyết, thông thường nó bao gồm giá trị cao nhất (giá trị lớn nhất hoặc thấp nhất) của mỗi chỉ số đo lường trong hệ thống đánh giá. Các thước đo khác tốt nhất cho mục tiêu toàn diện của hệ thống có thể cũng được lựa chọn kết hợp với tình hình thực tế.

$$Y_0 = [y_0(1) \quad y_0(2) \quad \dots \quad y_0(n)] \quad (5)$$

Bảng 5: Thiết kế thực nghiệm theo Taguchi L25 (5⁵) và kết quả ảnh hưởng của các yếu tố đến khả năng chịu tải và hệ số ma sát

TT	Mạng trực giao sự kết hợp yếu tố và mức độ			Kết quả thí nghiệm	
	Đường kính D (μm)	Độ sâu H (μm)	Mật độ phân bố Δ (%)	Tải trọng (Pa)	Hệ số ma sát (μt)
1	1	1	1	12134107	0,003792661
2	1	2	2	12122724	0,003798233
3	1	3	3	12116295	0,003797579
4	1	4	4	12106143	0,003800059
5	1	5	5	12116074	0,003796213
6	2	2	5	12212302	0,003768992
7	2	3	1	12177339	0,003781709
8	2	4	2	12210586	0,003771946
9	2	5	3	12248512	0,003758075
10	2	1	4	12158969	0,003783755
11	3	3	4	12217866	0,003769559
12	3	4	5	12337794	0,003738120
13	3	5	3	12423880	0,003710756
14	3	1	2	12216850	0,003762985
15	3	2	1	12274737	0,003747809
16	4	4	3	12372633	0,003725660
17	4	5	4	12586854	0,003673745
18	4	1	5	12257819	0,003750000
19	4	2	2	12400788	0,003709417
20	4	3	1	12521272	0,003679306
21	5	5	2	12595991	0,003663837
22	5	1	3	12318598	0,003730824
23	5	2	4	12540910	0,003672356
24	5	3	5	12738885	0,003627305
25	5	4	1	12915166	0,003567290

2.4.2 *Tính hệ số quan hệ xám (hệ số xám)*

Hệ số xám hay hệ số quan hệ xám (Grey Relational Coefficient) thể hiện khoảng cách giữa giá trị chuẩn bị đang xét và giá trị lí tưởng.

$$\zeta_i(k) = \frac{\min|y_0(k) - y_i(k)| + \rho_1 \cdot \max|y_0(k) - y_i(k)|}{|y_0(k) - y_i(k)| + \rho_1 \cdot \max|y_0(k) - y_i(k)|} \quad (6)$$

Trong đó: - $|y_{0i}^*(k) - y_i^*(k)|$: Giá trị tuyệt đối của sai lệch giữa các giá trị chuẩn đang xét và giá trị lí tưởng:

$$\Delta_{0i}(k) = |y_{0i}^*(k) - y_i^*(k)| \quad (7)$$

- ρ_1 : Hệ số phân biệt (Distinguishing Coefficient) giúp cho hệ số xám phân bố đều nhau hơn, $0 < \rho_1 < 1$, thường lấy bằng 0,5.

Khi ma trận tham chiếu bao gồm giá trị tối ưu hoặc giá trị xấu nhất của mỗi chỉ tiêu, một phương pháp tính toán hệ số quan hệ xám (6) đơn giản hơn và cải tiến có thể được sử dụng khi tính toán hệ số tương quan là:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min|y'_0(k) - y'_i(k)| + \rho \cdot \max|y'_0(k) - y'_i(k)|}{|y'_0(k) - y'_i(k)| + \rho \cdot \max|y'_0(k) - y'_i(k)|} \quad (8)$$

Khi đó ma trận phán đoán quan hệ xám là:

$$\zeta = \begin{bmatrix} \zeta_1(1) & \zeta_1(2) & \dots & \zeta_1(n) \\ \zeta_2(1) & \zeta_2(2) & \dots & \zeta_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \zeta_m(1) & \zeta_m(2) & \dots & \zeta_m(n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Từ các phương trình (6), (7) ta có phương trình rút gọn cho biểu thức quan hệ xám như sau:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \psi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi \Delta_{\max}} \quad (10)$$

2.4.3 *Tính toán thứ tự quan hệ xám*

Để tính toán thứ tự tương quan của từng tổ hợp tham số, trước tiên cần xác định trọng số của từng chỉ tiêu đánh giá. Có rất nhiều phương pháp để xác định trọng số, bao gồm phương pháp cân bằng, phương pháp giá trị Entropy, phương pháp trọng số CRITIC, phương pháp phân tích từng phần AHP... Ngoài ra, cũng còn có sự kết hợp của các phương pháp trọng số khác, bao gồm

phương pháp trọng số kết hợp entropy AHP và phương pháp trọng số kết hợp CRITIC-AHP... Tổng hệ số tương quan của các chỉ tiêu đánh giá khác nhau của các đối tượng đánh giá khác nhau và các yếu tố tương ứng của dãy quy chiếu và các tích số tương ứng để phản ánh mức độ tương quan xám của các phương án tổ hợp n. Mức độ tương quan càng lớn thì quyết định phương án tương ứng càng tối ưu. Mức độ quan hệ màu xám được viết lại là:

$$\gamma_i(k) = \sum_{k=1}^m w(k) \zeta_i(k) \quad (11)$$

Trong đó: $w(k)$ – trọng số của tiêu chí T_{UH} thứ k; m – số tiêu chí, $m = 2$, với điều kiện $\sum_{k=1}^m w(k) = 1$, tiêu chí cần được ưu tiên hơn sẽ được gán trọng số lớn hơn. Trong nghiên cứu này, tiến hành nghiên cứu về quá trình mài mòn, trong đó hệ số ma sát cần được ưu tiên hơn so với giá trị khả năng chịu tải, do đó chọn lựa $w(1) = 0,3$; $w(2) = 0,7$.

Để có được mức tương quan của từng nhân tố, cần phải có được tương quan trung bình của một nhân tố tương ứng với một cấp duy nhất và tương quan trung bình thu được càng lớn thì giá trị cấp tương ứng với nhân tố càng tốt.

2.4.4 *Kết quả và phân tích quan hệ xám*

Bằng tổ hợp thực nghiệm trực giao đã thiết kế dựa trên phương pháp Taguchi xám, các giá trị của n và m có thể được xác định, trong đó $n = 25$, $m = 2$. Khi đó, ma trận quyết định đã xây dựng theo (4) được tính toán và đưa vào mục dữ liệu chuẩn hóa của bảng 6.

Để xác định ma trận tham chiếu, lấy giá trị lớn nhất của giá trị tham chiếu của mỗi cột trong Y làm tiêu chuẩn tham chiếu của nó, ma trận tham chiếu có thể thu được như sau:

$$Y_0 = [1,00000 \quad 1,00000]$$

Vì giá trị lớn nhất của mỗi cột được chọn làm giá trị tối ưu, phương trình (8) có thể được sử dụng để tính toán hệ số tương quan của từng

giá trị tham chiếu. Đồng thời, có thể thu được ma trận phán đoán tương quan xám, kết quả được đưa vào mục hệ số xám của bảng 6.

Do khả năng chịu tải và tính năng ma sát-mài mòn của kết cấu vi mô được nghiên cứu đều quan trọng như nhau, nên phương pháp trọng số bằng nhau được chọn làm tiêu chuẩn và có hai

chỉ số đánh giá trong bài báo này, vì vậy trọng số như sau:

$$w = [0,5 \quad 0,5]$$

Đồng thời, theo (11) có thể thu được thêm mức độ tương quan xám của 25 nhóm phương án và kết quả được thể hiện trong bảng 6.

Bảng 6: Kết quả phân tích ma trận và tính toán quan hệ xám

TT	Dữ liệu chuẩn hóa		$\Delta_{0i}(k)$		Hệ số xám $\xi(k)$		Độ xám
	P	μ_t	P	μ_t	P	μ_t	γ
1	0,03457	0,03178	0,96543	0,96822	0,34120	0,34055	0,340743
2	0,02050	0,00784	0,97950	0,99216	0,33795	0,33509	0,335945
3	0,01255	0,01065	0,98745	0,98935	0,33615	0,33572	0,335846
4	0,00000	0,00000	1,00000	1,00000	0,33333	0,33333	0,333333
5	0,01228	0,01652	0,98772	0,98348	0,33608	0,33705	0,336757
6	0,08800	0,07883	0,91200	0,92117	0,35411	0,35182	0,352509
7	0,12910	0,12078	0,87090	0,87922	0,36472	0,36252	0,363183
8	0,17598	0,18037	0,82402	0,81963	0,37764	0,37889	0,378516
9	0,06530	0,07004	0,93470	0,92996	0,34850	0,34966	0,349314
10	0,13122	0,13347	0,86878	0,86653	0,36529	0,36589	0,365709
11	0,39274	0,38366	0,60726	0,61634	0,45157	0,44789	0,448993
12	0,13684	0,15927	0,86316	0,84073	0,36679	0,37293	0,371091
13	0,20839	0,22447	0,79161	0,77553	0,38711	0,39199	0,39053
14	0,13810	0,13103	0,86190	0,86897	0,36713	0,36524	0,365807
15	0,28633	0,26610	0,71367	0,73390	0,41198	0,40522	0,407245
16	0,36420	0,38941	0,63580	0,61059	0,44022	0,45021	0,447212
17	0,51312	0,51877	0,48688	0,48123	0,50665	0,50956	0,508689
18	0,32940	0,31963	0,67060	0,68037	0,42713	0,42359	0,424655
19	0,59419	0,54266	0,40581	0,45734	0,55199	0,52228	0,531193
20	0,18748	0,21506	0,81252	0,78494	0,38095	0,38912	0,38667
21	1,00000	1,00000	0,00000	0,00000	1,00000	1,00000	1,00000
22	0,60548	0,58522	0,39452	0,41478	0,55896	0,54658	0,550295
23	0,26261	0,29744	0,73739	0,70256	0,40408	0,41578	0,412269
24	0,53740	0,54863	0,46260	0,45137	0,51943	0,52556	0,523716
25	0,78211	0,74217	0,21789	0,25783	0,69648	0,65978	0,670789

Từ bảng 6, có thể từng bước thu được thêm mức độ tương quan trung bình của từng mức thông số của kết cấu vi mô. Đối với cùng một tham số của kết cấu vi mô (Microtexture), mức độ tương quan trung bình của mức tương ứng của nó có thể phản ánh trực tiếp chất lượng của tham số ở mức đó, tức là mức tương quan trung bình càng lớn thì giá trị mức càng tối ưu và ngược lại mức tương quan trung bình càng nhỏ, tức giá trị càng kém.

Bảng 7: Mức độ quan hệ trung bình của từng mức tham số kết cấu vi mô

Đường kính (μm)	Mức độ quan hệ trung bình	Độ sâu (μm)	Mức độ quan hệ trung bình	Mật độ (%)	Mức độ quan hệ trung bình
200	0,33664	40	0,41015	0,2	0,37095
300	0,36190	80	0,40903	0,4	0,41186
400	0,40410	120	0,34417	0,6	0,44226
500	0,46016	160	0,44096	0,8	0,50618
600	0,63266	200	0,51666	1,0	0,45089

Từ bảng 7 có thể nhận thấy, trong các tham số của kết cấu vi mô, khi đường kính hình tròn là 600 μm , chiều sâu của kết cấu vi mô là 200 μm và mật độ phân bố là 80% thì mức độ quan hệ trung bình tương ứng là lớn nhất. Do đó, đề xuất kết hợp nhóm tham số trên là sự kết hợp kết cấu vi mô tối ưu nhất. Sự kết hợp tham số tối ưu, tức là sự kết hợp tối ưu của kết cấu vi mô hình tam giác cân có cửa mở hình tròn với thông số là: Hình tròn có đường kính 600 μm ; độ sâu 200 μm ; và mật độ phân bố là 80%

Thông qua tính toán mô phỏng trên Ansys Fluent và sau quá trình TỪH ứng dụng phương pháp Taguchi xám, kết quả chứng minh, khả năng chịu tải của mô hình màng dầu cặp ma sát gói trượt-đĩa nghiêng được bố trí kết cấu vi mô là 12915166 Pa, hệ số ma sát của cặp ma sát được bố trí kết cấu vi mô là 0,00356. So sánh kết quả của 25 thí nghiệm trực giao, có thể thấy rằng mô hình kết cấu vi mô với tổ hợp tham số tối ưu đã tăng khả năng chịu lực lớn nhất và đồng thời hệ số ma sát của cặp ma sát cũng nhỏ hơn. Do đó, sự kết hợp tham số được TỪH có thể cải thiện tốt hiệu suất của mô hình kết cấu vi mô. So với mô hình không được kết cấu, khả năng chịu tải của màng dầu cặp ma sát gói trượt-đĩa

nghiêng tăng lên 7,23% và hệ số ma sát của màng dầu giảm 12,95%.

3 Kết luận

- Khi cấu trúc vi mô dạng tam giác cân có cửa mở hình tròn được bố trí trên bề mặt cặp ma sát gói trượt-đĩa nghiêng của bơm piston hướng trục, mức độ ảnh hưởng của các tham số kết cấu vi mô đối với khả năng chịu tải và hệ số ma sát của cặp ma sát gói trượt-đĩa nghiêng lần lượt như sau: (1) đường kính > mật độ > độ sâu kết cấu và (2) độ sâu > mật độ > đường kính;

- 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 tam giác cân cửa mở hình tròn đối với hệ số ma sát và tải trọng của cặp ma sát gói trượt-đĩa nghiêng 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 TỪH mục tiêu để có hệ số ma sát nhỏ nhất, lực đơn vị (sức chịu tải) lớn nhất: Đường kính hình tròn 600 μm ; độ sâu 200 μm ; mật độ 80%. Lúc này, hệ số ma sát và lực đơn vị của cặp ma sát gói trượt-đĩa nghiêng lần lượt là 0,00356 và 12915166 Pa, so với cặp ma sát nguyên mẫu không bố trí kết cấu vi mô, hệ số ma sát giảm 6,32% trên cơ sở nâng cao khả năng chịu tải 12,95%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. **Taguchi G.** System of Experimental Design. *UNIPUB/Kraus International Publications, New York, 1987.*
2. **Taguchi G., Taguchi S.** Taguchi Methods: Orthogonal Arrays and Linear Graphs. *American Supplier Institute, Dearborn, MI, 1987.*
3. **Murat K., et al.** Friction and Wear Studies between Cylinder Liner and Piston Ring Air using Taguchi Design Method [J]. *Advances in Engineering Software, 2011, 42(3):59503.*
4. **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, 2022-01-26, 1-10.*
5. **Le Van Loi, Xu Ping, Yu Ying Hua.** Research Status on Surface Texture in Lubrication and Friction Reduction of Tribological Systems. *Mining Industry Journal. 2022(5), PP. 40-48.*
6. **Jonathon K. Schuh, Randy H. Ewoldt.** Asymmetric Surface Textures Decrease Friction with Newtonian Fluids in Full Film Lubricated Sliding Contact[J]. *Tribology International, 2016, 19, PP. 490-498.*