



# 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 PÍT TÔNG HƯỚNG TRỰC

Lê Văn Lợi, Xu Ping, Yu Yinghua, Nguyễn Văn Tân  
Đại học Kỹ thuật Liêu Ninh, Trung Quốc

Trần Văn Hiệp  
Đại học Nghiên cứu Công nghệ Quốc gia (MISIS), Liên bang Nga  
Email: loile.iemm@gmail.com

## TÓM TẮT

Để nghiên cứu ảnh hưởng của kết cấu vi mô, nâng cao hiệu suất cặp ma sát của bơm pitt tông 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 thực nghiệm và phương pháp quan hệ mờ 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. Tiến hành phân tích mô phỏng, so sánh với cặp ma sát nguyên mẫu không được bố trí kết cấu vi mô, từ đó đánh giá về khả năng chịu tải và hệ số ma sát của cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng.

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

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong hơn nửa thế kỷ qua, các nghiên cứu về kết cấu bề mặt ("vân", "hoa vân" 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, cải thiện khả năng chống mài mòn và cải thiện 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 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 kỳ 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 cần quan tâm là khả năng chịu tải và hệ số ma sát của mỗi trường hợp. Trong đó, mỗi yếu tố cần 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 cần quan tâm. Một số tác giả đã sử dụng phân tích Taguchi [3, 4, 6, 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 (GRA-Grey Relational Analysis) là một phương pháp thống kê hiệu quả để đánh giá mức độ tiệm cận

giữa các đối tượng bằng cách sử dụng cấp quan hệ xám. Nó được phát triển bởi Deng và các cộng sự [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- Fuzzy Grey Relational Analysis). 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 tác giả 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 gổi trượt-đĩa nghiêng của bơm pít tổng hướng trục.

**2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU**

**2.1. Giới thiệu khái quát về phương pháp Taguchi xám**

Tối ưu hóa 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 tối ưu (TU) đồng thời xét đến một số tiêu chí được gọi là TU đa mục tiêu (MOOP- Multi-Objective Optimization).

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

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

$$\min y = [y_1(x) \dots y_z(x)]^T \tag{a}$$

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

Trong đó,  $x = [x_1 \dots x_i \dots x_n]^T$  là vec tơ các biến đầu vào (Input), cũng là biến điều khiển (Control Variable);  $y = [y_1 \dots y_j \dots y_z]^T$  là vec tơ mục tiêu, mỗi hàm biểu diễn một tiêu chí TU; 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 TU một mục tiêu. Như vậy, TU một mục tiêu là trường hợp riêng của TU tổng quát, khi số hàm mục tiêu là 1.

Đích cuối cùng của TU là chọn ra được một nghiệm tối ưu. Bài toán TU 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 3 nhóm phương pháp: (1) Đưa ra trước khi TU; (2) Đưa ra sau khi TU và (3) Đưa ra trong khi TU. Bài báo này trình bày một trong các phương pháp thuộc nhóm (1): Phương pháp Taguchi xám và ứng dụng của nó vào TU 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 gổi trượt-đĩa nghiêng của bơm pít tổng 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. Tối ưu một mục tiêu là TU 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 TU 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 TU xám. Tên đầy đủ của nó là TU dựa trên phân tích quan hệ xám (GRAO- Grey Relational Analysis Based Optimization).

Phương pháp Taguchi được ứng dụng khá rộng rãi trong TU 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 TU một mục tiêu. Phương pháp Taguchi xám

kết hợp phương pháp Taguchi với phân tích quan hệ xám, có thể dùng trong TU đa mục tiêu. Tên đầy đủ là Phương pháp 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 H.1.

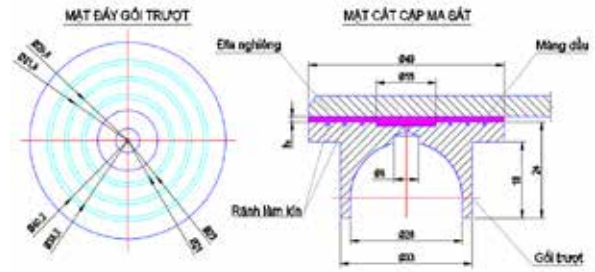
Để nâng cao hiệu quả tính toán và đảm bảo độ chính xác của kết quả mô phỏng, cặp ma sát gối trượt- đĩa nghiêng bơm pít tông hướng trục loại (250CY14-1B) được tiến hành chia nhỏ, và lựa chọn 1 trong số 7 gối trượt đại diện cho nhóm gối trượt (Hình H.1) để tiến hành phân tích và thiết lập điều kiện biên tuần hoàn tại bề mặt phân chia.

**Bảng 1. Thông số kỹ thuật bơm pít tông hướng trục loại 250MCY14**

TT	Thông số kỹ thuật	Đơn vị	Giá trị	Ghi chú
1	Áp suất làm việc	MPa	31,5	
2	Tần số quay trục chính	r/min	1500	
3	Bán kính phân chia pít tông	mm	58	
4	Đường kính đầu tròn pít tông	mm	35	
5	Số lượng pít tông	-	7	
6	Góc lệch đĩa nghiêng	-	18	
7	Đường kính lỗ cấp dầu bôi trơn trong pít tông	mm	1,5	
8	Chiều dài lỗ cấp dầu bôi trơn trong pít tông	mm	35,55	
9	Mật độ dầu thủy lực	kg/m <sup>3</sup>	872,5	
10	Độ nhớt	m <sup>2</sup> /s (40°C)	115.10 <sup>-6</sup>	
11	Độ nhớt động học	Pa.s	0,155	

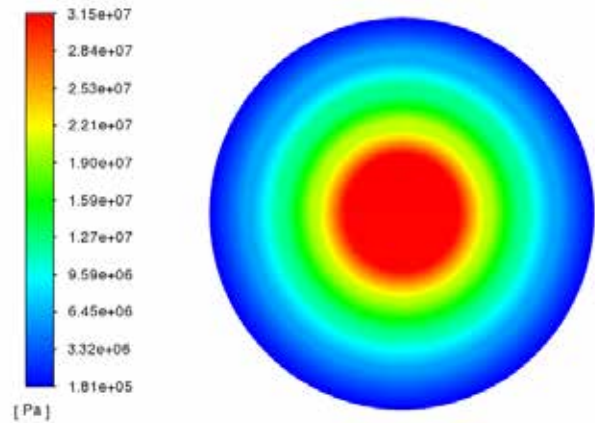
Sử dụng Fluent Meshing trong Ansys Fluent để tiến hành chia lưới đa diện phân chia mô hình, tổng số phần tử lưới trong mô hình hữu hạn khoảng 134487, số nút khoảng 167238, trong đó trên 98% chất lượng lưới trên 0,5µm, nhỏ nhất là 0,35µm. Nhập các thông số phân tích trong Bảng 1 vào Ansys Fluent để tiến 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 trong các Hình H.2a, H.2b.

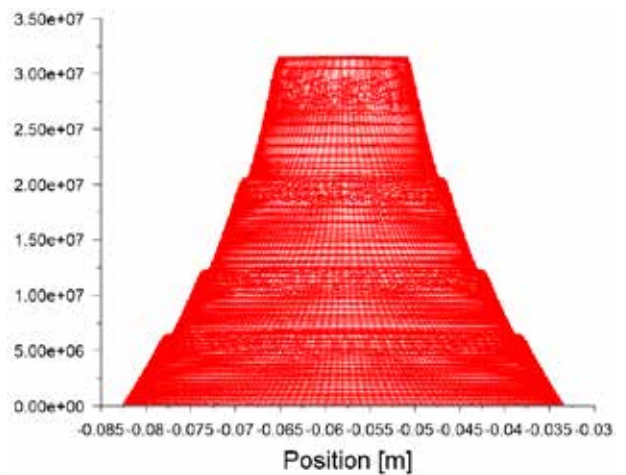


**H.1. Kết cấu hình học cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng bơm pít tông**

Kết quả cho thấy, khả năng chịu tải và hệ số ma sát của màng dầu khe hở của cặp ma sát, lần lượt là: 12044342,11 Pa; 0,00397 Pa.



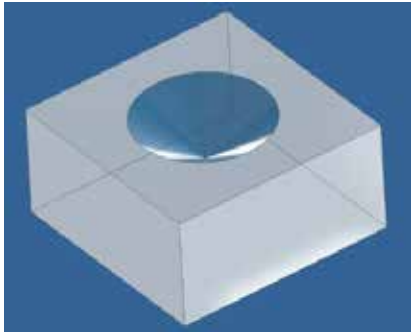
(a)



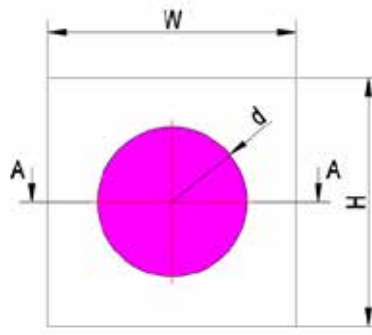
(b)

**H.2. Áp suất phân bố trên bề mặt cặp ma sát gối trượt**

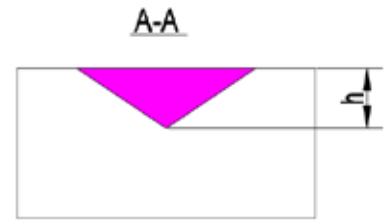
a- phân bố áp suất bề mặt đáy; b- phân bố áp suất ngoài rãnh làm kín



a



b



c

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

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

**2.3. Ứng dụng phương pháp Taguchi xám trong tối ưu hóa thông số hình học kết cấu vi mô**

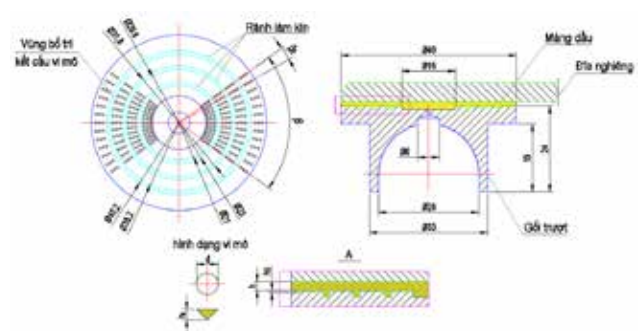
**2.3.1. Xây dựng và tối ưu hóa thông số đơn nguyên kết cấu vi mô**

Thiết kế thực nghiệm Taguchi là một phương pháp được sử dụng phổ biến trong khảo sát 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. 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) [4, 5, 6, 7]... 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 ( $\mu\text{m}$ )	Độ sâu H ( $\mu\text{m}$ )	Mật độ phân bố $\Delta$ (%)
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



**H.4. 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 Ansys 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

**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 gối trượt-đĩa nghiêng**

Thí nghiệm	Thông số hình học			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	200	40	0,2	12134107	0,003792661
2	200	80	0,4	12122724	0,003798233
3	200	120	0,6	12116295	0,003797579
4	200	160	0,8	12106143	0,003800059
5	200	200	1,0	12116074	0,003796213
6	300	80	0,4	12177339	0,003781709
7	300	120	0,6	12210586	0,003771946
8	300	160	0,8	12248512	0,003758075
9	300	200	1,0	12158969	0,003783755
10	300	40	0,2	12212302	0,003768992
11	400	120	0,6	12423880	0,003710756
12	400	160	0,8	12216850	0,003762985
13	400	200	1,0	12274737	0,003747809
14	400	40	0,2	12217866	0,003769559
15	400	80	0,4	12337794	0,003738120
16	500	160	0,8	12400788	0,003709417
17	500	200	1,0	12521272	0,003679306
18	500	40	0,2	12372633	0,003725660
19	500	80	0,4	12586854	0,003573745
20	500	120	0,6	12257819	0,003750000
21	600	200	1,0	12915166	0,003567290
22	600	40	0,2	12595991	0,003563837
23	600	80	0,4	12318598	0,003730824
24	600	120	0,6	12540910	0,003672356
25	600	160	0,8	12738885	0,003527305

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  $L_{25}(5^5)$  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  $L_{25}(5^5)$  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 H.3 và Hình H.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.



**H.3 Đồ thị biểu diễn sự thay đổi tải trọng của các thí nghiệm**



**H.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 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)

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 3 yếu tố ảnh hưởng,  $R_1$  là phạm vi sai lệch 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

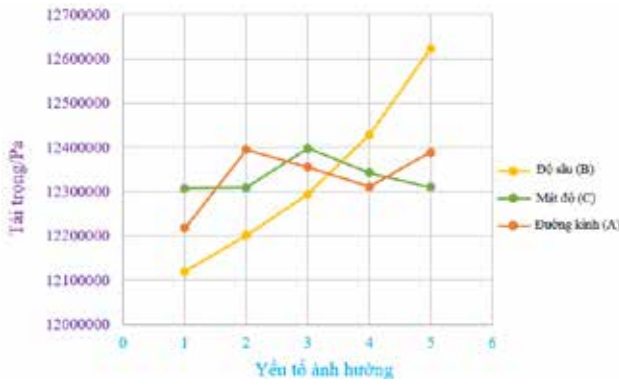
các yếu tố ảnh hưởng, và  $R_2$  là phạm vi sai lệch của hệ số ma sát.

Qua phân tích số liệu trong 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 3 tham số, và sự kết hợp tối ưu giữa 3 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 3 tham số, và sự kết hợp tối ưu giữa 3 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 cấu vi mô) > yếu tố C (mật độ phân bố kết cấu vi mô) > tham số A (đường kính kết cấu vi mô).

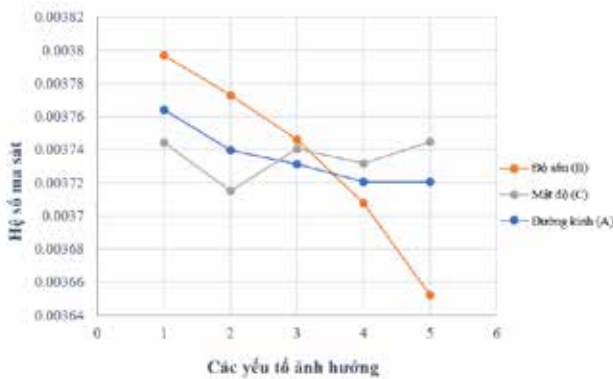
Từ Bảng 4 ta có đồ thị đường cong ảnh hưởng của 5 cấp độ của từng tham số ảnh hưởng đến khả năng chịu tải và hệ số ma sát của màng dầu, như trong các Hình H.5 và H.6.

**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 gối 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



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



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

## 2.4. Thiết kế tối ưu hóa tham số hình học kết cấu vi mô

Trong bài báo này, việc thiết kế tối ưu hóa ảnh hưởng của các tham số kết cấu vi mô được thực hiện thông qua lý thuyết hệ xám. Phân tích quan hệ xám 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  $m$ , và có  $n$  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  $i \in [1, m]$ ;  $k \in [1, n]$ , khi đó ma

trận so sánh được viết như sau:

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

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 TỰ, ở đây (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  $Y (y_i)_{m \times n}$  không thứ nguyên, cụ thể là:

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

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, và 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, gọi là:

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

**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.

$$\zeta_i(k) = \frac{\min |y_0(k) - y_i(k)| + \rho_1 \cdot \max |y_0(k) - y_i(k)|}{|y_0(k) - y_i(k)| + \rho_1 \cdot \max |y_0(k) - y_i(k)|} \quad (5)$$

$k = 1, 2, \dots, n$

Trong đó:

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

$$\Delta_{0i}(k) = |y_{0i}^*(k) - y_i^*(k)| \quad (6)$$

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

**Bảng 5. Thiết kế thực nghiệm theo Taguchi L25 (5<sup>3</sup>) và kết quả ảnh hưởng của các yếu tố đến khả năng chịu tải và hệ số ma sát của cặp ma sát gối trượt-đĩa nghiêng**

Thí nghiệm	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





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 (5) đơn giản hơn và cải tiến có thể được sử dụng khi tính toán hệ số tương quan, đó là:

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

$$k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Khi đó ma trận phán đoán quan hệ xám sẽ là:

$$\zeta = \begin{bmatrix} \zeta_1(1) & \zeta_1(2) & \dots & \zeta_1(n) \\ \zeta_2(1) & \zeta_2(2) & \dots & \zeta_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \zeta_m(1) & \zeta_m(2) & \dots & \zeta_m(n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Từ các phương trình (5) (6) ta có phương trình rút gọn cho biểu thức quan hệ xám như sau:

$$\hat{1}_i(k) = \frac{\hat{A}_{\min} + \vartheta \hat{A}_{\max}}{\hat{A}_{0i}(k) + \vartheta \hat{A}_{\max}} \quad (9)$$

#### 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 (m). Mức độ tương quan càng lớn thì quyết định phương án tương ứng càng tối ưu. Mức độ quan hệ xám được viết lại là:

$$\gamma_i(k) = \sum_{k=1}^m w(k) \zeta_i(k) \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Trong đó:

$w(k)$  - trọng số của tiêu chí tối ưu hóa 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

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

Do khả năng chịu tải và tính năng ma sát và mài mòn của kết cấu vi mô được nghiên cứu trong bài báo này 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 biểu thức (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).

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.

Từ Bảng 7 có thể nhận thấy, trong các tham số của kết cấu vi mô, khi đường kính hình tròn là 600  $\mu\text{m}$ , chiều sâu của kết cấu vi mô là 200  $\mu\text{m}$ , và mật

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

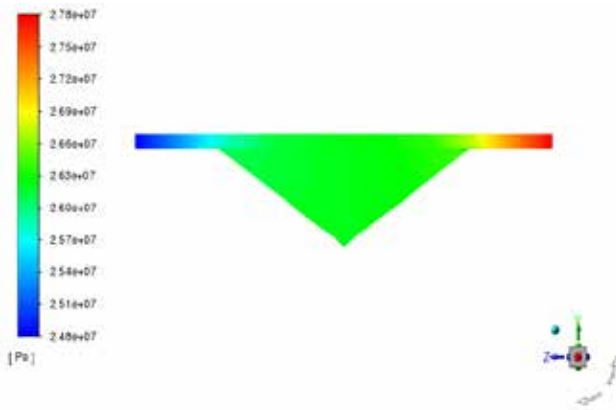
Thí nghiệm	Dữ liệu chuẩn hóa		$\ddot{A}_{oi} (k)$		Hệ số xám $\hat{i} (k)$		Độ xám	Ghi chú
	P	$\mu t$	P	$\mu t$	P	$\mu t$	$\gamma$	
1	0.03457	0.03178	0.96543	0.96822	0.34120	0.34055	0.340743	
2	0.02050	0.00784	0.97950	0.99216	0.33795	0.33509	0.335945	
3	0.01255	0.01065	0.98745	0.98935	0.33615	0.33572	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	

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

Đường kính ( $\mu m$ )	Mức độ quan hệ trung bình	Độ sâu ( $\mu m$ )	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

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  $\mu m$ , độ sâu 200  $\mu m$  và mật độ phân bố là 80%.

Thông qua phân tích mô phỏng trên Ansys Fluent và sau quá trình tối ưu hóa kết hợp ứng dụng phương pháp Taguchi xám, kết quả chứng minh, khả năng chịu tải của mô hình màng dầu cặp ma sát gối 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.



#### H.7. Biểu đồ mô phỏng phân bố áp suất nhóm kết cấu vi mô tối ưu

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 tối ưu hóa 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 gổ trượt-đĩa nghiêng tăng lên 7,23% và hệ số ma sát của màng dầu giảm 10,32%.

### 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 gổ trượt-đĩa nghiêng của bơm pittông 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 gổ 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 gổ 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 tối ưu hóa mục tiêu để có hệ số ma sát nhỏ nhất, lực đơn vị (sức chịu tải) lớn nhất: đường kính hình tròn: 600  $\mu\text{m}$ , độ sâu: 200  $\mu\text{m}$ , mật độ: 80%. Lúc này, hệ số ma sát và lực đơn vị của cặp ma sát gổ 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 10,32% trên cơ sở nâng cao khả năng chịu tải 7,32%□

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Taguchi, G. (1987), System of Experimental Design, D. Clausing (Ed), Vols 1-2, UNIPUB/Kraus International Publications, New York.
2. Taguchi, G. and Taguchi, S. (1987), Taguchi Methods: Orthogonal Arrays and Linear Graphs, American Supplier Institute, Dearborn, MI.
3. Murat K. et al. (2011), Friction and wear studies between cylinder liner and pittông piston ring air using Taguchi design method [J]. Advances in engineering software, 2011,42(3): 59503.
4. Le Van Loi, Xu Ping, Yu Ying Hua (2022), Research Status On Surface Texture In Lubrication And Friction Reduction Of Tribological Systems. Mining Industry Journal. Hanoi, 2022(5):40-48
5. 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].
6. Jonathon K. Schuh, Randy H. Ewoldt (2016), Asymmetric surface textures decrease friction with Newtonian fluids in full film lubricated sliding contact J], Tribology International 1, 2016,19:490 - 498.
7. 赵亚丽, 张斯琪, 鲁文茜, 陈冲, 魏莉. 基于多指标权重分析和正交设计法优选如意金黄散复方提取工艺[J]. 中国新药杂志, 2021, 30(15):1428-1434.
8. Kasman S. (2013), Multi-response optimization using the Taguchi-based grey relational analysis: a case study for dissimilar friction stir butt welding of AA6082-T6/AA5754-H111. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 68 (1-4):795-804. doi:10.1007/s00170-012-4720-0
9. Singh S. (2012), Optimization of machining characteristics in electric discharge machining of 6061Al/Al2O3p/20P composites by grey relational analysis. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 63 (9-12):1191-1202. doi:10.1007/s00170-012-3984-8
10. Li G-D., Yamaguchi D., Nagai M. (2007), A grey-based rough decisionmaking approach to supplier selection. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 36 (9-10):1032-1040.

doi:10.1007/s00170-006-0910-y

11. Abhang LB., Hameedullah M. (2012), Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in turning by using grey relational analysis. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 63 (1-4):13-24. doi:10.1007/s00170-011-3857-6.
12. Younas M., Jaffery SHI., Khan M., Khan MA., Ahmad R., Mubashar A., Ali L. (2019), Multi-objective optimization for sustainable turning Ti6Al4V alloy using grey relational analysis (GRA) based on analytic hierarchy process (AHP). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 105 (1):1175-1188. doi:10.1007/s00170-019-04299-5

## APPLICATION OF GRAY-BASED TAGUCHI METHOD IN OPTIMAL ANALYSIS OF EFFECT OF SURFACE MICRO-TEXTURE ON FRICTION AND WEAR PERFORMANCE OF SLIPER-SWASH PLATE PAIRS IN AXIAL PISTON PUMPS

Le Van Loi, Xu Ping, Yu Yinghua, Nguyen Van Tan, Tran Van Hiep

### ABSTRACT

*In order to study the influence of microstructure and improve the friction pair efficiency of the swash plate axial piston pump, the sliding-swash plate friction pair was selected as the research object. This paper analyzes and evaluates the influence of microstructural geometric parameters on the bearing capacity and friction coefficient under high pressure conditions. Application of the Taguchi method to build experimental matrix, Grey Relation Analysis method (GRA) to analyze the influence of microstructure parameters on the bearing capacity and friction coefficient of the friction pair. 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 sliding-swash plate pair friction pair.*

**Keywords:** sliding-swash plate, coefficient of friction, bearing capacity, micro-texture, Gray-Based Taguchi Method,

**Ngày nhận bài:** 20/9/2022;

**Ngày gửi phản biện:** 22/9/2022;

**Ngày nhận phản biện:** 15/10/2022;

**Ngày chấp nhận đăng:** 20/11/2022.

**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.