

TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI  
PGS. TS. NGUYỄN DOANH Ý

GIÁO TRÌNH

# MẠ SÁT MÒN BÔI TRƠN TRIBOLOGY



NHÀ XUẤT BẢN XÂY DỰNG



**TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI  
PGS. TS. NGUYỄN DOÃN Ý**

**GIÁO TRÌNH  
MA SÁT - MÒN - BÔI TRƠN  
TRIBOLOGY**

**NHÀ XUẤT BẢN XÂY DỰNG  
HÀ NỘI - 2005**

## LỜI NÓI ĐẦU

Một trong những nhiệm vụ quan trọng nhất đặt ra đối với nước ta trong thời kì tiếp cận với tự động hóa và hiện đại hóa là sử dụng hiệu quả nhất các trang thiết bị hiện có. Nói cách khác là: cần phải nâng cao độ tin cậy và tuổi thọ của các máy móc, dụng cụ, trang thiết bị, nhằm nâng cao hiệu quả kinh tế và xã hội đối với đầu tư phát triển.

Cùng với sự phát triển khoa học kỹ thuật, các yêu cầu mới cũng được đặt ra đối với các máy móc thiết bị thí dụ như trong điều kiện chân không, nhiệt quá cao, quá thấp, môi trường xâm thực, ăn mòn hóa học... Độ tin cậy và tuổi thọ cần phải được xác định, khi các thiết bị làm việc trong điều kiện khóc liệt này. Việc nâng cao độ tin cậy và tuổi thọ không chỉ mang ý nghĩa lớn với các nhà máy, công ty mà còn là nhiệm vụ quan trọng đối với cả quốc gia và quốc tế.

Trong các vấn đề chung liên quan đến độ tin cậy, tuổi thọ của máy thì vấn đề Ma sát, mòn, bôi trơn (Tribology) đóng vai trò quan trọng nhất. Nó quyết định đến trên 95% độ tin cậy và tuổi thọ của máy và thiết bị.

Ma sát, mòn và bôi trơn là ba vấn đề liên quan hữu cơ với nhau, không thể giải quyết riêng biệt từng vấn đề, không thể chống mòn mà không quan tâm đến ma sát và bôi trơn, ngược lại không thể chỉ nghĩ đến kỹ thuật bôi trơn và vật liệu bôi trơn nếu chưa rõ bản chất ma sát và mòn của đối tượng.

Nội dung được trình bày trong cuốn sách này là những vấn đề cơ bản về ma sát, mòn, bôi trơn, có thể sẽ đáp ứng một phần quan trọng đối với các sinh viên, học viên cao học, nghiên cứu sinh, các nhà nghiên cứu đang hoạt động trong lĩnh vực nâng cao độ tin cậy, tuổi thọ của máy móc, thiết bị.

Do tính chất rộng lớn của vấn đề và là một khoa học liên ngành nên trong phạm vi một cuốn sách không thể trình bày đầy đủ cơ sở lý thuyết, tính toán và kết quả thực nghiệm. Các nội dung tỉ mỉ hơn sẽ được trình bày trong các chuyên ngành riêng: Ma sát - Mòn - Bôi trơn.

Tác giả xin chân thành cảm ơn Giáo sư, Viện sĩ Nguyễn Anh Tuấn và các giảng viên bộ môn Máy và Ma sát học Khoa cơ khí Trường Đại học Bách Khoa đã giúp đỡ, đóng góp nhiều ý kiến quý báu cho quá trình biên soạn cuốn sách.

Tác giả

# *PHẦN I*

## **NGÀNH HỌC TRIBOLOGY**

### **I.1. ĐỊNH NGHĨA**

Tribology là một ngành khoa học quan trọng, nghiên cứu các quá trình: ma sát, mài mòn, ăn mòn, các kỹ thuật bôi trơn, vật liệu bôi trơn, kết cấu bôi trơn cho máy và thiết bị, khảo sát các cấu trúc, tính chất của các hệ ma sát tự nhiên và nhân tạo.

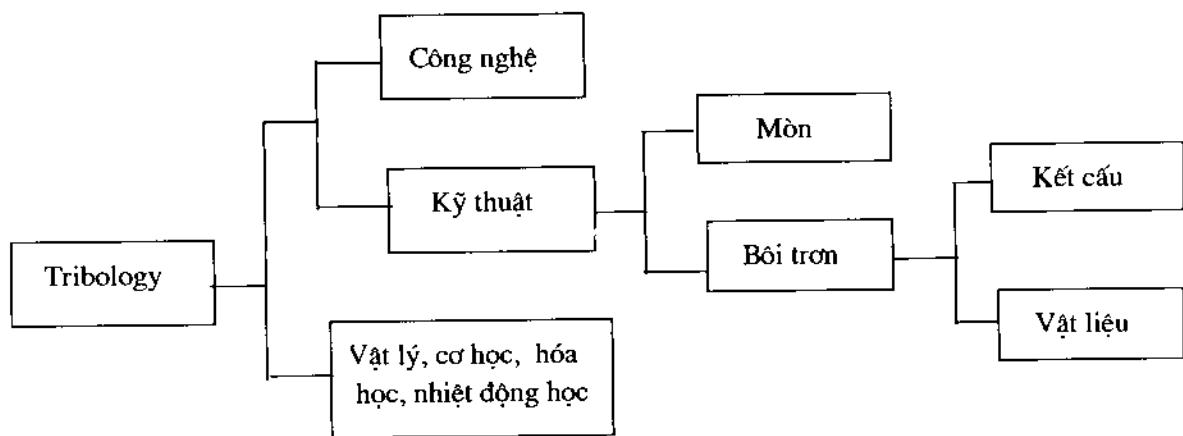
### **I.2. MỤC ĐÍCH**

Tribology là khoa học nghiên cứu các quy luật ma sát, khảo sát, đánh giá, mô tả các quy luật đó; từ đó đưa ra các quy luật ảnh hưởng đến độ tin cậy, tuổi thọ của máy, thiết bị; nhằm không ngừng nâng cao hiệu quả sử dụng và tối ưu hóa về tính kinh tế của thiết bị.

Tribology vừa là một ngành khoa học tự nhiên và là ngành kỹ thuật, và cũng là một ngành công nghệ.

### **I.3. PHÂN LOẠI TRIBOLOGY**

Ngành học Tribology được chia ra các phần như bảng sau:



### **I.4. KỸ THUẬT TRIBOLOGY**

Kỹ thuật Tribology là một phần quan trọng của Tribology, nghiên cứu các phương pháp chống mòn, chống ăn mòn, làm giảm ma sát, tăng hiệu quả sử dụng thiết bị nhằm

nâng cao tuổi thọ và độ tin cậy trên cơ sở mòn. Chúng được cụ thể hóa bằng các chỉ tiêu chính sau:

- Giảm ma sát, giảm mòn, giữ vững độ chính xác cần thiết đặt ra;
- Giảm mất mát năng lượng vô ích;
- Nâng cao tuổi thọ, độ tin cậy của thiết bị;
- Nâng cao hiệu suất làm việc;
- Tối ưu về kinh tế.

Và được thông qua các hình thức nghiên cứu, áp dụng cơ bản sau:

- Ứng dụng hiệu quả các kết quả mới nhất của khoa học kĩ thuật hiện đại vào ngành học Tribology;
- Phát triển và hoàn thiện các biện pháp công nghệ bề mặt, tạo ra các kết cấu ma sát có chất lượng cao;
- Phát triển và ứng dụng các công nghệ chống mòn, chống ăn mòn;
- Nghiên cứu phát triển các kết cấu bôi trơn, vật liệu bôi trơn, nâng cao từng bước tuổi thọ;
- Ứng dụng phương pháp đo đặc, đánh giá tiên tiến và công cụ toán học hiện đại.

## **PHẦN II**

# **MA SÁT**

### **Chương 1**

## **CÁC ĐẶC TRƯNG CƠ BẢN CỦA MA SÁT**

### **1.1. ĐỊNH NGHĨA, CÁC THUẬT NGỮ CHÍNH**

*a) Ma sát:* là sự mất mát năng lượng cơ học trong các quá trình: khởi động, chuyển động, dừng.

*b) Ma sát khởi động:* là sự mất mát năng lượng cơ học trong quá trình khởi động.

*c) Ma sát động:* là sự mất mát năng lượng cơ học trong quá trình chuyển động tương đối tại vùng tiếp xúc.

*d) Ma sát dừng:* là sự mất mát năng lượng cơ học trong quá trình dừng tại vùng tiếp xúc có chuyển động tương đối.

*e) Lực ma sát:* là lực cản chuyển động tương đối của vật thể này trên vật thể khác, dưới tác dụng của ngoại lực pháp tuyến với đường phân giới giữa hai vật thể.

*f) Ma sát ngoại:* là ma sát xảy ra giữa bề mặt tiếp xúc của hai vật thể độc lập với nhau, khi có chuyển động tương đối.

*g) Ma sát nội:* là ma sát xảy ra của quá trình chuyển động tương đối, trong cùng một vật thể.

*h) Ma sát vĩ mô:* là ma sát được kể đến do ảnh hưởng của các yếu tố trên bề mặt tiếp xúc, cơ, lí, hóa, chất lượng bề mặt, bản chất của vật liệu, các chế độ làm việc...

*i) Ma sát vi mô:* là ma sát được kể đến bản chất vật liệu, tính chuyển động của các phân tử, tính liên kết hóa học và nhiệt động học dẫn đến sự mất mát năng lượng cơ học.

### **1.2. CÁC ĐẶC TRƯNG CƠ BẢN CỦA MA SÁT**

#### **1.2.1. Lực ma sát**

Cho đến thế kỉ XX, lực ma sát được tính gần đúng theo công thức:

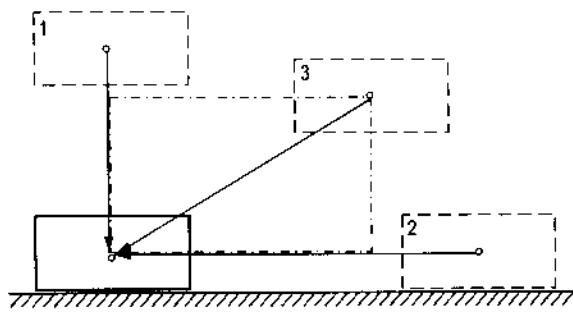
$$F_{ms} = \mu F_N \quad (1.1)$$

Trong đó:  $F_N$  - lực pháp tuyến với bề mặt tiếp xúc có chuyển động tương đối.

Ở trạng thái tĩnh (trước khi có chuyển động tương đối), lực ma sát bằng lực tác dụng theo phương tiếp tuyến:

$$F_{ms} = F_t \quad (1.2)$$

Hình (1.1) biểu thị chuyển động tương đối của vật rắn



**Hình 1.1: Mô hình chuyển động**

**tịnh tiến của vật rắn**

1. Hướng pháp tuyến; 2. Hướng tiếp tuyến;
3. Hướng tổng hợp

### 1.2.2. Mômen ma sát

Mômen ma sát được viết như sau:

$$M_{ms} = F_{ms} \cdot R \quad (1.3)$$

Trong đó:  $R$  - cánh tay đòn tương ứng với lực ma sát  $F_{ms}$

### 1.2.3. Công ma sát (năng lượng ma sát) ( $W_{ms}$ )

Năng lượng ma sát được viết như sau:

- Đối với ma sát trượt:

$$W_{ms_t} = E_{ms_t} = \int_{S_{ms}} \bar{F}_{ms} \overline{dS}_{ms} \quad (1.4)$$

Trong đó:  $S_{ms}$  - quãng đường ma sát.

- Đối với ma sát lăn:

$$W_{ms_L} = E_{ms_L} = \int_{\phi_L} \bar{M}_{ms} \cdot \overline{d\phi}_L \quad (1.5)$$

Trong đó:  $\phi_L$  - góc lăn.

Tương tự đối với ma sát xoay có:

$$W_{ms_x} = E_{ms_x} = \int_{\phi_x} \bar{M}_{ms} \cdot \overline{d\phi}_x \quad (1.6)$$

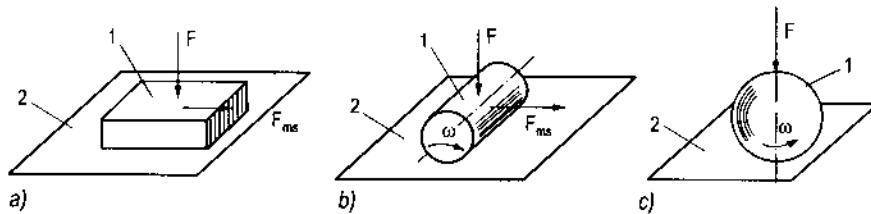
Trong đó:  $\phi_x$  - góc xoay.

### 1.3. PHÂN LOẠI MA SÁT

Ma sát được phân loại dưới các dạng khác nhau, chủ yếu được chia ra theo đối tượng tiếp xúc (ma sát nội, ngoại, vi mô, vĩ mô), theo quá trình (chuyển động, dừng, khởi động, va đập...), theo dạng chuyển động (trượt, lăn, xoay...) và theo trạng thái chất bôi trơn (rắn, lỏng, khí, Plasma...).

Dưới đây ta xét một số loại ma sát cơ bản sau:

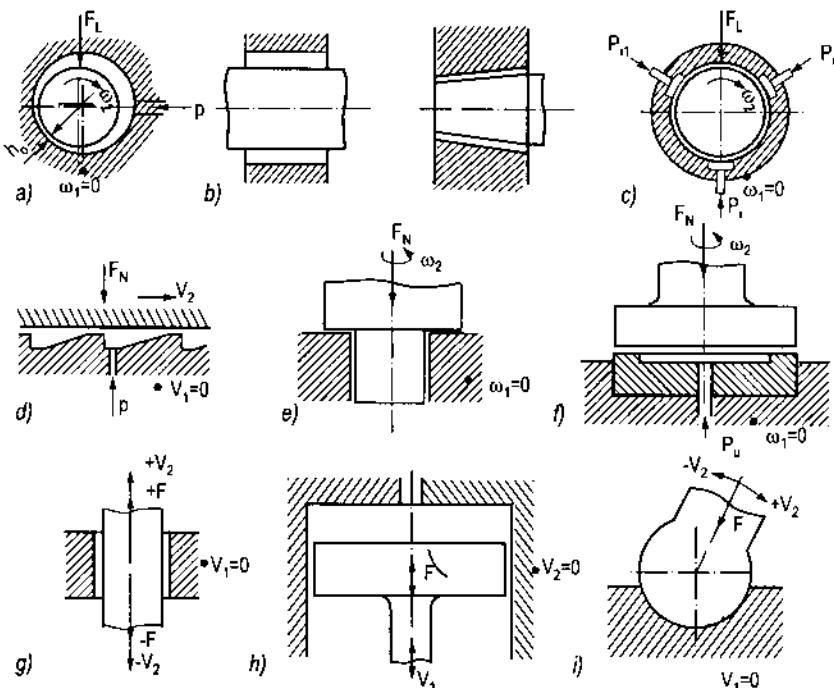
1. *Ma sát trượt*: là ma sát xảy ra giữa hai bề mặt tiếp xúc, khi chuyển động trượt tương đối (hình 1.2a) mà vận tốc tại điểm tiếp xúc khác nhau về giá trị và cùng phương. Hình 1.3 trình bày một số dạng chuyển động trượt tương đối, có trong thực tế.



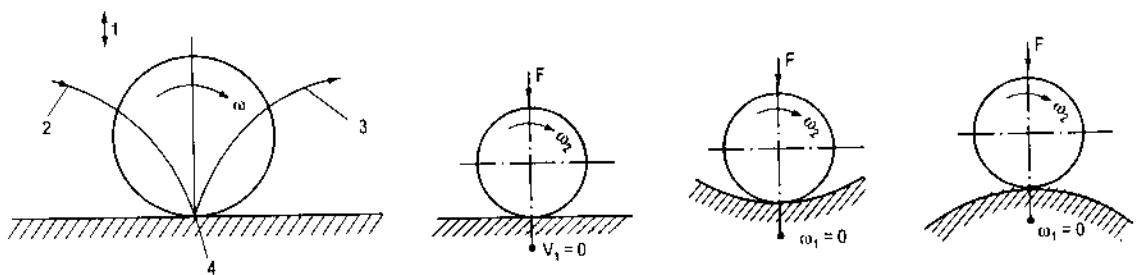
Hình 1.2

2. *Ma sát lăn*: là ma sát xảy ra giữa hai bề mặt có chuyển động lăn tương đối, mà vận tốc tại điểm tiếp xúc cùng giá trị, cùng phương (hình 1.2b); Hình 1.4 biểu thị một số dạng ma sát lăn trong thực tế.

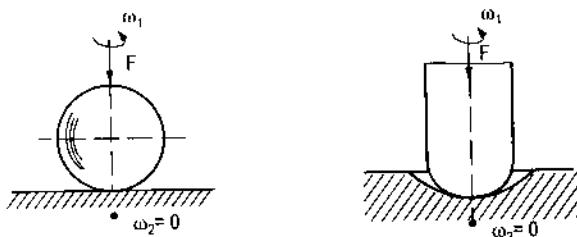
3. *Ma sát xoay*: là ma sát xảy ra giữa hai bề mặt tiếp xúc do chuyển động xoay tương đối giữa hai vật thể (hình 1.2c). Hình 1.5 biểu thị dạng ma sát xoay có trong thực tế.



Hình 1.3: Các dạng chuyển động trượt

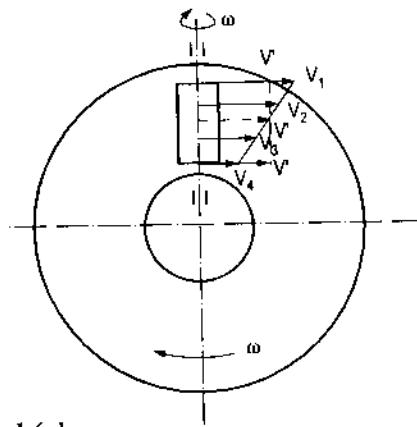


**Hình 1.4:** Các dạng chuyển động lăn



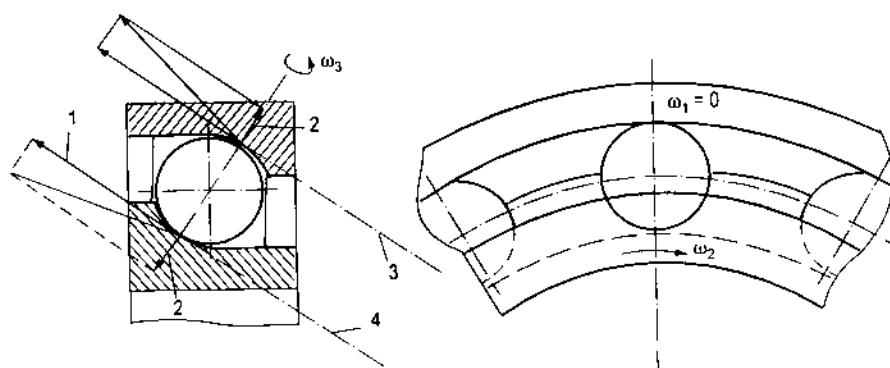
**Hình 1.5:** Các dạng chuyển động xoay

d) **Ma sát hỗn hợp:** là ma sát bao gồm tổ hợp từ các loại ma sát riêng biệt trên.



**Hình 1.6:** Mô hình dạng  
ma sát hỗn hợp

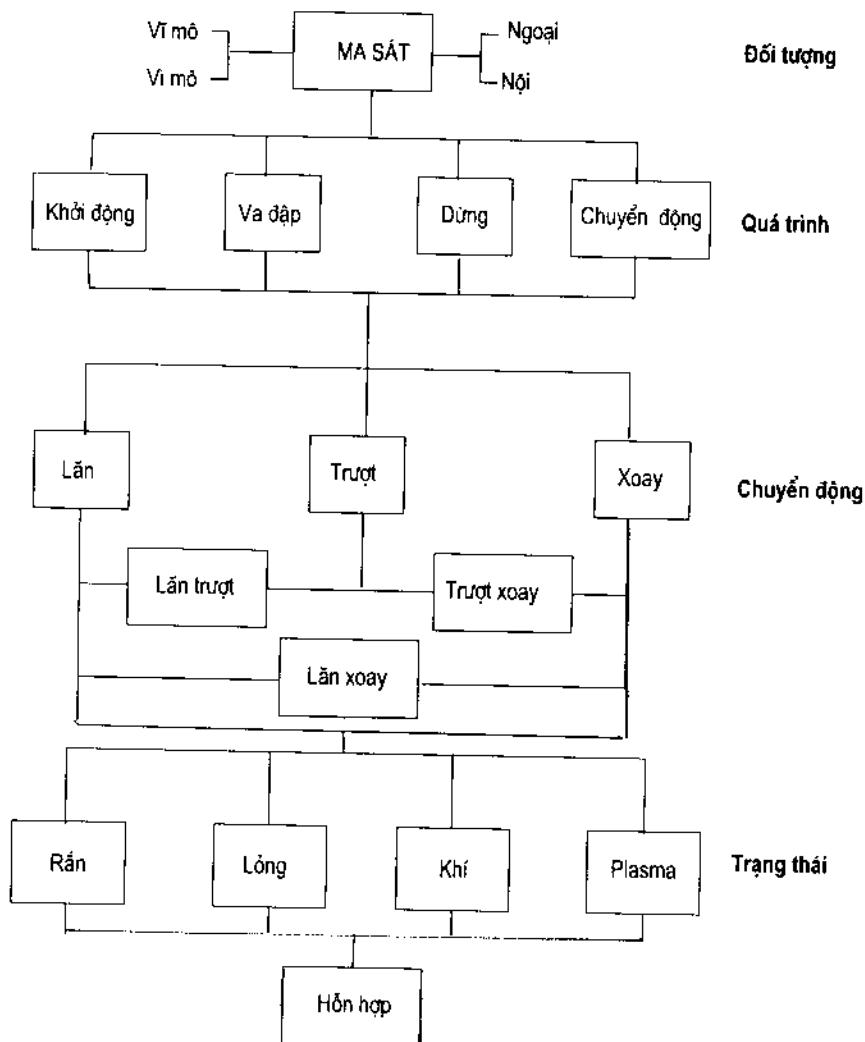
Chuyển động lăn xoay trượt của ổ bi hướng kính:



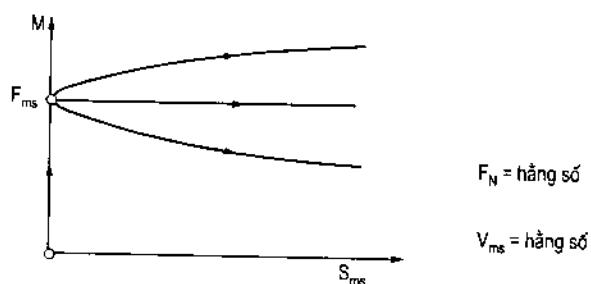
**Hình 1.7:** Dạng ma sát hỗn hợp điển hình trong thực tế

1. Trục lăn; 2. Trục xoay; 3. Trục lăn mõ men vòng ngoài; 4. Trục lăn vòng trong

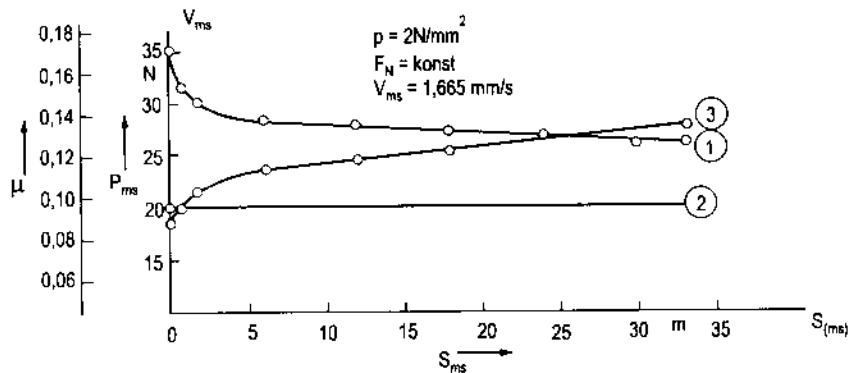
## 1.4. TỔNG QUAN VỀ PHÂN LOẠI MA SÁT



## 1.5. ĐỒ THỊ NGUYÊN TẮC CỦA HỆ SỐ MA SÁT

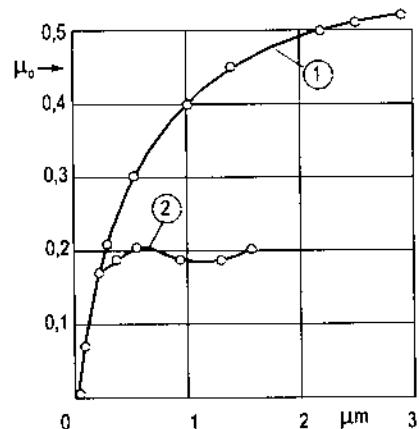


**Hình 1.8:** Đồ thị nguyên tắc của ma sát trượt phụ thuộc vào quãng đường ma sát  $S_{ms}$  của vật rắn khi khởi động.



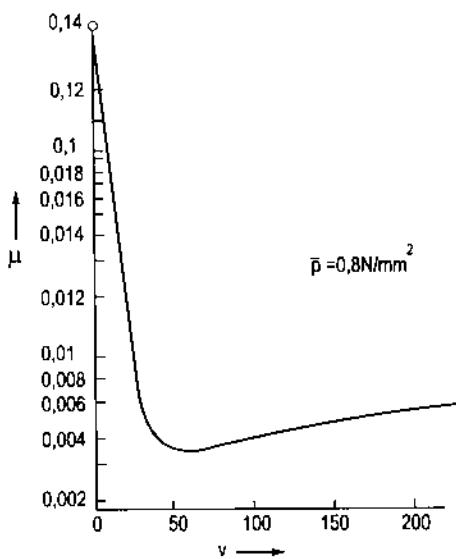
**Hình 1.9:**Đồ thị nguyên tắc của ma sát trượt của vật rắn - mẫu trên đường yên mẫu dưới chuyển động

1. Thép mài - chất dẻo; 2. Thép đánh bóng - chất dẻo; 3. Chất dẻo - gang mài

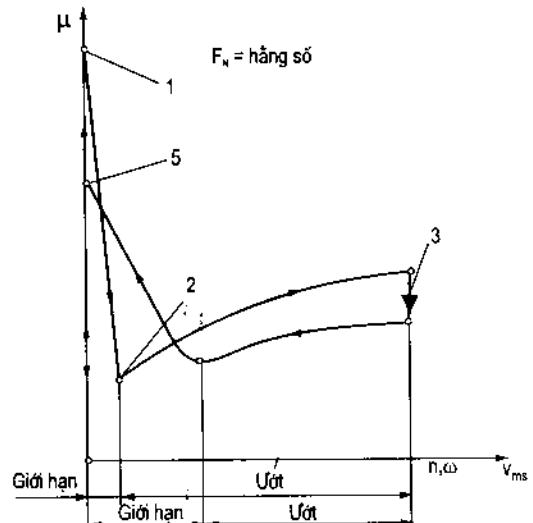


**Hình 1.10:** Đồ thị hệ số ma sát trượt của thép - thép, khi khởi động

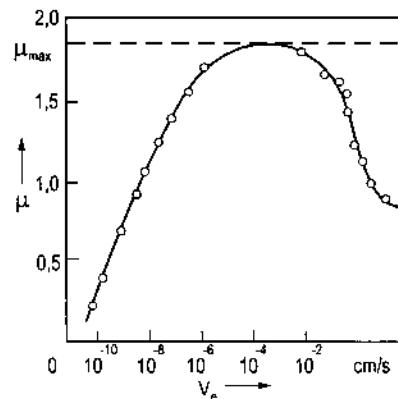
1. Bề mặt được làm sạch;  
2. Bề mặt có chất bôi trơn



**Hình 1.11:** Hệ số ma sát khởi động  
ở trượt có bôi trơn

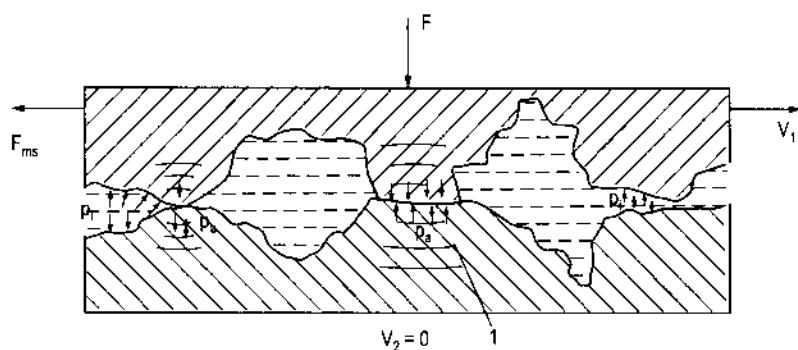


**Hình 1.12:** Nguyên tắc thuận nghịch Stribeck



**Hình 1.13:** Hệ số ma sát của thép và Indium

Hệ số ma sát làm việc khi ở vận tốc giới hạn  $v_{gh}$



**Hình 1.14:** Mô hình ma sát hỗn hợp giới hạn: khô và ướt =  $\mu_{gh}$ .

## 1.6. TÍNH HỆ SỐ MA SÁT

### 1.6.1. Hệ số phủ kín

Mức độ phủ kín của cặp ma sát được viết theo công thức sau:

$$k_{pk} = \frac{A_{ms2}}{A_{ms1}} \quad (1.7)$$

Trong đó:  $A_{ms2}$  và  $A_{ms1}$  - diện tích ma sát của vật thể 2 trên vật thể 1.

Nếu chiều rộng ma sát của hai chi tiết như nhau, hệ số phủ kín là:

$$k_{pk} = \frac{a_{ms2}}{a_{ms1}} \quad (1.8)$$

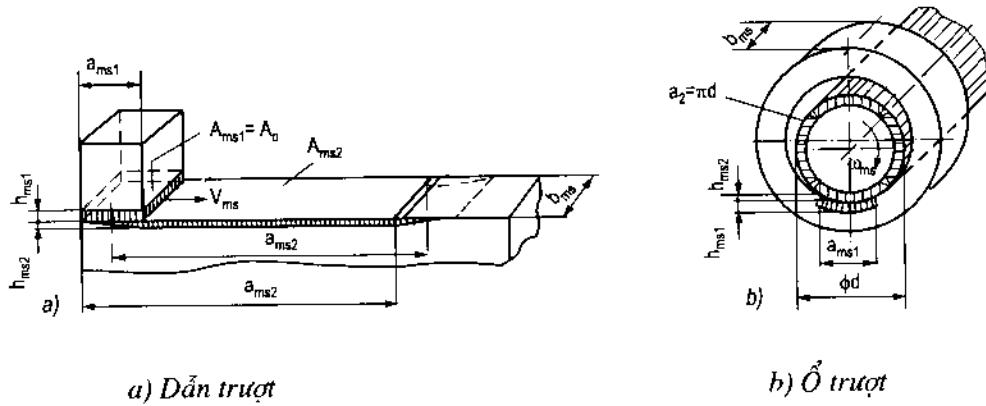
Trong đó:  $a_{ms2}$  và  $a_{ms1}$  - chiều dài ma sát của chi tiết 2 và 1.

Đối với cặp ma sát trục bạc, ta có:

$$k_{pk} = \frac{a_{ms2}}{a_{ms1}} \quad (1.9)$$

Trong đó:  $a_{ms2}$  - chu vi của trục;

$a_{ms1}$  - đoạn tiếp xúc của bạc.



Hình 1.15: Độ lớn hình học của cặp ma sát điển hình

### 1.6.2. Công thức tính hệ số ma sát

- Công ma sát hay năng lượng ma sát:

$$W_{ms} = E_{ms} = F_{ms} \cdot S_{ms} \quad (1.10)$$

- Lực ma sát:

$$F_{ms} = \sum_j F_{msj}$$

Trong đó:  $F_{msj}$  - lực ma sát thành phần.

- Công suất ma sát:

$$\begin{aligned} F_{ms} \cdot v_{ms} &= M_{ms} \cdot \omega_{ms} \\ &= \frac{W_{ms}}{t_{ms}} \end{aligned} \quad (1.11)$$

- Hệ số ma sát:

$$\mu = \frac{F_{ms}}{F_N} = \frac{W_{ms}}{F_N \cdot v_{ms}} \quad (1.12)$$

## Chương 2

# THÔNG SỐ HÌNH HỌC BỀ MẶT TIẾP XÚC

Lí thuyết về thông số hình học của bề mặt tiếp xúc dựa trên lí thuyết đàn hồi, dẻo và kết quả nghiên cứu thực nghiệm về chất lượng bề mặt của các chi tiết khi gia công bằng các phương pháp công nghệ khác nhau.

Lí thuyết tiếp xúc nhận được từ nghiên cứu cấu trúc hình học thực của vật rắn và tính chất cơ lý lý tưởng, nhưng thực tế, chỉ tồn tại tính không đồng nhất và không lý tưởng của bề mặt chi tiết máy. Để minh họa cho lí do này, các đặc điểm tiếp xúc được xác định nhờ sử dụng các lí thuyết thống kê, từ mô tả biên dạng chiều cao trung bình của các đỉnh nhấp nhô và các quy luật phân phối các đỉnh nhấp nhô trên bề mặt. Các trường hợp tiếp xúc được biểu thị bằng công thức tính có độ chính xác đủ cần thiết theo yêu cầu thực tế của kĩ thuật đặt ra.

### 2.1. TIẾP XÚC CỦA BỀ MẶT

Sự phụ thuộc của ứng suất trong vùng diện tích tiếp xúc, vào hai dạng tiếp xúc chính của vật rắn đó là tiếp xúc đàn hồi hoặc dẻo.

Lí thuyết biến dạng tại vùng tiếp xúc đàn hồi được xác định dựa vào các giả thiết sau:

- 1) Chỗ tiếp xúc ban đầu chỉ là một điểm sau đó phát triển thành một đường.
- 2) Vùng tiếp xúc phẳng và đồng nhất.
- 3) Trong vùng diện tích tiếp xúc chỉ xảy ra biến dạng đàn hồi.
- 4) Chỉ có lực pháp tuyến trên bề mặt tiếp xúc chung.
- 5) Diện tích tiếp xúc nhỏ so với diện tích bề mặt của vật tiếp xúc.
- 6) Bỏ qua lực ma sát xảy ra trong vùng diện tích tiếp xúc ở thời điểm tải trọng tác dụng.

Diện tích tiếp xúc thông thường là một hình elíp, nhưng trong một số trường hợp đặc biệt nó có thể là một hình tròn hoặc một dải được giới hạn bởi các đường song song. Trường hợp elip phù hợp với tiếp xúc của hai vật thể hình cầu hoặc hai hình trụ giống nhau, với các trục của chúng vuông góc với nhau.

Với vùng tiếp xúc được tạo thành bởi hai vật thể hình trụ có các trục song song nhau là một dải dài.

Bảng 2.1. Mô tả phân bố áp suất trên diện tích tiếp xúc có hình dạng khác nhau.

**Bảng 2.1. Phân bố áp suất khi tiếp xúc đòn hồi của hai vật thể có biên dạng cong**

Hình dạng ban đầu của vật thể tiếp xúc	Luật phân bố áp suất	Hình minh họa
Tiếp xúc điểm: Bề mặt của các vật thể cong khác nhau	$p(x, y) = p_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}$ Diện tích tiếp xúc là một hình elip với các bán trục là a và b.	
Tiếp xúc điểm: Hình cầu hoặc hình trụ có cùng bán kính với các trục vuông góc nhau	$p(x, y) = p_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{\rho_{xy}}{\rho}\right)^2}$ Diện tích tiếp xúc là một hình tròn.	
Tiếp xúc đường thẳng: Các hình trụ có các trục song song	Diện tích tiếp xúc là một dải dài $p(x, y) = p_{\max} \sqrt{\left(\frac{y}{c}\right)^2}$	

Ở đây:  $p(x, y)$  = áp suất tại một điểm có tọa độ x và y;  $p_{\max}$  = áp suất lớn nhất;  $\rho$  = bán kính của hình tròn diện tích tiếp xúc.

Quan hệ giữa giá trị ứng suất lớn nhất và trung bình với diện tích tiếp xúc là hình tròn hoặc elip là:

$$p_{tb} = \frac{2}{3} p_{\max}$$

**Bảng 2.2. Công thức tính diện tích tiếp xúc, áp suất lớn nhất, đối với tiếp xúc đòn hồi của các vật thể có bề mặt cong**

Loại tiếp xúc	Công thức tính
1	2
1. Hai hình cầu: Diện tích tiếp xúc là hình tròn	$p = 0,909 \sqrt[3]{E_{td} r N}$ $p_{\max} = 0,578 \sqrt[3]{\frac{N}{E_{td}^2 r^2}}$ $h = 0,825 \sqrt[3]{\frac{E_{td} N^2}{r}}$

1	2																												
2. Hình cầu và mặt phẳng: Diện tích tiếp xúc là hình tròn.	$\rho = 0,909 \sqrt[3]{E_{td} r_C N}$ $P_{max} = 0,578 \sqrt[3]{\frac{N}{E_{td}^2 r^2}}$ $h = 0,825 \sqrt[3]{\frac{E_{td} N^2}{r_C}}$ <p>r<sub>c</sub> - bán kính của hình cầu</p>																												
3. Hình cầu lồi với hình cầu lõm ( $r_1 \gg r_2$ ): Diện tích tiếp xúc là một hình tròn.	$\rho = 0,909 \sqrt[3]{E_{td} r N}$ $P_{max} = 0,578 \sqrt[3]{\frac{N}{E_{td}^2 r^2}}$ $h = 0,825 \sqrt[3]{\frac{E_{td} N^2}{r}}$ <p>với <math>r = \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2}</math></p>																												
4. Hai hình trụ các trục vuông góc với nhau: Diện tích tiếp xúc là một hình elip với trục a <sub>e</sub> và b <sub>e</sub> .	$a_e = \beta_1 \sqrt{r E_{td} N}; b_e = \beta_2 a_e$ $\text{diện tích tiếp xúc } A = \pi a_e b_e = \pi \beta_2 a_e^2$ $P_{max} = \frac{1,5N}{A}; h = \beta_3 \sqrt[3]{\frac{N}{E_{td}^2 r}}$ <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>r<sub>1</sub>/r<sub>2</sub></td><td>1</td><td>1,5</td><td>2</td><td>3</td><td>6</td><td>10</td></tr> <tr> <td>β<sub>1</sub></td><td>1,144</td><td>1,317</td><td>1,459</td><td>1,701</td><td>2,226</td><td>2,740</td></tr> <tr> <td>β<sub>2</sub></td><td>1,000</td><td>0,765</td><td>0,632</td><td>0,482</td><td>0,308</td><td>0,221</td></tr> <tr> <td>β<sub>3</sub></td><td>1,651</td><td>1,635</td><td>1,607</td><td>1,548</td><td>1,405</td><td>1,280</td></tr> </table>	r <sub>1</sub> /r <sub>2</sub>	1	1,5	2	3	6	10	β <sub>1</sub>	1,144	1,317	1,459	1,701	2,226	2,740	β <sub>2</sub>	1,000	0,765	0,632	0,482	0,308	0,221	β <sub>3</sub>	1,651	1,635	1,607	1,548	1,405	1,280
r <sub>1</sub> /r <sub>2</sub>	1	1,5	2	3	6	10																							
β <sub>1</sub>	1,144	1,317	1,459	1,701	2,226	2,740																							
β <sub>2</sub>	1,000	0,765	0,632	0,482	0,308	0,221																							
β <sub>3</sub>	1,651	1,635	1,607	1,548	1,405	1,280																							
5. Hai hình trụ có cùng bán kính và có các trục vuông góc với nhau: Diện tích tiếp xúc là một hình tròn.	$\rho = 0,909 \sqrt[3]{E_{td} r N}$ $P_{max} = 0,578 \sqrt[3]{\frac{N}{E_{td} r}}$ $h = 0,825 \sqrt[3]{\frac{E_{td}^2 N^2}{r}}$																												
6. Hai hình trụ có trục song song (cả hai bề mặt đều lồi): Diện tích tiếp xúc là một hình chữ nhật với chiều rộng là 2ρ.	$\rho = 1,128 \sqrt{E_{td} r N_l}; P_{max} = 0,564 \sqrt{\frac{N_l}{E_{td} r}}$ $h = \frac{2N_t}{\pi} \left[ E_1 \left( \ln \frac{2r_1}{\rho} + 0,407 \right) + E_2 \left( \ln \frac{2r_2}{\rho} + 0,407 \right) \right]$																												

1	2																																								
7. Hình trụ với mặt phẳng: Diện tích tiếp xúc là một hình chữ nhật với chiều rộng là $2\rho$ .	$\rho = 1,128 \sqrt{E_{td} r N_1} ; \quad p_{max} = 0,564 \sqrt{\frac{N_1}{E_{td} r}}$ $h = \frac{2N_t}{\pi} \left[ E_1 \left( \ln \frac{2r_1}{\rho} + 0,407 \right) + E_2 \left( \ln \frac{2r_2}{\rho} + 0,407 \right) \right]$ $r = r_T \quad (r_T = \text{bán kính của hình trụ}).$																																								
8. Bề mặt trụ với mặt lõm song song ( $r_1 \gg r_2$ ): Diện tích tiếp xúc là một hình chữ nhật với chiều rộng là $2\rho$ .	$\rho = 1,128 \sqrt{E_{td} \sum r N_1} ; \quad p_{max} = 0,564 \sqrt{\frac{N_1}{E_{td} r}}$ $h = \frac{2N_t}{\pi} \left[ E_1 \left( \ln \frac{2r_1}{\rho} + 0,407 \right) + E_2 \left( \ln \frac{2r_2}{\rho} + 0,407 \right) \right]$ với $r = \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2}$																																								
9. Hai vật thể có biến dạng cong tiếp xúc tại một điểm trước khi biến dạng: Diện tích tiếp xúc thông thường là một elip với các bán trục là $a_e$ và $b_e$ .	$a_e = n_a \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{E_{td} N}{K_\Sigma}} ; \quad b_e = n_b \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{E_{td} N}{K_\Sigma}}$ $p_{max} = \frac{1}{\pi n_a n_b} \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \left( \frac{K_\Sigma}{E_{td}} \right)^2 N} ; \quad b = \frac{n_\delta}{2} \sqrt[3]{\frac{9}{4} E_{td}^2 K_\Sigma N^2}$ $K_\Sigma = \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}}$																																								
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><math>b_e/a_e</math></th> <th style="text-align: center;"><math>l^2</math></th> <th style="text-align: center;"><math>n_a</math></th> <th style="text-align: center;"><math>n_b</math></th> <th style="text-align: center;"><math>n_\delta</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">0,00</td><td style="text-align: center;">1,00</td><td style="text-align: center;">1,00</td><td style="text-align: center;">1,00</td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,8</td><td style="text-align: center;">0,36</td><td style="text-align: center;">1,12</td><td style="text-align: center;">0,91</td><td style="text-align: center;">0,99</td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,6</td><td style="text-align: center;">0,64</td><td style="text-align: center;">1,27</td><td style="text-align: center;">0,81</td><td style="text-align: center;">0,97</td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,4</td><td style="text-align: center;">0,84</td><td style="text-align: center;">1,66</td><td style="text-align: center;">0,66</td><td style="text-align: center;">0,90</td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,2</td><td style="text-align: center;">0,96</td><td style="text-align: center;">2,27</td><td style="text-align: center;">0,50</td><td style="text-align: center;">0,73</td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,1</td><td style="text-align: center;">0,99</td><td style="text-align: center;">4,01</td><td style="text-align: center;">0,40</td><td style="text-align: center;">0,59</td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,05</td><td style="text-align: center;">0,997</td><td style="text-align: center;">5,98</td><td style="text-align: center;">0,33</td><td style="text-align: center;">0,46</td></tr> </tbody> </table>	$b_e/a_e$	$l^2$	$n_a$	$n_b$	$n_\delta$	1	0,00	1,00	1,00	1,00	0,8	0,36	1,12	0,91	0,99	0,6	0,64	1,27	0,81	0,97	0,4	0,84	1,66	0,66	0,90	0,2	0,96	2,27	0,50	0,73	0,1	0,99	4,01	0,40	0,59	0,05	0,997	5,98	0,33	0,46
$b_e/a_e$	$l^2$	$n_a$	$n_b$	$n_\delta$																																					
1	0,00	1,00	1,00	1,00																																					
0,8	0,36	1,12	0,91	0,99																																					
0,6	0,64	1,27	0,81	0,97																																					
0,4	0,84	1,66	0,66	0,90																																					
0,2	0,96	2,27	0,50	0,73																																					
0,1	0,99	4,01	0,40	0,59																																					
0,05	0,997	5,98	0,33	0,46																																					
	Trong đó: $N_1$ = lực pháp tuyến trên một đơn vị chiều dài; $p_{max}$ = áp suất lớn nhất trên diện tích tiếp xúc; $\rho$ = bán kính hoặc nửa chiều rộng của diện tích tiếp xúc: $r = \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2}, \frac{1}{r_{11}}, \frac{1}{r_{12}}, \frac{1}{r_{21}}, \frac{1}{r_{22}}$ là bán kính cong tương đương: $a_e$ và $b_e$ - các bán trục của diện tích tiếp xúc hình elip; $l$ - độ lệch tâm.																																								

Bảng 2.2 trình bày công thức tính diện tích tiếp xúc, giá trị áp suất lớn nhất cho các trường hợp khác nhau của tiếp xúc đòn hồi giữa các bề mặt.

Với tiếp xúc dẻo, áp suất tiếp xúc trung bình được tính bằng công thức:  $p_{tb} = c \cdot \sigma_y$ .

Trong đó:  $c$  - hệ số kể đến tính không đều của bề mặt và sức bền lớn nhất của vật liệu chi tiết,  $\sigma_y$  = giới hạn bền dẻo.

Trường hợp hình cầu với tiếp xúc dẻo,  $c \approx 3$ .

Độ cứng của vật liệu có thể được tính bằng công thức Mayer:

$$N = gd^n,$$

Trong đó:  $d$  - đường kính vết:

$g$  và  $n$  - các hệ số kể đến tính chất vật liệu.

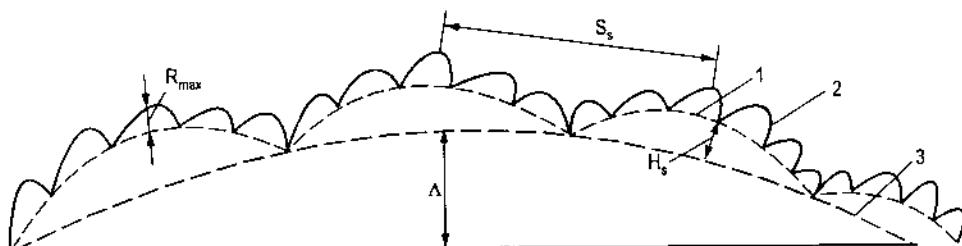
## 2.2. CHẤT LƯỢNG BỀ MẶT CHI TIẾT MÁY

### 2.2.1. Tính chất cơ lý của các lớp bề mặt

Tính chất cơ lý của các lớp bề mặt chi tiết máy phân lớn khác với tính chất của vật liệu tạo ra nó. Lớp nguyên tử ngoài cùng có tương tác lớn; kết quả là lớp bề mặt thường được phủ bằng các lớp không khí, nước và các chất hữu cơ khác. Lớp bám trên bề mặt là lớp vật liệu hoạt động làm giảm dần sự tương tác giữa các nguyên tử trên bề mặt.

### 2.2.2. Đặc điểm hình học của lớp bề mặt

Tính không đều của bề mặt chi tiết máy được phân thành *sai số hình dạng*, *sóng* và *nhấp nhô*. *Sai số hình dạng* là độ không đều của bề mặt, xuất phát từ hình dạng thực của nó (lồi, lõm, méo lệch,...). *Sóng* có dạng gồm các khe và đỉnh tuân hoàn có chu kỳ, cách nhau một khoảng cách (bước sóng  $S_s$ ) và chiều cao  $H_s$ , thường có  $S_s/H_s > 40$  (hình 2.1).



**Hình 2.1: Biểu đồ cấu trúc hình học bề mặt của vật rắn**

1. Độ sóng; 2. Nhấp nhô bề mặt; 3. Sai số hình dạng

*Nhấp nhô bề mặt* là có vô số đỉnh trong một khoảng khá ngắn (2 đến 800μm) và cao (từ 0,03 đến 400μm). *Sai lệch hình dạng*, *sóng* và *nhấp nhô* được chỉ ra dưới dạng biểu

đô hình 2.1. Tham số nhấp nhô bề mặt được cho trong bảng 2.3. Chúng được xác định bằng việc phân tích các đô thị biên dạng bề mặt trên một mô hình khuếch đại (hình 2.2).

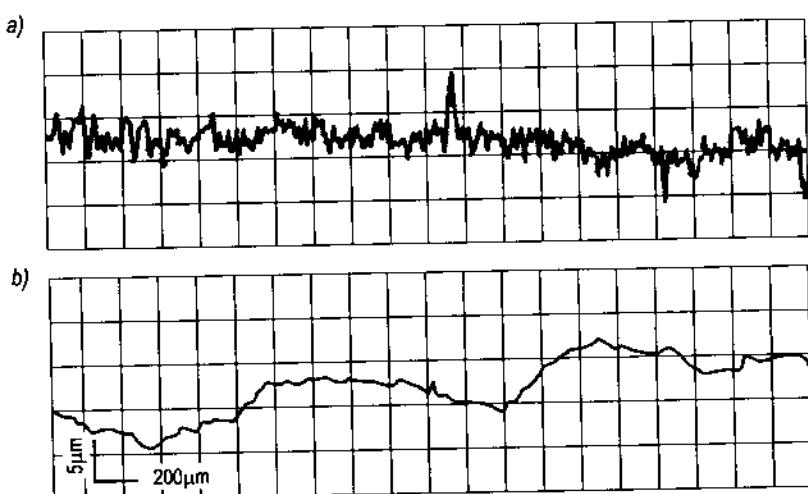
Chiều dài lấy làm mẫu I (hình 2.3) mô tả nhấp nhô bề mặt theo mặt cắt ngang và xác định các giá trị bằng các giá trị giới hạn.

Đường  $\mu_1\mu_2$  là đường trung bình.

$A_1$  và  $A_2$  - đường đi qua đỉnh cao nhất của biên dạng.

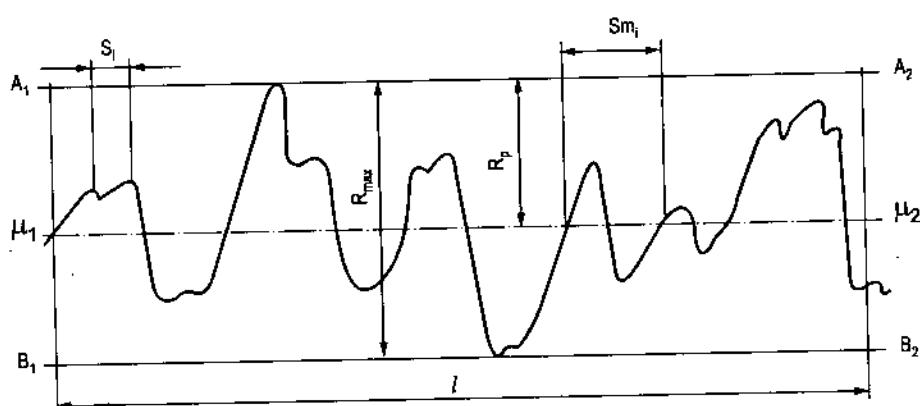
$B_1B_2$  - đường đi qua rãnh sâu nhất của biên dạng.

Chiều dài mẫu được chọn phù hợp với tiêu chuẩn GOST 2789-73, phụ thuộc vào dạng nhấp nhô của bề mặt.



**Hình 2.2: Biểu đồ biên dạng bề mặt kim loại**  
a) Vết theo chiều ngang; b) Vết theo chiều dọc

Chú ý rằng, với một chiều dài lấy làm mẫu lớn thì tham số nhấp nhô bề mặt có thể được xác định chính xác hơn.



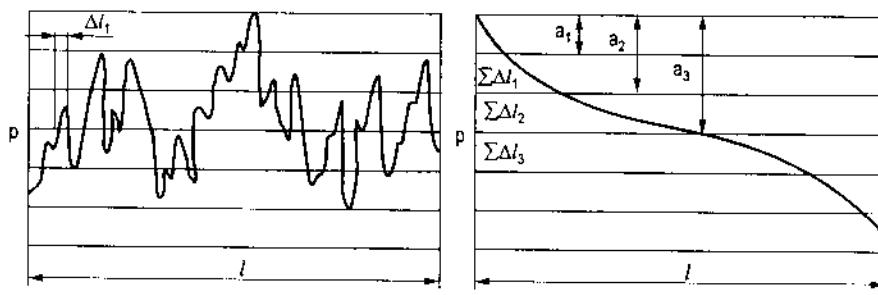
**Hình 2.3: Tham số nhấp nhô bề mặt**

Trong tính toán tiếp xúc, người ta sử dụng hệ số đặc trưng cùng với các đặc trưng tiêu chuẩn. Các đặc trưng được trình bày trong bảng 2.4.

**Bảng 2.3. Các dạng nhấp nhô bề mặt và giá trị chiều dài lấy làm mẫu  
(theo tiêu chuẩn GOST 2789-73).**

Các dạng nhấp nhô bề mặt	Đường phân chia	Tham số nhấp nhô bề mặt		Chiều dài mẫu $l$ , mm	Các dạng nhấp nhô bề mặt	Đường phân chia	Tham số nhấp nhô bề mặt		Chiều dài mẫu $l$ , mm
		R <sub>a</sub> , (μm)	R <sub>z</sub> , (μm)				R <sub>a</sub> , (μm)	R <sub>z</sub> , (μm)	
1	-	-	320 - 160			a	0,160-0,125		
2	-	-	160 - 180	8,0	10	b	0,125-0,100	-	
3	-	-	80 - 40			c	0,100-0,080		
4	-	-	40 - 20			a	0,080-0,063		
5	-	-	20 - 10	2,5	11	b	0,063-0,050	-	
	a	2,5-2,0				c	0,050-0,040		
6	b	2,0-1,6	-	0,8	12	a	0,040-0,032		
	c	1,6-1,25				b	0,032-0,025	-	
	a	1,25-1,0				c	0,025-0,020		
7	b	1,0-0,8	-		13	a	0,100-0,080		
	c	0,8-0,63				b	0,080-0,063	-	
	a	0,63-0,50				c	0,063-0,050		
8	b	0,50-0,40	-			-	-		
	c	0,4-0,32				a		0,005-0,04	0,08
	a	0,32-0,25				b		0,032-0,04	
9	b	0,25-0,20	-	0,25		c		0,032-0,05	
	c	0,20-0,16				-		-	

Theo đường đặc tính bề mặt của đặc trưng. Biên dạng phân bố trên chiều cao lớp nhấp nhô bề mặt vật liệu (hình 2.4). Để vẽ biểu đồ đường cong biên dạng, người ta chia nó thành nhiều mức theo phương ngang song song với đường trung bình, giới hạn chiều rộng các phân chia này là  $\Delta l_i$  của các đỉnh ở mức p được cộng với nhau.



**Hình 2.4: Đường đặc tính lớp bề mặt**

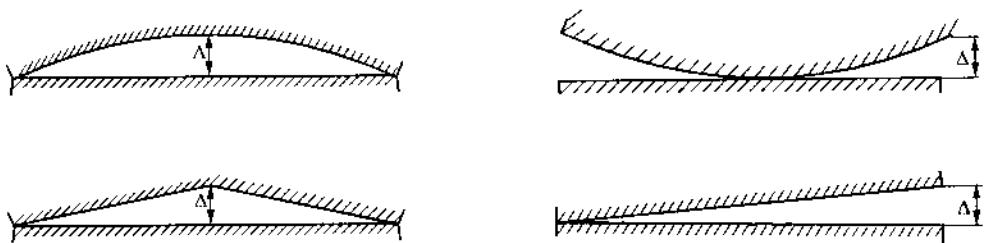
Phần đầu của đường đặc tính bề mặt có thể được mô tả dưới dạng:

$$t_p = \frac{\sum \Delta l_p}{l} = \frac{A_p}{A_c} = b \left( \frac{a}{R_{\max}} \right)^v = t_m \left( \frac{a}{R_p} \right)^v \quad (2.1)$$

Trong đó:  $\sum \Delta l_p$  - chiều dài tham khảo của biên dạng mức  $p$ ;  $A_p$  là diện tích của các phần đỉnh ở mức  $p$ ;  $t_m$  là chiều dài tham khảo tương đối của biên dạng ở vị trí đường trung bình.

**Bảng 2.4. Tham số nhấp nhô bề mặt sử dụng cho tính ma sát, mòn và bôi trơn.**

Tham biến	Định nghĩa
<b>Nhấp nhô bề mặt</b>	
Chiều cao của đỉnh cao nhất của biên dạng $R_{th}$	Khoảng cách giữa đường thẳng qua đỉnh cao nhất và đường thẳng trung bình
Bán kính cong trung bình $r$ của các đỉnh biên dạng	Giá trị độ cong trung bình của các đỉnh biên dạng, thu được từ 5 đỉnh cao nhất trong khoảng chiều dài làm mẫu.
Góc nghiêng trung bình của sự không đều biên dạng $q$	Góc nghiêng trung bình của các sườn không đều của biên dạng với đường trung bình trong đoạn chiều dài làm mẫu.
Tham số $v$ và $b$ của đường đặc tính bề mặt	Tham số của hàm mũ, phần một của đồ thị biên dạng
<b>Độ sóng</b>	
Chiều cao lớn nhất của các sóng $H_s$	Khoảng cách giữa đường thẳng qua đỉnh của các sóng và đường thẳng qua các rãnh của sóng trong chiều dài mẫu $l_b$ của đồ thị dạng sóng
Bước sóng trung bình $S_s$	Khoảng cách trung bình giữa các đỉnh sóng trong chiều dài mẫu $l_s$ ; $l_s \geq 5S_b$ .
Bán kính cong trung bình $r_s$ của các đỉnh sóng	Giá trị trung bình của các bán kính cong trong chiều dài lấy làm mẫu



**Hình 2.5: Các loại độ lệch hình dạng bề mặt**

Những độ lệch này làm thay đổi luật phân bố của chiều cao đỉnh sóng và tính liên tục trong việc hình thành sóng trong tiếp xúc khi tải trọng tăng.

Một số loại độ lệch hình dạng được minh họa trên hình 2.5.

### 2.2.3. Phương pháp xác định các đặc trưng hình học bề mặt

Trong thử tự tìm các tham số hình học bề mặt, một vài đoạn đặc trưng nhất của bề mặt (không nhỏ hơn 5) được chọn để tính và đồ thị biên dạng được ghi lại. Chiều dài đoạn biên dạng được chọn để nghiên cứu không nhỏ hơn chiều dài lấy làm mẫu.

Giá trị số học độ lệch trung bình của biên dạng  $R_a$ , được đọc trực tiếp từ thang đo của máy đo biên dạng hoặc dụng cụ riêng.

Việc xác định  $R_{max}$  và  $R_p$ , với ít nhất là 5 phần của đồ thị biên dạng được lựa chọn từ đường trung bình được vẽ cho mỗi phần đó. Vị trí của đường trung bình tìm được dễ nhất bằng phương pháp trung bình cộng như sau. Một đường thẳng nằm ngang song song với phần biên dạng được vẽ và đi qua rãnh sâu nhất của biên dạng, và các tung độ  $y_1, y_2, \dots, y_n$  của biên dạng được đo từ mỗi khoảng cách 2mm trên trục hoành. Các giá trị thu được chia thành 2 nhóm bằng nhau ( $y_1$  tới  $y_{n/2}$  và từ  $y_{n/2}$  tới  $y_n$ ) ở phần bên trái và bên phải của đồ thị biên dạng. Đường trung bình được vẽ qua 2 điểm với toạ độ  $(x', y')$  và  $(x'', y'')$ :

$$x' = \frac{x_1 + x_{n/2}}{2}, \quad y' = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} y_i}{n/2}$$

$$x'' = \frac{x_{n/2} + x_n}{2}, \quad y'' = \frac{\sum_{i=n/2}^n y_i}{n/2}$$

Các đường thẳng qua đỉnh và qua rãnh trên biên dạng được vẽ trong đoạn chiều dài làm mẫu. Khoảng cách từ đường thẳng qua các đỉnh và các rãnh sẽ bằng  $R_{max}$ , và từ đường thẳng qua các đỉnh tới đường thẳng trung bình là  $R_{p_i}$ . Trong các tính toán, giá trị trung bình cho 5 phần biên dạng bề mặt khác nhau được tính:

$$R_{\max} = \frac{1}{5} \sum_1^5 R_{\max_i}; \quad R_p = \frac{1}{5} \sum_1^5 R_{p_i}$$

Tính toán các tham số của đường đặc tính bề mặt, chiều dài tham khảo tương đối  $t_{m_i}$  của biên dạng dọc theo đường trung bình đầu tiên được xác định cho 5 phân đồ thị biên dạng với chiều dài bằng chiều dài mẫu, và do đó giá trị trung bình của 5 giá được tính:

$$t_m = \frac{1}{5} \sum_1^5 t_{m_i}$$

$$\text{Trong đó: } t_{m_i} = \frac{1}{l} \sum_1^n \Delta l_{mi};$$

$\Delta l_{mi}$  - chiều rộng của phần đỉnh trên đường trung bình;

$l$  - chiều dài mẫu.

Các tham số  $v$  và  $b$  của đường đặc tính bề mặt được tính toán bằng các công thức [5]:

$$v = 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1, \quad b = t_m \left( \frac{R_{\max}}{R_p} \right)^v \quad (2.2)$$

Công thức (2.1) với các tham số tìm được từ công thức (2.2) mô tả phân ban đầu của đường đặc tính trên đường thẳng trung bình.

### Thí dụ 2.1

Cho 5 mẫu đồ thị biên dạng được lấy ra từ các mẫu khác nhau của bề mặt cần kiểm tra với các giá trị thu được:

$$t_{m1} = 0,5; 0,6; 0,51; 0,55 \text{ và } 0,5 \mu\text{m};$$

$$R_{p1} = 3,2; 3,4; 3,5; 3,0 \text{ và } 3,3 \mu\text{m};$$

$$R_{a1} = 1,4; 1,31; 1,30; 1,35 \text{ và } 1,35 \mu\text{m};$$

$$R_{\max1} = 6,5; 6,9; 7,1; 6,2 \text{ và } 6,3 \mu\text{m}.$$

Do đó ta có:

$$t_m = \frac{0,5 + 0,6 + 0,51 + 0,55 + 0,5}{5} = 0,53 \mu\text{m}$$

$$R_p = \frac{3,2 + 3,4 + 3,5 + 3,0 + 3,3}{5} = 3,28 \mu\text{m}$$

$$R_a = \frac{1,4 + 1,31 + 1,30 + 1,35 + 1,35}{5} = 1,34 \mu\text{m}$$

$$R_{\max} = \frac{6,5 + 6,9 + 7,1 + 6,2 + 6,3}{5} = 6,58 \mu\text{m}$$

Do đó:

$$v = 2.053 \frac{3,28}{1,34} - 1 = 1,58$$

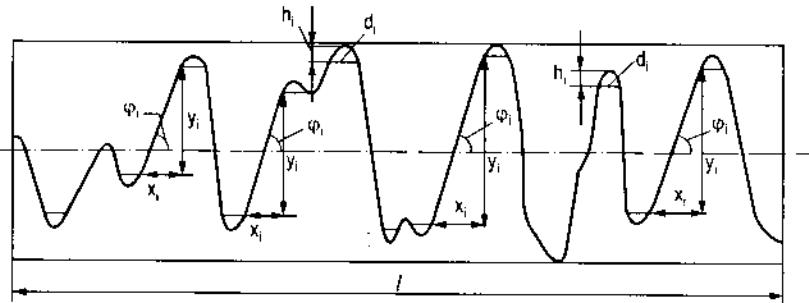
$$b = 0,53 \left( \frac{6,58}{3,28} \right)^{1,58} = 1,6$$

Với tiếp xúc của hai bê mặt nhám, các tham số  $v$  và  $b$  được biểu diễn như sau:

$$v = v_1 + v_2$$

$$b = \frac{K_2 b_1 b_2 (R_{\max_1} + R_{\max_2})^{v_1 + v_2}}{R_{\max_1}^{v_1} R_{\max_2}^{v_2}} \quad (2.3)$$

Trong đó:  $K_2 = \frac{\Gamma(v_1 + 1) \Gamma(v_2 + 1)}{\Gamma(v_1 + v_2 + 1)}$



**Hình 2.6: Biểu đồ tính bán kính cong và góc lệch của các tham số bê mặt**

Bán kính cong tại các đỉnh được xác định từ đồ thị biên dạng và được vẽ lại theo phương ngang và dọc. Tính với ít nhất 5 đỉnh và chiều rộng  $d_i$  cách đỉnh một khoảng cách  $h_i$ , bằng  $0,3R_a$  hoặc  $0,06R_{\max}$  (hình 2.6). Các bán kính cong của mỗi đỉnh sẽ được tính:

$$r_{pi} = \frac{\gamma_d}{\gamma_{ng}^2} \frac{d_i^2}{8h_i} \quad (2.4)$$

Trong đó:  $\gamma_d$  và  $\gamma_{ng}$  - hệ số tỉ lệ theo chiều dọc và chiều ngang.

Công thức (2.4) được sử dụng để tính các bán kính theo phương ngang  $r_n$  từ đồ thị biên dạng theo phương ngang và các bán kính theo phương dọc  $r_d$  từ đồ thị biên dạng theo phương dọc.

Bán kính trung bình sẽ được tính:

$$r_{tb} = \frac{1}{k} \sum_i^k r_{bi} \quad (2.5)$$

Bán kính  $r$  sử dụng trong tính toán được xác định là giá trị trung bình hình học của các bán kính theo phương ngang và dọc:

$$r = \sqrt{r_{ng} r_d} \quad (2.6)$$

Trong đó:  $r_{ng}$  và  $r_d$  lần lượt là các giá trị trung bình của các bán kính cong theo phương ngang và theo phương dọc của đồ thị biên dạng.

Trong đó bán kính của một đỉnh hoàn chỉnh (coi như một phần của hình cầu) đúng hơn là bán kính cong mà cần được xác định, chiều rộng của phần đỉnh được lấy dọc theo đường trung bình.

Các giá trị đặc trưng cho các bán kính cong của các đỉnh trên bề mặt trong quá trình gia công bằng các phương pháp khác nhau được đưa vào trong bảng 2.5.

**Bảng 2.5. Bán kính cong của đỉnh biên dạng bề mặt khi gia công bằng các phương pháp khác nhau**

Phương pháp gia công	Cấp độ nhám bề mặt	Bán kính ( $\mu m$ )	
		Bán kính ngang $r_{ng}$	Bán kính dọc $r_d$
Mài	6-7	4-10	100-300
Tiện	8 - 9	10 - 40	100 - 300
	5 - 6	20 - 40	400 - 500
	7 - 8	40 - 120	-
Phay	4 - 5	30 - 60	400 - 500
	6 - 7	60 - 80	-
Mài nhẵn (đánh bóng)	8 - 9	300 - 700	300 - 700
	10	500 - 1000	500 - 1000
Mài nghiên	10 - 12	20 - 70	-

Gần đây người ta đã đưa ra một đặc trưng tổng hợp là  $\Delta = R_{max}/rb^{1/v}$  để đánh giá độ nhám bề mặt, cho phép xác định tính chọn của các đỉnh và phân bố chiều cao của chúng. Các tham số nhấp nhô bề mặt cho các phương pháp gia công chính trên bề mặt được đưa ra trong bảng 2.6 đến bảng 2.9 (các bảng này được biên soạn bởi V.S. Kombalov, sử dụng các số liệu thu được của E. V. Ryzhov).

### Thí dụ 2.2

Tính toán bán kính cong của các đỉnh của một đồ thị biên dạng đã được ghi lại với hệ số phóng đại theo chiều ngang  $\gamma_h = 400$  và độ phóng đại theo phương đứng là  $\gamma_v = 1000$ . Chiều cao lớn nhất của biên dạng  $R_{max} = 42$  mm. Chiều rộng của biên dạng cho 7 đỉnh cao nhất được lấy với khoảng cách  $0,06R_{max} = 2,5$  mm từ các chòm của chúng:  $d_{tr} = 6; 8; 5,5; 12; 7,5$  và  $6,3$  mm.

Do đó:

$$\frac{1}{k} \sum d_{ngi}^2 = \frac{6^2 + 8^2 + 5,5^2 + 6^2 + 12^2 + 7,5^2 + 6,3^2}{7} = 5,81 \text{ mm}^2$$

$$r_{ng} = \frac{\gamma_d \sum_1^k d_{ngi}^2}{8\gamma_{ng}^2 h k} = \frac{1000.5,8}{8.400^2.2,5} = 18 \mu\text{m}$$

Do đó, với đồ thị biên dạng theo phương đứng của bề mặt, đã ghi được là  $\gamma_v = 4000$  và  $\gamma_h = 1000$ ,  $d_{lni} = 50, 58, 70, 93$  và  $51,5 \text{ mm}$  (với khoảng cách  $0,06R_{max} = 2,5 \text{ mm}$ ), ta có:

$$\frac{1}{k} \sum d_{di}^2 = \frac{50^2 + 58^2 + 70^2 + 93^2 + 51,5^2}{5} = 4,413 \text{ mm}^2$$

$$r_d = \frac{4000.4,413}{8.1000^2.2,5} = 0,883 \text{ mm} = 883 \mu\text{m}$$

do đó ta có bán kính thật là:  $r = \sqrt{18.883} = 126 \mu\text{m}$

**Bảng 2.6. Giá trị xấp xỉ của các tham số nhấp nhô bề mặt chi tiết bằng thép được gia công bằng các phương pháp khác nhau (I. V. Kragelsky).**

Phương pháp gia công	Cấp độ nhám bề mặt	R <sub>max</sub> , (μm)	r, (μm)	b	v	Δ
1	2	3	4	5	6	7
Mài mặt tròn	7	9,4	8	0,6	2,0	1,6×10 <sup>-1</sup>
	8	4,7	12	0,9	1,9	4,1×10 <sup>-2</sup>
	9	2,4	20	1,3	1,9	9,6×10 <sup>-2</sup>
	10	1,2	30	2,0	1,9	2,8×10 <sup>-2</sup>
Mài trong	6	18	5	0,6	2,0	49,6×10 <sup>-1</sup>
	7	9,4	8	0,9	1,9	13,0×10 <sup>-1</sup>
	8	4,7	13	1,1	1,8	3,6×10 <sup>-1</sup>
	9	2,4	18	1,4	1,7	1,1×10 <sup>-1</sup>
Mài phẳng	5	37	35	0,6	2,2	1,24×10 <sup>0</sup>
	6	18	100	0,9	1,9	2×10 <sup>-1</sup>
	7	9,4	180	1,0	1,8	6×10 <sup>-2</sup>
	8	4,7	370	1,6	1,8	1,3×10 <sup>-2</sup>
	9	2,4	550	2,3	1,6	2,64×10 <sup>-3</sup>
Đánh bóng	8	4,7	230	2,0	1,7	1,4×10 <sup>-2</sup>
	9	2,4	450	2,5	1,6	3,0×10 <sup>-3</sup>
	10	1,2	670	3,5	1,5	7,8×10 <sup>-4</sup>

1	2	3	4	5	6	7
Tiện	5	37	15	1,0	2,1	$2,50 \times 10^0$
	6	19	20	1,4	1,9	$7,9 \times 10^{-1}$
	7	9,4	35	1,8	1,8	$1,9 \times 10^{-1}$
	8	4,7	55	2,0	1,6	$6,3 \times 10^{-2}$
Phay mặt phẳng	5	37	420	0,4	2,2	$1,4 \times 10^{-1}$
	6	18	900	0,5	1,6	$3,0 \times 10^{-2}$
	7	8	1300	0,6	1,4	$1 \times 10^{-2}$
Mài nghiên bề mặt trụ	10	1,2	30	2,5	1,5	$2,2 \times 10^{-2}$
	11	0,6	40	2,6	1,4	$7,7 \times 10^{-3}$
	12	0,3	55	2,6	1,3	$2,6 \times 10^{-3}$
	13	0,15	75	3,3	1,2	$7,4 \times 10^{-4}$
Mài nghiên mặt phẳng	10	1,2	300	2,4	1,6	$2,34 \times 10^{-3}$
	11	0,6	500	3,0	1,4	$3,5 \times 10^{-4}$
	12	0,3	1000	3,3	1,2	$1,2 \times 10^{-4}$
	13	0,15	3000	4,5	1,1	$1,35 \times 10^{-5}$
Khuôn	8	4,7	15	0,7	1,8	$0,37 \times 10^{-2}$
	9	2,4	20	1,0	1,7	$1,2 \times 10^{-1}$
	10	1,2	35	1,9	1,6	$2,26 \times 10^{-2}$
	11	0,6	70	2,5	1,6	$4,65 \times 10^{-3}$

Bảng 2.7. Các thông số nhấp nhô bề mặt khi gia công lần cuối bề mặt trụ trong bằng các phương pháp khác nhau (chi tiết bằng thép)

Phương pháp gia công lần cuối	Cấp độ nhám bề mặt	$R_{max}$ , ( $\mu\text{m}$ )	$r$ , ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$ , ( $\mu\text{m}$ )	b	v	$\Delta$
		1	2	3	4	5	6
Mài nghiên	10	0,84	30	0,14	2,5	1,5	$1,53 \times 10^{-2}$
		0,66	33	0,11	2,5	1,5	$1,08 \times 10^{-2}$
		0,54	36	0,09	2,4	1,4	$8,2 \times 10^{-3}$
	11	0,43	40	0,071	2,5	1,4	$5,46 \times 10^{-3}$
		0,33	45	0,066	2,5	1,4	$3,83 \times 10^{-3}$
		0,27	50	0,055	2,6	1,4	$2,75 \times 10^{-3}$
	12	0,21	55	0,036	2,6	1,3	$1,87 \times 10^{-3}$
		0,16	62	0,030	2,5	1,4	$1,3 \times 10^{-3}$
		0,13	70	0,022	2,5	1,3	$9,1 \times 10^{-4}$
	13	0,10	80	0,018	3,3	1,2	$5,4 \times 10^{-4}$
		0,08	75	0,014	2,8	1,4	$3,9 \times 10^{-4}$
		0,06	85	0,010	2,9	1,5	$2,9 \times 10^{-4}$

1	2	3	4	5	6	7	8
Đánh bóng bằng kim cương	9	1,50	1300	0,25	0,9	1,0	$1,15 \times 10^{-3}$
		1,32	1300	0,22	2,1	1,2	$5,4 \times 10^{-4}$
		1,20	1230	0,20	0,9	1,2	$1,0 \times 10^{-4}$
	10	0,84	2300	0,14	1,0	1,4	$3,6 \times 10^{-4}$
		0,72	2200	0,12	1,0	1,3	$3,3 \times 10^{-4}$
		0,60	2400	0,12	1,1	0,5	$2,34 \times 10^{-4}$
	11	0,32	2400	0,066	1,6	1,5	$1,15 \times 10^{-4}$
		0,24	2600	0,058	2,0	1,0	$1,0 \times 10^{-4}$
		0,39	2800	0,040	2,0	1,2	$6 \times 10^{-5}$
	12	0,22	3100	0,30	2,5	1,5	$3,9 \times 10^{-5}$
		0,17	3150	0,029	2,0	1,2	$2,9 \times 10^{-5}$
		0,21	3200	0,025	3,5	1,8	$2,4 \times 10^{-5}$

Bảng 2.8. Các thông số nhấp nhô bề mặt thép đúc được gia công bằng các phương pháp khác nhau (I.V.Kragelsky)

Phương pháp gia công	Cấp độ nhám bề mặt	$R_{max}$ ( $\mu m$ )	$r$ , ( $\mu m$ )	b	v	$\Delta$
1	2	3	4	5	6	7
Mài mặt tròn	6	11	50	0,70	1,9	$2,7 \times 10^{-1}$
	7	7,2	85	1,20	1,9	$6,5 \times 10^{-2}$
	8	3,5	150	1,25	1,8	$2,0 \times 10^{-2}$
	9	1,8	190	1,55	1,7	$7,5 \times 10^{-3}$
Mài trong	6	11	12	1,6	2,6	$8,0 \times 10^{-1}$
	7	7,4	16	1,75	2,4	$3,7 \times 10^{-1}$
	8	3,6	25	1,95		$1,8 \times 10^{-1}$
	9	1,7	45	2,10	2,2	$7,7 \times 10^{-2}$
Mài bề mặt	5	23	40	0,42	2,0	$8,9 \times 10^{-1}$
	6	11	60	0,70	1,9	$2,3 \times 10^{-1}$
	7	6,9	90	0,75	1,8	$9,5 \times 10^{-2}$
Tiện	4	48	25	1,10	1,9	$1,85 \times 10^{-1}$
	5	21	37	1,20	1,8	$5,4 \times 10^{-1}$
	6	12	60	1,45	1,7	$1,54 \times 10^{-1}$
	7	7,4	130	1,50	1,6	$4,4 \times 10^{-2}$

1	2	3	4	5	6	7
Phay mặt phẳng	4	29	17	1,4	2,8	$2,54 \times 10^0$
	5	23	20	1,6	2,6	$9,6 \times 10^{-1}$
	6	11	25	1,7	2,4	$3,7 \times 10^{-1}$
	7	7,2	50	2,1	2,1	$1,07 \times 10^{-1}$
Tiện trong	5	23	12	0,72	2,2	$2,2 \times 10^0$
	6	11	13	1,00	2,2	$8,85 \times 10^{-1}$
	7	6,9	15	1,15	2,1	$4,3 \times 10^{-1}$
	8	3,8	20	1,75	2,0	$1,41 \times 10^{-1}$
Mài nghiên mặt phẳng	10	0,98	15	2,00	1,3	$3,9 \times 10^{-2}$
	11	0,42	20	2,30	1,2	$1,05 \times 10^{-2}$
	12	0,23	40	2,40	1,1	$2,6 \times 10^{-3}$
	13	0,18	55	3,10	1,0	$1,6 \times 10^{-3}$
Rèn khuôn	4	48	18	0,75	2,2	$3,0 \times 10^0$
	5	22	25	0,90	2,0	$9,3 \times 10^{-1}$
	6	11	100	1,20	1,9	$1,05 \times 10^{-1}$
	7	6,9	150	1,6	1,9	$3,5 \times 10^{-2}$

Bảng 2.9. Giá trị các tham số nhấp nhô bề mặt giữa các chi tiết có chuyển động tương đối

Các bộ phận khảo sát	Cấp độ nhám bề mặt	R <sub>max</sub> (μm)	r (μm)	R <sub>a</sub> (μm)	b	v	Δ
1	2	3	4	5	6	7	8
Phản tiếp xúc giữa mặt thép với cao su	9	0,72	180	3,1	3,0	0,13	$2,7 \times 10^{-10}$
Vòng bi - ngõng trục, mác 2X13	9	0,84	58	1,8	2,0	0,15	$1,1 \times 10^{-2}$
Xéc măng - xilanh	11	0,15	85	1,8	2,3	0,03	$1,4 \times 10^{-3}$
Trục điều chỉnh của máy tiện 1D63	11	0,15	100	3,0	1,8	0,03	$1,1 \times 10^{-3}$
Số trục (Bạc - Ceramic chứa MoS <sub>2</sub> )	7	5,40	77	3,5	1,8	0,09	$3,5 \times 10^{-2}$
Mặt ngoài lì hợp ma sát - Máy tiện 1A62	10	0,60	46	1,4	2,1	0,10	$1,10 \times 10^{-2}$
Mặt trong lì hợp ma sát - Máy tiện 1A62	9	1,8	60	2,8	2,2	0,32	$1,9 \times 10^{-2}$

1	2	3	4	5	6	7	8
Đường dẫn (Búa thủy lực)	8	3,6	19	1,0	1,2	0,67	$0,1 \times 10^{-1}$
Ranh vòng trong khói bánh răng	7	7,3	35	1,6	1,4	1,27	$1,5 \times 10^{-1}$
Vòng đệm và guốc hãm trong phanh máy bay, được làm từ:							
- Retinax	7	4	30	4,0	2,4	0,70	$74 \times 10^{-2}$
- ΦМК-11	7	6,5	120	3,5	2,5	1,15	$3,3 \times 10^{-3}$
- MKB-50	7	6	15	1,1	2,1	0,91	$3,7 \times 10^{-1}$
- HMX	8	4	76	1,0	2,1	0,65	$5,3 \times 10^{-2}$
- Thép mác 30СГСА	7	5	82	1,0	2,2	0,78	$5,5 \times 10^{-2}$
Bạc lót	9	1,2	1000	~	1,0	0,04	$1,2 \times 10^{-3}$
Xéc măng	10,11	0,48	270	~	0,4	0,02	$1,7 \times 10^{-3}$
Ngõng trục khüyü	9	1,6	500	~	1,2	0,05	$3,1 \times 10^{-3}$
Bạc ngõng trục khüyü	8,9	2,6	300	~	~	0,42	$86 \times 10^{-3}$
Chốt trụ	11	6,7	300	~	~	0,11	$2,2 \times 10^{-2}$
Bạc cổ trục đầu nhỏ tay biên	10	7,0	250	~	~	0,112	$2,8 \times 10^{-2}$
Pittông	9	1,1	220	~	~	0,18	$5,0 \times 10^{-3}$
Vòi phun động cơ		0,6	35	3,8	1,9	0,1	$1,7 \times 10^{-2}$
Thanh nối trực, trong ôtô Volga M-21	-	1,3	54	1,2	2,0	0,	-

Góc  $\varphi$  là góc nghiêng của từng thành phần nghiêng so với đường trung bình được tính toán bằng công thức:

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{\gamma_h y_i}{\gamma_v x_i} \quad (2.7)$$

Trong đó  $x_i$  và  $y_i$  là các cạnh của một tam giác được tạo thành (a) một đường vuông góc ( $y_i$ ) tới đường trung bình, vẽ từ một điểm trên biên dạng cách định một khoảng cách  $0,06R_{\max}$  ( $0,3R_a$ ), (b) một phần đường thẳng ( $x_i$ ) song song với đường trung bình qua một điểm trên biên dạng cách đáy một khoảng  $0,06R_{\max}$  ( $0,3R_a$ ) và tới điểm giao nhau với đường vuông góc, và (c) - đường thẳng nối các điểm kẻ trên của biên dạng (hình 2.6).

Trong các tính toán, người ta sử dụng độ dốc trung bình của các phần biên dạng:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \operatorname{tg}\varphi_i \quad (2.8)$$

Trong đó: n - số góc đo được.

Các tham số độ sóng được tìm từ đồ thị biên dạng dạng sóng.

Phương pháp thu được chiều cao lớn nhất  $H_s$  của các sóng và bước sóng trung bình  $S_s$ , về cơ bản là tìm các tham số nhấp nhô bề mặt  $R_{max}$  và  $S_m$ , và do đó không cần thiết phải giải chi tiết. Cần chú ý rằng, chiều dài đồ thị dạng sóng phải bằng ít nhất là 5 lần  $S_b$ .

Bán kính đỉnh sóng theo phương ngang  $r_{s,ngi}$  được tìm từ một công thức tương tự như công thức (2.4), cụ thể:

$$r_{s,ngi} = \frac{\gamma_d d_{s,ngi}^2}{\gamma_{ng}^2 8h_{s_i}} \quad (2.9)$$

Trong đó:  $d_{s_i}$  - chiều rộng của sóng trên đường trung bình;

$h_{s_i}$  - khoảng cách từ đỉnh của sóng tới đường trung bình.

Trong các tính toán, sử dụng giá trị trung bình:

$r_{s,ng} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k r_{s,ngi}$ , được xác định với ít nhất là 5 sóng. Bán kính đỉnh sóng theo phương

đúng cũng được tính tương tự. Và giá trị của bán kính đỉnh sóng được tính theo công thức:

$$r_s = \sqrt{r_{s,ng} r_{s,d}} \quad (2.10)$$

Bán kính đỉnh sóng thay đổi trong dãy từ 10 đến 1000mm; các tham số độ sóng cho các phương pháp gia công trên các máy khác nhau được đưa trong bảng 2.10 và 2.11.

**Bảng 2.10. Các giá trị tham số độ sóng theo phương ngang**

Phương pháp gia công và cấp độ bóng lấp bề mặt	$H_s$ ( $\mu m$ )	$S_s$ ( $\mu m$ )	$R_s$ (mm)	$\frac{S_s}{H_s}$
1	2	3	4	5
<i>Thép</i>				
Mài trong, 6 - 9	0,6 - 4,5	500 - 1400	10 - 80	100 - 1350
Mài mặt tru, 7-9	0,75 - 3	250 - 500	10 - 25	165 - 400
Mài phẳng, 5 - 9	1,2 - 13	750 - 1400	15 - 50	100 - 700
Khoan (doa hoặc tiện trong), 5 - 8	12 - 3,5	1000 - 1500	15 - 55	300 - 750
Sự tạo hình..., 4 - 7	2 - 6	400 - 1700	10 - 30	200 - 350

1	2	3	4	5
Khuôn, 8 - 11	0,1 - 0,8	150 - 700	2,5 - 40	200 - 7000
Doa, 6 - 9	0,5 - 4	300 - 500	5 - 50	100 - 1000
Đánh bóng, 8 - 10	0,3 - 1,5	150 - 350	10 - 25	200 - 500
Mài nghiền mặt phẳng, 11 - 12	0,1 - 0,35	60 - 100	5 - 10	300 - 600
Mài nghiền mặt trù, 10 - 13	0,05 - 0,15	35 - 120	2,5 - 10	400 - 700
Cao rà	3,5-6	5000 - 5500	600 - 1000	800 - 1600
<i>Gang</i>				
Mài trong, 6 - 8	1 - 3	450 - 1400	5 - 400	120 - 450
Mài mặt trù, 6 - 9	0,5 - 7,5	550 - 1000	10 - 100	80 - 1850
Cao rà, 8	4,5 - 7	4000	450	600 - 900
Mài phẳng, 6 - 9	0,8 - 4	500 - 900	20 - 80	200 - 800
Khoan, 5 - 9	0,5 - 10	400 - 1000	5 - 50	40 - 850
Phay mặt, 7	2,5	800	85	300
Tiện, 7	1	1000	50	1000

Bảng 2.11. Các giá trị tham số độ sóng theo phương dọc (E. V. Ryzhov)

Phương pháp gia công và cấp độ bóng lấp bề mặt	H <sub>s</sub> (μm)	S <sub>s</sub> (μm)	R <sub>s</sub> (mm)	$\frac{S_s}{H_s}$
<i>Thép</i>				
Mài phẳng, 5 - 9	1,2 - 12	2,4 - 3,5	30 - 350	280 - 2900
Rèn khuôn, 4 - 7	1 - 12	1 - 5	40 - 100	320 - 1000
Phay mặt phẳng, 4 - 6	7,5 - 40	1,7 - 3,4	5 - 45	60 - 270
Chuốt (khoét rộng), 7 - 9	0,4-3	0,7 - 0,9	20 - 80	300 - 1750
Mài nghiền mặt phẳng, 11 - 12	0,25 - 0,5	1 - 1,5	150 - 850	2000 - 6000
Cao rà, 8	3,5 - 6	6000 - 7500	1100 - 1700	1000 - 2000
<i>Gang</i>				
Mài phẳng, 6 - 9	1,3 - 9	1,8 - 2,3	40 - 200	200 - 1770
Phay mặt phẳng, 4 - 7	7,5 - 30	1,6 - 2,5	10 - 60	83 - 267
Sự tạo hình, 4	12	1,65	20	140
Cao rà, 8	4,5 - 7	7000	1200	1000 - 1600

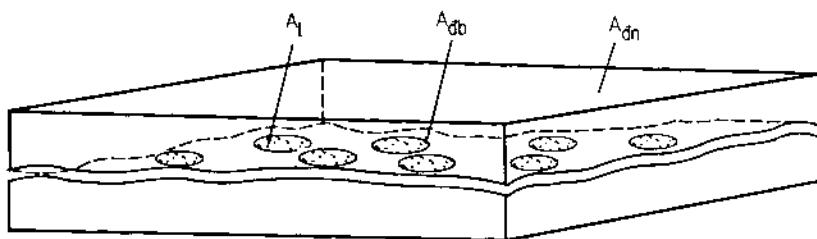
## 2.3. SỰ TIẾP XÚC CỦA BỀ MẶT CÓ ĐỘ NHÁM LỚN

### 2.3.1. Sự tương tác giữa các đỉnh cao nhất của bề mặt

Khi hai bề mặt có độ nhám lớn tác động với nhau bằng một lực pháp tuyến trong vùng tiếp xúc, các đỉnh đối diện nhau của các bề mặt tiếp xúc đầu tiên thì sẽ có tổng chiều cao là lớn nhất. Khi tải trọng tăng lên, những cặp mới của các đỉnh đối diện có tổng chiều cao nhỏ hơn sẽ tiếp xúc nhau. Trong sự tiếp xúc, các đỉnh của bề mặt sẽ biến dạng. Sự biến dạng đầu tiên là đàn hồi. Khi tải trọng vượt quá một giá trị giới hạn, sự biến dạng sẽ là biến dạng dẻo, hoặc là biến dạng đàn dẻo.

### 2.3.2. Diện tích tiếp xúc thực và diện tích tiếp xúc đường bao

Trong tương tác của các chi tiết máy, có một phần đáng kể của các bề mặt nằm ngoài vùng tiếp xúc do độ sóng và sai số hình dạng gây nên.



**Hình 2.7:** Diện tích tiếp xúc thực ( $A_t$ ), diện tích tiếp xúc đường bao ( $A_{db}$ ), diện tích danh nghĩa ( $A_{dn}$ )

Với lí do này, diện tích tiếp xúc hầu như không phụ thuộc vào diện tích hình học của chi tiết.

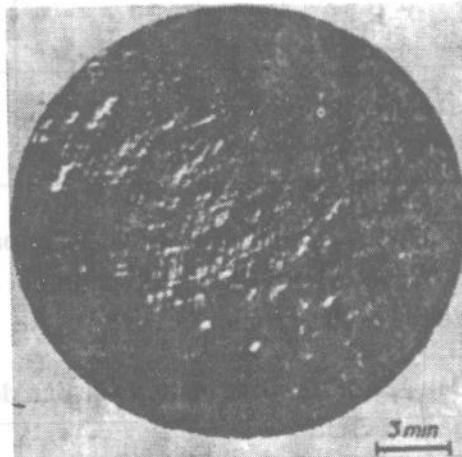
Các kết quả nhóm các vết tiếp xúc trong các vùng khác nhau là ở các đỉnh của dạng sóng (hình 2.7); tổng của tất cả các dạng diện tích này là *diện tích tiếp xúc đường bao*,  $A_{db}$ . Diện tích này có thể được định nghĩa như là *diện tích trên toàn bộ các sóng trong vùng tiếp xúc*. Sự tiếp xúc này hiển nhiên là không liên tục, bởi do các nhấp nhô bề mặt.

Diện tích tiếp xúc thực,  $A_t$  được định nghĩa là *diện tích trong phạm vi các độ không phẳng của các nhấp nhô bề mặt trong vùng tiếp xúc*. Diện tích tiếp xúc gần với giá trị diện tích mà các nguyên tử và phân tử của một chất nào đó tương tác với nhau, tuy nhiên hai diện tích này không đồng nhất trong một số trường hợp. Diện tích tiếp xúc thường nhỏ; nó có giá trị không vượt quá 0,01% đến 0,1% diện tích danh nghĩa. Thực tế các vết tiếp xúc phát triển hết cả vùng biến dạng, trong từng phần riêng biệt từ 3 tới 50  $\mu\text{m}$ .

Tải trọng pháp tuyến trên một đơn vị diện tích tiếp xúc thực là *áp suất thực*  $p_t$ . Diện tích tiếp xúc đường bao thông thường chỉ từ 5 đến 15%  $A_{dn}$ . Nếu diện tích  $A_{dn}$  không quá rộng và độ sóng có thể bỏ qua, thì diện tích tiếp xúc đường bao có thể cho là bằng

diện tích  $A_{db}$ . Áp suất pháp tuyến trên một đơn vị diện tích tiếp xúc đường bao là áp suất đường bao  $p_{db}$ .

Một ảnh chụp diện tích tiếp xúc của 2 mẫu thép, các diện tích tiếp xúc thực và đường bao có thể nhận ra rõ ràng, được chỉ ra trên hình 2.8.



Hình 2.8: Diện tích tiếp xúc giữa các chi tiết bằng thép

### 2.3.3. Tính áp suất và diện tích tiếp xúc thực

Áp suất thực có thể được tính trên cơ sở của một mẫu mặt nhám trong một tập hợp các phần hình cầu có bán kính  $r$ . Vì  $r$  được xác định là giá trị trung bình hình học của các bán kính theo phương ngang và theo phương dọc, nó phù hợp cho các đỉnh của hình elip xoay kéo dài. Công thức thu được với giả định rằng tiếp xúc đàn hồi cho vùng biến dạng của các đỉnh riêng biệt tuân theo tiếp xúc Hertz, trong khi đó, đối với tiếp xúc đàn hồi thì ứng suất tiếp xúc trung bình bằng độ cứng tế vi  $H$  (đối với một số vật liệu, độ cứng tế vi có thể được coi xấp xỉ bằng độ cứng Brinell và Vickers, cụ thể,  $H \approx HB \approx HV$ ). Từ các giả định này và thừa nhận rằng vật liệu trong lớp nhấp nhô được phân bố phù hợp với công thức (2.1), chúng ta có giá trị áp suất trung bình tiếp xúc thực  $p_t$  theo công thức sau:

$$p_t = (K_3 B)^{\frac{v}{v+\omega}} \left( \frac{R_p}{r} \right)^{\frac{\omega v}{v+\omega}} \left( \frac{N}{\alpha t_m A_{db}} \right)^{\frac{\omega}{v+\omega}} \quad (2.11)$$

Trong đó:  $\alpha$  - hệ số độ võng đàn hồi;

$\omega$  và  $B$  - các hệ số đặc trưng cho tính biến dạng của vật liệu; giá trị của các hệ số này được cho trong bảng 2.12.

**Bảng 2.12. Các giá trị  $\omega$ , B và  $\alpha$  đối với các dạng tiếp xúc khác nhau**

Loại vùng biến dạng	Các bề mặt	$\omega$	B	$\alpha$
Đàn hồi	Các bề mặt kim loại với $R_a \leq 0,16 \mu m$	0,5	0,43/E	0,5
	Các vật liệu polyme			
Dẻo	Các bề mặt kim loại, $R_a > 0,16 \mu m$	0	H	1

Bảng 2.12 và 2.13, giá trị của  $\alpha$  không chỉ đối với các loại tiếp xúc đàn hồi và dẻo, mà cả đối với tiếp xúc đàn dẻo, sự cho phép này để đánh giá độ lệch của các đỉnh trong khi biến dạng dẻo cho các bề mặt khác nhau.

**Bảng 2.13. Hệ số  $\alpha$  cho tiếp xúc đàn dẻo**

HB	$S_m/Rz$					
	1	10	20	30	40	50
50	1,0	0,85	0,75	0,65	0,55	0,50
100	0,90	0,75	0,56	0,50	0,50	0,50
200	0,80	0,56	0,50	0,50	0,50	0,50
400	0,70	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Hệ số  $K_3$  được tính toán bằng công thức:

$$K_3 = \frac{\Gamma(v+1)\Gamma(\omega+2)}{\Gamma(v+\omega+1)} \quad (2.12)$$

Một số giá trị của  $K_3$  được đưa trong bảng 2.14.

**Bảng 2.14. Các giá trị hệ số  $K_3$ , đối với một số giá trị  $\omega$  và  $v$**

$\omega$	v		
	2	3	4
0	1	1	1
0,2	0,91	0,85	0,81
0,4	0,83	0,73	0,69
0,5	0,80	0,69	0,61

Chú ý:  $v = 1$ ,  $K_3 = 1$  cho tất cả các giá trị của  $\omega$ .

Bảng 2.15. Các công thức xấp xỉ cho tính toán áp suất thực

Loại biến dạng	Các bề mặt và áp suất	Công thức tính toán	Ghi chú
Đàn hồi	Hai mặt nhám	$p_t = 0,61 \left( \frac{Ra}{rE^2} \right)^{0,43} p_{db}^{0,14}$	$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
	Mặt nhám và mặt phẳng	$p_t = 0,8 \left( \frac{Ra}{rE^2} \right)^{0,43} p_{db}^{0,2}$	
Dẻo	$p_{db} \leq \frac{1}{3}$	$P_t \approx H$	Cho các bề mặt tiếp xúc từ các vật liệu khác nhau, giá trị độ cứng tế vi nhỏ hơn được đưa ra tính toán
	$p_{cdb} > \frac{1}{3} HB$	$p_t \approx p_{db} - 0,4 \sqrt{\frac{H^3}{p_{db}}}$	
Tải trọng lặp lại đối với các bề mặt biến dạng dẻo	Hai bề mặt nhám	$p_t \approx H \left( \frac{N}{N_o} \right)^{1/3}$	Các công thức chỉ đúng nếu các bề mặt không bị dịch chuyển sau lần tác dụng lực đầu tiên.
	Mặt nhám với mặt phẳng	$p_t \approx H \left( \frac{N}{N_o} \right)^{1/2}$	

Chú ý:  $N_o$  tải trọng pháp tuyến ở lần tác dụng đầu tiên

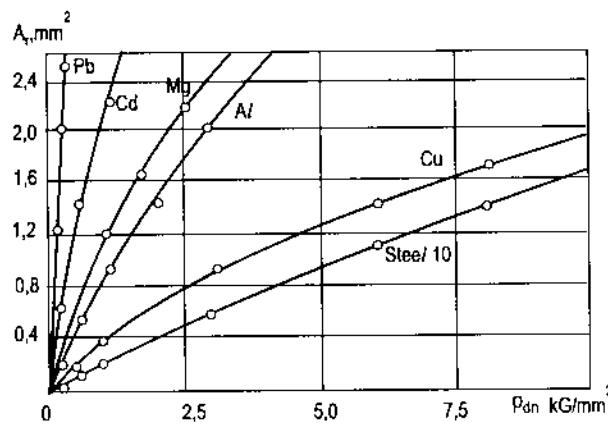
Khi biến dạng dẻo xảy ra ở lần tác dụng tải thứ nhất, thứ hai và các lần tiếp theo mà không có sự thay đổi vị trí lẫn nhau của các bề mặt, sẽ dẫn đến biến dạng đàn hồi cho tới khi tải trọng tác dụng  $N$  vượt giá trị ban đầu  $N_o$ . Trong trường hợp này:

$$p_t = H \left( \frac{N}{N_o} \right)^{1/v} \quad (N \leq N_o) \quad (2.13)$$

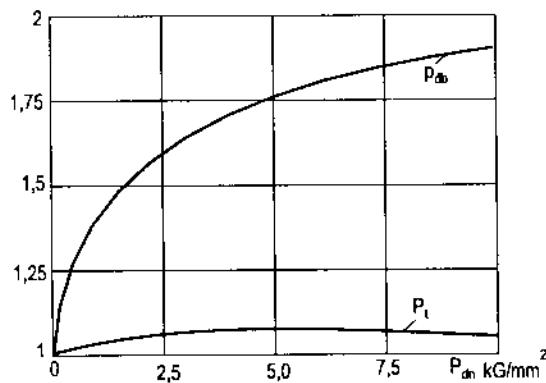
Trong đó:  $H$  - độ cứng tế vi.

Tiếp xúc dẻo ở áp suất cao là một trường hợp đặc biệt. Nếu  $p_{db} > \frac{1}{3} HB$ , áp suất tiếp xúc sẽ vượt quá độ cứng của vật liệu, vì sự tương tác của các đỉnh bị biến dạng sẽ dẫn đến gây trở ngại cho biến dạng dẻo.

Sử dụng công thức (2.11) và (2.13) và thay thế các giá trị xấp xỉ của các tham số hình học bề mặt và vật liệu, độ lớn của áp suất thực có thể được tính cho các trường hợp khác nhau. Để đơn giản trong tính toán, các công thức xấp xỉ tính cho áp suất thực (trong bảng 2.15) có thể nhận được từ việc thay thế các giá trị đặc trưng của các tham số vào công thức (2.11).



**Hình 2.9:** Quan hệ giữa diện tích tiếp xúc thực và áp suất danh nghĩa



**Hình 2.10:** Áp suất thực và đường bao như một hàm của áp suất danh nghĩa

Diện tích tiếp xúc thực có thể được tính bằng công thức:

$$A_1 = \frac{N}{P_t} = A_{db} \frac{P_{db}}{P_t} \quad (2.14)$$

Quan hệ giữa diện tích tiếp xúc thực và áp suất đường bao cho các kim loại khác nhau, với  $R_z = 40\mu m$  được chỉ ra trên hình 2.9 và 2.10 biểu diễn bằng đồ thị các áp suất thực và áp suất đường bao như một hàm của tải trọng pháp tuyến.

### Thí dụ 2.3

Tính áp suất thực cho sự tiếp xúc giữa 2 bề mặt thép giống nhau.

$$R_{a1} = R_{a2} = 0,08\mu m, r_{ng} = 160\mu m, r_d = 800\mu m.$$

$$E = 2 \cdot 10^4 \text{ kG/mm}^2, \mu = 0,3; p_{db} = 2 \text{ kG/mm}^2.$$

Theo bảng 2.12, tiếp xúc là dẻo.

Công thức gần đúng, chọn trong bảng 2.15, ta có:

$$r = \sqrt{r_{ng} r_d} = \sqrt{160.800} = 358\mu\text{m}$$

$$R_a = R_{a1} + R_{a2} = 0,08 + 0,08 = 0,16\mu\text{m}$$

$$\Theta_{\Sigma} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} = \frac{2(1 - \mu^2)}{E} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{kG}$$

Thay các giá trị tìm được ở trên vào công thức  $p_t$

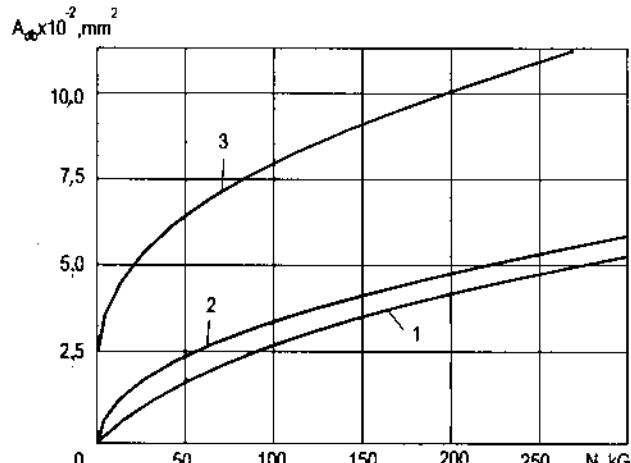
$$p_t \approx \frac{0,61}{E_{td}^{0,86}} \left( \frac{R_a}{r} \right)^{0,43} p_{db}^{0,14} \approx 73 \text{ kG/mm}^2$$

#### 2.3.4. Tính diện tích tiếp xúc và áp suất đường bao

Với các diện tích bề mặt nhỏ mà dạng sóng không nhận biết được, diện tích tiếp xúc, được coi gần bằng diện tích danh nghĩa, tức  $A_{db} = A_{dn}$ .

Diện tích đường bao được tính với mẫu dạng sóng là chỏm cầu hoặc elipxit. Nếu dạng sóng gần giống mặt tròn, ở đây bán kính cong theo phương dọc có thể được xác định, ta sẽ thu được bán kính đỉnh sóng, và các đặc trưng của dạng sóng trong trường hợp này được tính theo công thức (2.6).

Với nhấp nhô bề mặt thấp ( $R_{max} < 0,1H_s$ ), dạng sóng có thể được coi là phẳng và các phép tính được dựa trên cơ sở các công thức Hertz.



Hình 2.11: Quan hệ giữa diện tích tiếp xúc đường bao và độ nhám bề mặt

- 1. Với mặt nhẵn;
- 2. Mặt có  $R_{max} = 4\mu\text{m}$ ;
- 3. Mặt có  $R_{max} = 40\mu\text{m}$

Biểu đồ đường cong cho ta thấy sự khác nhau của các diện tích tiếp xúc đường bao giữa các bề mặt cầu thép nhẵn và gỗ ghề được chỉ ra trên hình 2.11. Sự khác nhau đặc biệt lớn khi tải trọng tác dụng nhỏ và bề mặt già công lần cuối thô. Đối với các bề mặt có sóng lớn, sự tác động của các nhấp nhô trên diện tích đường bao thường lớn hơn, vì khi tác dụng tải trên bề mặt, luôn có một số sóng tiếp xúc liên tục.

Bảng 2.16. Công thức tính áp suất và diện tích tiếp xúc đường bao

A, R <sub>max</sub> < 0,1 H <sub>s</sub>			
Số sóng tham gia tiếp xúc, n <sub>b</sub>	Các điều kiện	Các công thức tính toán	Ghi chú
≤ 3	Diện tích tiếp xúc danh nghĩa A <sub>dn</sub> nhỏ, có thể so sánh được với S <sub>s</sub> <sup>2</sup>	$A_{db} = 2,8n_s^{1/3}(E_{td}R_sN)^{2/3}$ $P_{db} = \frac{0,36}{(E_{td}R_s)^{2/3}} \left(\frac{N}{n_s}\right)^{1/3}$	$R_s = \frac{R_{s1}R_{s2}}{R_{s1} + R_{s2}}$
> 3	Diện tích tiếp xúc danh nghĩa A <sub>dn</sub> , cơ bản lớn hơn S <sub>s</sub> <sup>2</sup>	$A_{db} = 2,2A_{dn}^{0,14} \left(\frac{R_s}{H_s}\right)^{0,43} (E_{td}N)^0$ $P_{db} = 0,45 \left(\frac{H_s}{R_s E^2}\right)^{0,43} P_{dn}^{0,14}$	
B . R <sub>max</sub> ≥ 0,1 H <sub>s</sub>			
Số sóng tham gia tiếp xúc, n <sub>s</sub>	Vùng biến dạng hoặc điều kiện của bề mặt	Các công thức	
≤ 3	Dẻo	$A_{db} \cong \pi n_b \left\{ \left( \frac{3E_{db}R_sN}{4n_s} \right)^{0,89} + 1,8R_pR_s \left( \frac{N}{n_s H} \right)^{0,33} \right\}^{0,75}$	
	Đàn hồi	$A_{db} \cong \pi n_b \left\{ \left( \frac{3\Theta_{\Sigma}R_sN}{4n_s} \right)^{0,86} + 2,6R_pR_s \left( \frac{r}{R_p} \right)^{0,14} \left( \frac{E_{td}N}{n_s} \right)^{0,28} \right\}^{0,78}$	
> 3	Mặt sóng với mặt phẳng	$A_{db} = A_a K_b K_{\omega} \left\{ \left( \frac{2R_s}{H_s} \right)^{1/2} E_{td} P_{dn} \right\}^{\frac{v_s}{v_s + \delta}}$	
	Hai mặt sóng	$v_s = 3$ $K_{\omega} = 2,4$	$P_{db} = \frac{1}{K_{\omega} K_s} \left( \frac{H_s}{2R_s E^2} \right)^{\frac{v_s}{2(v_s + \delta)}} P^{\frac{\delta}{v_s + \delta}}$

Chú ý: Giá trị xấp xỉ đầu tiên  $R_p \approx \frac{1}{2} R_{max}$

Công thức tính toán diện tích tiếp xúc và áp suất đường bao được đưa ra trong bảng 2.16 và 2.17.

Bảng 2.17. Giá trị cho các hệ số trong các công thức bảng 2.16

Loại vùng biến dạng	$\frac{1}{E_{td}H}$	Hệ số	$R_{max}H_s$					
			0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2
Dẻo	50	$K_{s1}$	1,05	1,15	1,20	1,35	1,55	2,1
		$\delta_1$	0,60	0,70	0,85	1,15	1,50	2,3
		$K_{s2}$	0,95	0,9	0,85	0,85	1,10	1,5
		$\delta_2$	0,7	1,05	1,45	2,15	3,15	3,9
	100	$K_{s1}$	1,10	1,17	1,28	1,45	1,75	2,6
		$\delta_1$	0,65	0,8	1,0	1,3	1,65	2,0
		$K_{s2}$	0,95	0,88	0,85	0,9	1,2	2,1
		$\delta_2$	0,75	1,10	1,60	2,4	3,4	4,0
Đàn hồi	200	$K_{s1}$	1,13	1,20	1,35	1,55	2,1	3,3
		$\delta_1$	1,70	0,85	1,10	1,50	2,35	2,0
		$K_{s2}$	0,90	0,85	0,85	0,93	1,35	2,5
		$\delta_2$	0,80	1,2	1,7	2,6	3,6	4,0
	-	$K_{s1}$	1,05	1,06	1,14	1,25	1,5	2,1
		$\delta_1$	0,65	0,80	1,05	1,4	1,95	2,4
		$K_{s2}$	0,88	0,85	0,80	0,85	1,1	1,8
		$\delta_2$	0,75	1,1	1,7	2,6	2,6	4,5

Chú ý: Chỉ số 1 cho quan hệ giữa hai bề mặt gỗ ghề, và 2 cho một mặt gỗ ghề và một mặt nhẵn

Nếu tính toán bằng các công thức trong bảng 2.16 mà được  $A_{db} > A_{dn}$ , điều đó có nghĩa là các công thức tính khi tác dụng lực lên các bề mặt không còn đúng nữa, và ở đây  $A_{db}$  chỉ có thể lấy bằng  $A_{dn}$ .

#### Thí dụ 2.4

Tính diện tích tiếp xúc giữa 2 mặt chi tiết bằng thép:

$$R_{a1} = R_{a2} = 1,6 \mu\text{m}, H_{s1} = 10 \mu\text{m}; H_{s2} = 20 \mu\text{m}; R_{s1} = 100 \text{mm}; R_{s2} = 150 \text{mm}.$$

$$E_1 = E_2 = 2.104 \text{ kG/mm}^2; A_{dn} = 2500 \text{mm}^2;$$

$$\mu_1 = \mu_2 = 0,3; H_1 = H_2 = 100 \text{kG/mm}^2; p_{dn} = 1 \text{kG/mm}^2.$$

Theo bảng 2.16, ta có:

$$v_s = 3; K_s = 2,38; R_s = \frac{R_{s1}R_{s2}}{R_{s1} + R_{s2}} = 60$$

$$E_{td} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ kG/mm}^2$$

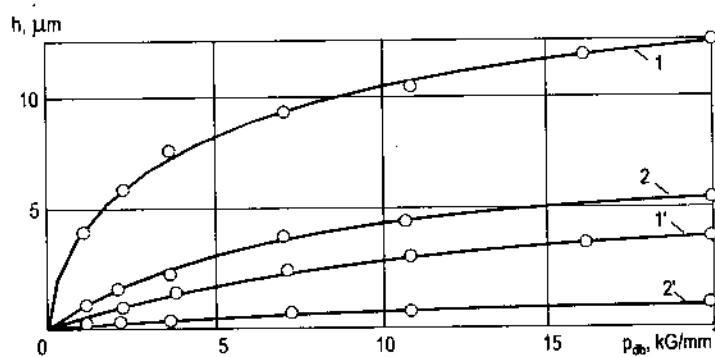
Ta có:  $\frac{1}{EH} = 111$ ;  $R_{max}/H_{s1} \approx 5R_{a1}/H_s = 0,8$  (lấy giá trị lớn hơn).

Từ bảng 2.15,  $K_{s1} = 1,8$ ;  $\delta_1 = 1,7$ .

Thay các giá trị trên vào công thức  $A_{db}$  (bảng 2.16), ta có:  $A_{db} = 420\text{mm}^2$ .

### 2.3.5. Tính tiếp xúc giữa các bề mặt

Quá trình xâm nhập, nghiền nát, và biến dạng đàn hồi của các bề mặt gỗ ghề dưới tác dụng của tải trọng lên hai bề mặt tiếp xúc nhau, trong vài trường hợp, giá trị gần đúng xác định đặc trưng qua ma sát và mài mòn của các bề mặt; vì cách thức tương tác, diện tích tiếp xúc thực, và kích thước vệt tiếp xúc phụ thuộc chiều sâu thâm nhập. Ba dạng tiếp xúc được phân biệt như sau: tiếp xúc dẫn đến biến dạng lớp gỗ ghề  $h$ , tiếp xúc dẫn đến biến dạng của các sóng  $h_s$ , và tổng sự tiếp xúc của cả hai nhân tố đó  $h_{\Sigma} = h + h_s$ .



Hình 2.12: Quan hệ giữa tiếp xúc và áp suất đường bao

1 và 2 lần tác dụng đầu tiên giữa 2 mặt nhám (1),  
và một mặt nhám với một mặt nhẵn (2); 1' và 2' - lặp lại tải trọng với các bề mặt đó

Các công thức tính gần đúng sự tiếp xúc dẫn đến biến dạng các gỗ ghề được đưa ra trong bảng 2.18.

Bảng 2.18. Các công thức tính gần đúng

Loại bề mặt	Điều kiện và phạm vi ứng dụng của công thức	Các công thức	Chú ý
Không có sóng	Công thức tổng quát	$h = R_p \left( \frac{P_{db}}{\alpha t_m p_t} \right)^{1/v}$	$R_p$ , $t_m$ , $v$ - tính toán trên phần 1.2.3;
	Hai bề mặt nhám	$h \approx 3,4 R_a \left( \frac{P_{db}}{p_t} \right)^{1/3}$	$p_t$ - bảng 2.15
	Một mặt nhám	$h \approx 4,1 R_a \left( \frac{P_{db}}{p_t} \right)^{1/2}$	$P_{db}$ - bảng 2.16 và bảng 2.17
	Một mặt nhẵn		
	Lặp lại tác dụng lực cho tới khi tiếp xúc đàn hồi	$h = \frac{1 - \alpha^{1/2}}{\alpha^{1/2}} R_p \left( \frac{2 P_{db}}{H} \right)^{1/3}$	$\alpha$ - bảng 2.12 và 2.13

Bảng 2.18 (tiếp theo)

Loại bề mặt	Điều kiện và phạm vi ứng dụng của công thức	Các công thức	Chú ý
Có sóng	Mặt sóng với mặt phẳng	$h_{td} = h + 3,83H_s^{0.8} R_s^{0.2} (E_{td} p_{dn})^{0.4}$	Giá trị $h$ được tính ở trên
	Hai mặt sóng	$h_{td} = h + 1,8H_s^{0.85} R_s^{0.15} (E_{td} p_{dn})^{0.3}$	

Hình 2.12 đưa ra quan hệ giữa tiếp xúc và áp suất đường bao trong lần tác dụng tải đầu tiên (1, 2) và lần (1', 2') trên vùng tiếp xúc.

### Thí dụ 2.5

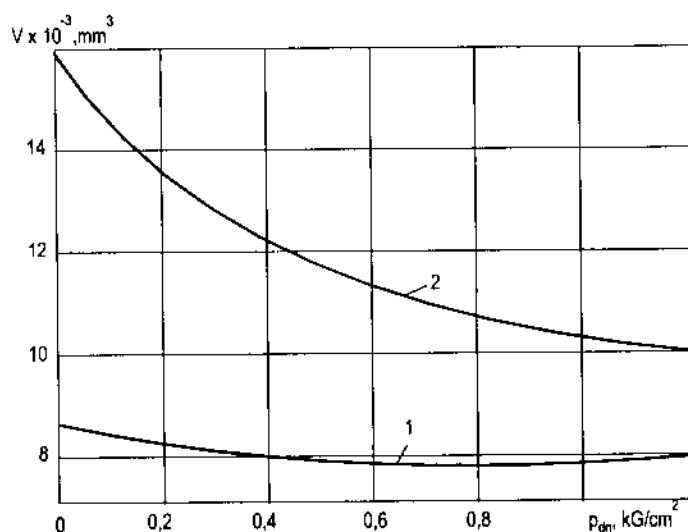
Tính tiếp xúc giữa 2 bề mặt thép có:  $R_{z1} = R_{z2} = 0,3\mu\text{m}$ ,  $r = 300\mu\text{m}$ ,  $E = 2 \cdot 10^4 \text{ kG/mm}^2$ ,  $\mu = 0,3$  ở áp suất  $p_{db} = 1 \text{ kG/mm}^2$ .

$$R_z = R_{z1} + R_{z2} = 0,6 \mu\text{m}, r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} = 150\mu\text{m}, E_{td} = \frac{2(1-\mu^2)}{E} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ kG/mm}^2$$

Công thức tính được chọn trong bảng 2.18. Đầu tiên,  $p_t$  phải được xác định nhờ sử dụng công thức xấp xỉ trong bảng 2.15. Với  $R_a \approx 0,2 R_z = 0,12 \mu\text{m}$ , ta sẽ có  $p_t \approx 4,3 \text{ kG/mm}^2$ . Thay giá trị xấp xỉ vào công thức từ bảng 2.18, ta được  $h_{td} \approx 0,25 \mu\text{m}$ .

### 2.3.6. Tính thể tích tiếp xúc

Thể tích phân tiếp xúc và khe hở trung bình giữa các bề mặt trong tiếp xúc có thể được xác định bằng nhờ tính chất dẫn nhiệt tại phần chung của 2 mặt đó. Thể tích này phụ thuộc vào dạng đường đặc tính của 2 bề mặt tiếp xúc và tổng giá trị phân tiếp xúc giữa chúng khi chịu tải.



Hình 2.13: Sự thay đổi thể tích phân tiếp xúc đối với các bề mặt thép  
1. Không có sóng; 2. Có sóng

**Bảng 2.19. Các công thức tính thể tích  $V_s$  và giá trị trung bình khe hở  $h_m$**

Các điều kiện tiếp xúc	Các công thức	Chú ý
Các công thức tổng quát áp dụng cho hai mặt nhám	$V_s = \left\{ 1 - \left( \frac{P_{db}}{\alpha t_m p_t} \right)^{1/v} \right\} (R_{p1} + R_{p2}) A_{db}$ $h_m = \left\{ 1 - \left( \frac{P_{db}}{\alpha t_m p_t} \right)^{1/v} \right\} (R_{p1} + R_{p2})$	
Tiếp xúc giữa hai mặt nhám	$V_s \equiv \left\{ 1 - 3,3 \left( \frac{P_{db}}{p_t} \right)^{1/3} \right\} (R_{p1} + R_{p2}) A_{db}$ $h_m \equiv \left\{ 1 - 3,3 \left( \frac{P_{db}}{p_t} \right)^{1/3} \right\} (R_{p1} + R_{p2})$	Tính toán $p_t$ xem trong bảng 2.15, $P_{db}$ - bảng 2.16, 2.17; $v$ và $t_m$ xem phần 2.2.3
Tiếp xúc giữa một mặt nhám và một mặt nhẵn	$V_s \equiv \left\{ 1 - 3,6 \left( \frac{P_{db}}{p_t} \right)^{1/2} \right\} R_p + A_{db}$ $h_m \equiv \left\{ 1 - 3,6 \left( \frac{P_{db}}{p_t} \right)^{1/2} \right\} R_p$	
Tiếp xúc giữa hai bề mặt sóng và nhám	$V_{td} = \left( \frac{H_{s1}}{2} + \frac{H_{s2}}{2} + R_{p1} + R_{p2} - h_\Sigma \right) A_{db}$ $h_m = \frac{H_{s1}}{2} + \frac{H_{s2}}{2} + R_{p1} + R_{p2} - h_{td}$	Tính toán $h_{td}$ xem trong bảng 2.18.

Bảng 2.19 là công thức tính thể tích phần tiếp xúc và giá trị trung bình khe hở trong tiếp xúc của các bề mặt. Các đường cong cho biết sự thay đổi thể tích tiếp xúc khi tác dụng tải cho các chi tiết bằng thép được chỉ ra trên hình 2.13.

### Thí dụ 2.6

Xác định thể tích tiếp xúc giữa hai bề mặt, vật liệu bằng đồng cho

$$R_{a1} = 5 \mu m, R_{a2} = 0,3 \mu m,$$

$$HB_1 = HB_2 = 70 \text{ kG/mm}^2.$$

$$A_{db} = 100 \text{ mm}^2, N = 100 \text{ kG}.$$

Từ  $R_{a1}/R_{a2} = 16,7$ ; mặt thứ hai có thể coi như mặt phẳng, ta coi  $p_r = H \approx HB = 70 \text{ kG/mm}^2$ ; với độ sóng được bỏ qua,  $A_{db} = A_{dn}$  và  $p_{db} = p_{dn}$ ;  $R_p \approx 2,5R_a = 1,25 \mu m$ .

Do đó, theo bảng 2.19:

$$V_s = \left\{ 1 - 3,6 \left( \frac{P_{db}}{p_t} \right)^{1/2} \right\} A_{db} R_p = \left\{ 1 - 3,6 [100/(70 \times 100)]^{1/2} \right\} 100 \times 2,5 \times 0,005 = 0,71 \text{ mm}^3$$

### 2.3.7. Tính số vết và khoảng cách trung bình của chúng trong tiếp xúc thực

Các vết tiếp xúc thực là nơi xảy ra sự tương tác cơ bản giữa các bề mặt, các sự tương tác này sẽ sinh ra ma sát và mòn. Diện tích các vết tiếp xúc xác định kích thước các mảnh mòn ra, thời gian tương tác ở một vết tiếp xúc và nhiệt độ sinh ra từ ma sát. Khoảng cách trung bình của các vết tiếp xúc định rõ tần số của các tương tác đó. Số các vết tiếp xúc được tính toán trên cơ sở một mẫu hình cầu của nhấp nhô bề mặt, áp dụng để xác định luật phân bố các đỉnh gồ ghề trên suốt chiều cao của lớp bề mặt, xuất phát từ đường đặc tính phân bố của bề mặt chi tiết. Các công thức tính số vết tiếp xúc được đưa ra trong bảng 2.20.

**Bảng 2.20. Các công thức xác định số vết tiếp xúc thực -  $n_t$ , diện tích trung bình của nó  $\Delta A_t$  và khoảng cách trung bình giữa chúng,  $S_t$**

Các bề mặt tham gia tiếp xúc	Các công thức	Chú ý
Hai bề mặt nhám	$n_t = \frac{3,1A_{db}}{K_t r R_a} \left( \frac{p_{db}}{p_t} \right)^{0,66}$ $S_t = 0,57(K_t r R_a)^{0,5} \left( \frac{p_{db}}{p_t} \right)^{0,33}$ $\Delta A_t = 0,33 K_t r R_a \left( \frac{p_{db}}{p_t} \right)^{0,33}$	Cho tiếp xúc đàn hồi (xem bảng 2.12) $K_t = 11$ , và cho tiếp xúc dẻo, $K_t = 21$ .
Một mặt nhám với một mặt nhăn	$n_t = \frac{2A_{db}}{K_t r R_a} \left( \frac{p_{db}}{p_t} \right)^{0,5}$ $S_t = 0,7(K_t r R_a)^{0,5} \left( \frac{p_{db}}{p_t} \right)^{0,5}$ $\Delta A_t = 0,5 K_t r R_a \left( \frac{p_{db}}{p_t} \right)^{0,5}$	Xác định $r$ và $R_a$ xem mục 1.2.3, và xác định $p_t$ và $p_{db}$ xem trong bảng 2.15, 2.16 và 2.17.

#### Thí dụ 2.7

Tính diện tích trung bình và số vết tiếp xúc cho các bề mặt thép ( $R_z = 40 \mu\text{m}$ ,  $r = 100\mu\text{m}$ ,  $A_{db} = 100\text{mm}^2$ ,  $N = 200\text{kG}$ ,  $HB = 300 \text{ kG/mm}^2$ ). Do đó  $R_a \approx 1/4R_z = 10\mu\text{m}$ ,  $p_{db} = 1 \text{ kG/mm}^2$ ,  $p_t = 300 \text{ kG/mm}^2$ , và do tiếp xúc là dẻo,  $K_t = 21$ . Thay các giá trị của các tham số vào công thức tiếp xúc đối với hai bề mặt nhám (bảng 2.20), ta có:

$$n_t = \frac{200}{0,33 \cdot 21 \cdot 0,1 \cdot 0,01} (1/300)^{0,66} = 641 \text{ vết.}$$

$$\Delta A_t = 0,33 \cdot 21 \cdot 0,1 \cdot 0,01 (1/300)^{0,33} = 0,001 \text{ mm}^2$$

Bán kính trung bình của vết tiếp xúc:  $d = \sqrt{\Delta A_t} = 31,6\mu\text{m}$

## 2.4. CÁC TÍNH CHẤT LUU BIẾN CỦA TIẾP XÚC

Áp suất thực trên vùng tiếp xúc rất cao làm biến dạng dẻo các đỉnh của bề mặt, và trong vài trường hợp là nguyên nhân làm cho vật liệu chỗ tiếp xúc bị xô lệch, trượt. Kết quả làm thay đổi các đặc trưng tại vùng tiếp xúc khi tác dụng tải lâu hơn. Mỗi quan hệ giữa biến dạng vùng tiếp xúc và thời gian được xác định bởi các tính chất của vật liệu, nhiệt độ, độ nhám bề mặt tương ứng của nó, và tải trọng tác dụng.

Theo thực nghiệm, tốc độ áp suất giảm trong vùng lõm khi một hình cầu cứng tác dụng lên một vật liệu có tính dẻo trung bình, là một hàm mũ của áp suất toàn phần theo thời gian; ở đây, áp suất tiếp xúc sẽ được mô tả như sau:

$$p_{tx} = HB(t_{HB}/t)^m$$

Trong đó:  $t_{HB}$  - thời gian giữ tải khi kiểm tra độ cứng Brinell;

$m$  - hằng số lưu biến của vật liệu kiểm tra.

Các công thức tính toán diện tích tiếp xúc thực và tiếp xúc của các bề mặt là một hàm số theo thời gian được đưa ra trong bảng 2.21, và các giá trị hằng số lưu biến cho một số kim loại và hợp kim được đưa ra trong bảng 2.22. Hằng số  $m$  có thể được tìm bằng thực nghiệm, sử dụng công thức trên. Từ bảng 2.22, sự trượt của các kim loại cứng là rất thấp ở nhiệt độ thường và đánh giá tác động của tiếp xúc ở nhiệt độ cao, giá trị  $m$  cần thiết được xác định trước ở nhiệt độ đó. Để tính giá trị xấp xỉ đầu tiên, giá trị  $m$  ở nhiệt độ lưu biến thích hợp, được lấy trong bảng 2.22, có thể được sử dụng để đánh giá độ nhám trong tiếp xúc.

Bảng 2.21. Công thức xác định diện tích tiếp xúc thực của các bề mặt kim loại

Các điều kiện tiếp xúc	Công thức	Chú ý
Một trong các mặt tiếp xúc bị biến dạng dẻo	$A_n = \frac{N}{HB t_{HB}^m} (t_2^m - t_1^m)$ $h_1 = R_p \left( \frac{p_{ab}}{t_m HB} \right)^{1/v} \left\{ \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^{m/v} - \left( \frac{t}{t_{HB}} \right)^{m/v} \right\}$ $A_n/A_{rl} = (t/t_1)^m - 1$ $h_1/h_1 = (t/t_1)^m - 1$	Độ cứng của vật liệu mềm hơn và độ nhám của vật liệu cứng hơn được sử dụng cho tính toán.

Trong đó:  $A_n$  - Sự thay đổi diện tích tiếp xúc thực trong khoảng thời gian  $t_2 - t_1$ ;  $t_m$  - chiều dài tham khảo tương đối dọc theo đường trung bình;  $a_t$  - sự thay đổi tiếp xúc trong khoảng thời gian  $t_2 - t_1$ ;  $A_{rl}$  và  $a_1$  - lần lượt diện tích tiếp xúc thực ở thời điểm  $t_1$ .

**Bảng 2.22: Giá trị m cho các vật liệu khác nhau (P. D Netyagov)**

Vật liệu	T <sub>H</sub> <sup>*</sup>	HB	m	Vật liệu	T <sub>H</sub> <sup>*</sup>	HB	M
Sn	0,56	5,5	0,096	Ag	0,38	33,2	0,049
Cd	0,48	28,1	0,066		0,44	20,0	0,085
Pb	0,48	4,5	0,065		0,56	11,6	0,115
Zn	0,42	34,5	0,056				
Mg	0,32	34,8	0,026	BT1-1	0,14	101	0,021
Ag	0,24	66,0	0,014	ВАП-1Ф	-	118	0,0076
	0,35	37,5	0,031	Thép mác 20X13	0,17	280	0,0074
				Thép mác 35	-	257	0,0067

\* Nhiệt độ lưu biến, tỉ lệ với nhiệt độ khi thí nghiệm nấu chảy

### Thí dụ 2.8

Tính biến dạng tiếp xúc của hai chi tiết được làm từ thép T35 ( $v = 1,5$ ) ở nhiệt độ phòng, trong 24 giờ kể từ thời điểm đặt tải. Thời gian tác dụng lực  $t_1 = 1$  phút.

Từ bảng 2.22,  $m = 0,0067$ ; với hai mặt nhám  $v_{\Sigma} = v_1 + v_2 = 1,5 + 1,5 = 3$ ,  $t_2 = 24.3600 = 86400$  (s).

Thay thế các giá trị trên vào công thức trong bảng 2.21, ta có:

$$\frac{\Delta h_1}{h_1} = \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^{m/v} - 1 = \left( \frac{86400}{60} \right)^{0,0067/3} - 1 = 0,0163, \text{ tức là độ biến dạng chỉ tăng } 1,6\%.$$

## 2.5. PHƯƠNG PHÁP VÀ CÔNG CỤ NGHIÊN CỨU BỀ MẶT TIẾP XÚC

### 2.5.1. Đo diện tích tiếp xúc thực

Các phương pháp hiện đại nhất để xác định diện tích tiếp xúc thực có thể được chia thành 5 nhóm trong bảng 2.23.

- Nhóm I: Tính dẫn điện, nhiệt được tìm bằng công thức Holm. Điện trở tiếp xúc tổng cộng bằng tổng khả năng chống lại sự phân bố vật liệu, độc lập trên diện tích tiếp xúc đường bao và điện trở được xác định bằng diện tích và số vết tiếp xúc:

$$R = \frac{1}{2\lambda\rho_c} + \frac{1}{2\lambda\rho n_t}$$

Trong đó: R - điện trở;

$\lambda$  - điện dẫn suất của vật liệu,  $\rho_{db}$ ;

$\rho_t$  - các bán kính của các diện tích tiếp xúc đường bao và diện tích tiếp xúc thực;

$n_t$  - số vết tiếp xúc thực.

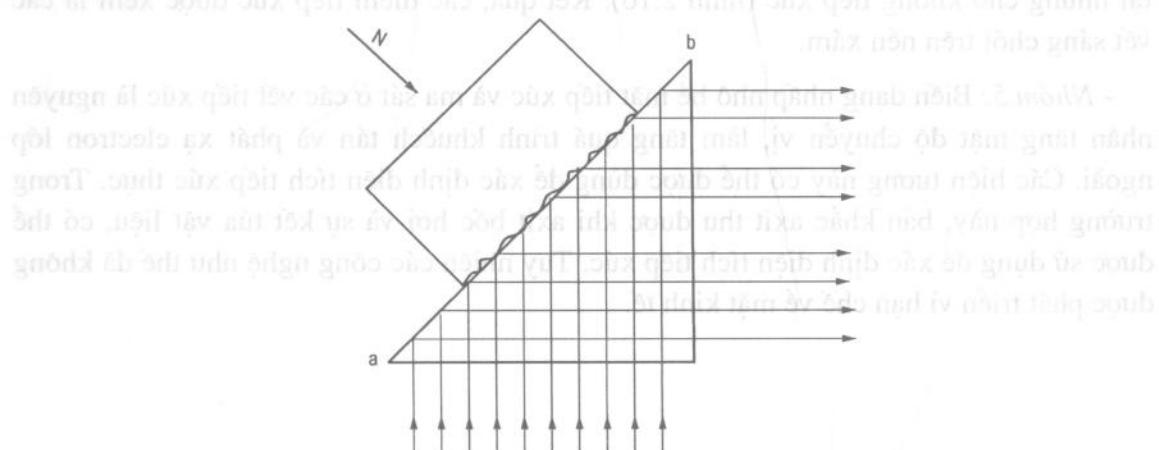
Bảng 2.23. Các phương pháp xác định diện tích tiếp xúc thực

Nhóm phương pháp	Phương pháp thu các thông tin	Ứng dụng	Ghi chú
1. Dựa trên cơ sở dẫn xuất tiếp xúc	Bằng tính dẫn điện	Các vật liệu trong tiếp xúc tĩnh và tiếp xúc trượt	Cần thiết để xác minh bằng các phương pháp khác
	Bằng tính dẫn nhiệt	Các vật liệu trong tiếp xúc tĩnh	
	Bằng siêu âm	Một số vật rắn trong tiếp xúc tĩnh và trượt	
2. Hình học	Bằng sự tiếp xúc bề mặt	Một số vật rắn trong tiếp xúc tĩnh và trượt, $R_a \geq 0,6\mu m$	
	Bằng dữ liệu thu được phần lõm xuống của bề mặt bởi một hình cầu có bán kính lớn	Một số vật rắn trong tiếp xúc tĩnh, $R_a \geq 0,6\mu m$	
3. Dựa trên cơ sở sử dụng các tấm film mỏng	Bằng sự gián đoạn tinh phát sáng trên film	Một số vật rắn trong tiếp xúc tĩnh tại, $R_a \geq 1,2\mu m$	Cần thiết để xác minh bằng các phương pháp khác
	Bằng sự gián đoạn các đồng vị phóng xạ thu được trên film	Một số vật rắn trong tiếp xúc tĩnh tại, $R_a \geq 1,16\mu m$	
	Bằng việc gián đoạn của các tấm film cacbon		
4. Quang học	Bằng nhiễu phản xạ toàn phần	Một trong các bề mặt là trong suốt, cứng và nhẵn (phẳng); tiếp xúc tĩnh và trượt, $R_a \geq 0,6\mu m$	
	Bằng thiểu số khuếch tán ở các vết tiếp xúc	Các bề mặt đều trong suốt; tiếp xúc tĩnh và trượt, $R_a \geq 1,2\mu m$	
	Bằng sự thay đổi hình giao thoa ở các vết tiếp xúc	Một trong các bề mặt là trong suốt, cứng, nhẵn (phẳng) và phủ một lớp film phản xạ; tiếp xúc tĩnh, $R_a \geq 1,2\mu m$	
5. Thay đổi tính chất lì - hoá trong diện tích tiếp xúc.	Bản khắc axít và sự lắng đọng vật liệu tại các vết tiếp xúc	Các bề mặt vật liệu trong tiếp xúc tĩnh.	Các phương pháp được phát triển không đầy đủ

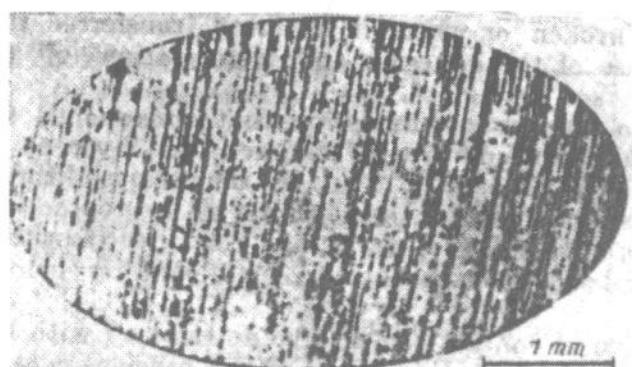
**Nhóm 2:** Phương pháp cơ bản dựa trên đo đặc sự tiếp xúc của các bề mặt trong quan hệ giữa diện tích tiếp xúc thực và tiếp xúc. Ở đây, đồ thị biên dạng của bề mặt nhám được ghi lại sau khi cho tiếp xúc với mặt nhăn. Những hình ảnh này là cơ sở để xác định các tham số của đường đặc tính bề mặt.

**Nhóm 3:** Đo diện tích tiếp xúc thực với việc sử dụng những tấm film mỏng được ứng dụng rộng rãi trong kỹ thuật thực hành. Trong trường hợp này, diện tích tiếp xúc thực có thể đánh giá độ nhám bề mặt bằng việc đo diện tích hoặc tính chất phát sáng của một vết thu được trên một tấm giấy cacbon đặt ở giữa các bề mặt tiếp xúc.

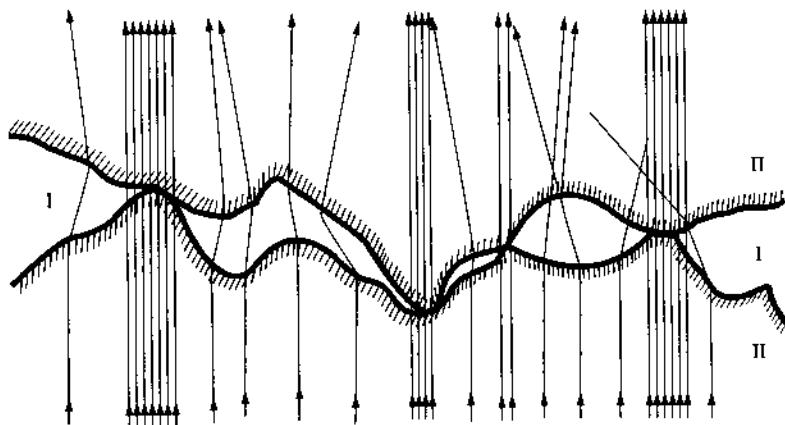
- **Nhóm 4:** Các phương pháp quang học cho việc đo diện tích tiếp xúc thực, cần phải kiểm tra hình ảnh của diện tích này thông qua một (hoặc cả 2) vật mẫu kiểm tra được làm từ vật liệu trong suốt. Liên quan tới các phương pháp này, cho một bề mặt nhám tiếp xúc với một lăng kính (hình 2.14), dẫn đến sự đảo lộn sự phản xạ toàn phần. Một chùm sáng song song hướng vào bề mặt tiếp xúc của lăng kính với một góc lớn hơn góc giới hạn. Sự phản xạ toàn phần bị lật úp tại các điểm tiếp xúc, và các điểm này được xác định là các vết tối trên nền sáng (hình 2.15). Phương pháp này được áp dụng cho việc xác định diện tích tiếp xúc thực giữa một mặt nhám và một mặt nhăn trong điều kiện chuyển động cũng như tĩnh tại.



**Hình 2.14:** Đo diện tích tiếp xúc thực theo nguyên lý quang học



**Hình 2.15:** Vết tiếp xúc thu được bằng phương pháp quang học



**Hình 2.16:** Xác định diện tích tiếp xúc thực bằng phương pháp truyền ánh sáng

Đo diện tích tiếp xúc thực của hai vật mẫu nhám trong suốt nhờ phương pháp quang quang học, là dựa trên cơ sở sự xuyên qua của một chùm sáng song song đi qua bề mặt chung. Khi các tia sáng qua các điểm tiếp xúc thì không có khúc xạ, ánh sáng biến mất tại những chỗ không tiếp xúc (hình 2.16). Kết quả, các điểm tiếp xúc được xem là các vết sáng chói trên nền xám.

- Nhóm 5: Biến dạng nhấp nhô bề mặt tiếp xúc và ma sát ở các vết tiếp xúc là nguyên nhân tăng mật độ chuyển vị, làm tăng quá trình khuếch tán và phát xạ electron lớp ngoài. Các hiện tượng này có thể được dùng để xác định diện tích tiếp xúc thực. Trong trường hợp này, bắn khắc axit thu được khi axit bốc hơi và sự kết tủa vật liệu, có thể được sử dụng để xác định diện tích tiếp xúc. Tuy nhiên các công nghệ như thế đã không được phát triển vì hạn chế về mặt kinh tế.

## Chương 3

# HỆ SỐ MA SÁT NGOẠI VÀ DỊCH CHUYỂN BAN ĐẦU

### 3.1. KHÁI NIỆM CHÍNH

- *Ma sát ngoại của các vật rắn* là một hiện tượng phức tạp, phụ thuộc các quá trình khác nhau, xảy ra trên diện tích tiếp xúc thực và trên các lớp bề mặt mỏng khi các vật thể có chuyển động tiếp tuyến tương đối. Lực ma sát  $F_{ms}$  được hiểu là lực cản trở di chuyển tương đối giữa các vật rắn, có hướng ngược với dịch chuyển này. Các lực ma sát ngoài phụ thuộc vào khoảng cách mà các vật rắn dịch chuyển.

- *Độ lớn của lực ma sát ngoại* được xác định một cách tổng quát bằng sự dịch chuyển của các vật rắn trên hướng tiếp tuyến; phụ thuộc vào sự dịch chuyển này, người ta phân biệt lực ma sát tĩnh ngoài: lực ma sát tĩnh ngoài riêng phần và lực ma sát trượt ngoài.

- *Lực ma sát tĩnh ngoài riêng phần* là lực cản trở trong chuyển động nhỏ, các di chuyển tiếp tuyến thuận nghịch riêng phần gọi là các di chuyển ban đầu, lực này xảy ra tại vùng ma sát chung nơi mà không có sự trượt xảy ra dưới tác dụng của lực toàn phần lên vật thể tiếp xúc. Lực ma sát tĩnh ngoài có giá trị của lực ma sát tĩnh ngoài riêng phần tương ứng với giá trị lớn nhất của dịch chuyển ban đầu.

- *Lực ma sát trượt ngoài* là cản trở chuyển động tiếp tuyến của các vật thể tiếp xúc, không phụ thuộc vào giá trị dịch chuyển.

- *Ma sát không bôi trơn* là ma sát giữa 2 vật rắn mà bề mặt chung của chúng tuyệt đối không có một loại chất bôi trơn. Tương tác của các vật thể này được gọi là *ma sát khô*.

- *Ma sát giới hạn* là ma sát giữa 2 vật rắn mà trên mặt chung của chúng có một lớp chất lỏng mà các tính chất của nó khác với các tính chất của chất bôi trơn.

- *Hệ số ma sát trượt* là tỉ số của lực ma sát trượt với thành phần pháp tuyến của các ngoại lực tác dụng lên bề mặt ma sát.

### 3.2. SỰ TƯƠNG TÁC CỦA CÁC VẬT RẮN

Lí thuyết cơ học phân tử trong ma sát được nhiều tác giả nghiên cứu dựa trên lí thuyết biến dạng - bám dính, lần đầu tiên được đưa ra do I. V. Kragelsky ở Nga năm 1939, và gần đây được dùng để giải thích cho tiếp xúc giữa các vật rắn. Chúng ta coi các điểm chính của lí thuyết cơ học - phân tử trong ma sát là các khái niệm cơ bản, hiện đại và tiếp xúc giữa các vật rắn.

Sự thâm nhập của các đinh nhấp nhỏ cứng vào bề mặt mềm hơn trong diện tích tiếp xúc thực giữa hai vật thể được giải thích cho cơ tính khác nhau của chúng, thay đổi các

tính chất này ở các phần khác nhau của vật thể, và sự khác nhau trong hình dáng cấu trúc của diện tích tiếp xúc.

Để giải thích cho lí do này, sự trượt trong quan hệ của một vật thể với vật thể khác sẽ tác động làm biến dạng lớp bề mặt mềm hơn bởi các nhấp nhô cứng hơn. Sự cản trở biến dạng của các lớp bề mặt trong sự trượt, được gọi là *tác động cơ học của lực ma sát*. Nó được tính toán dựa trên cơ sở cơ tính của các lớp bề mặt, cấu trúc hình học của các đỉnh nhấp nhô, và các điều kiện áp suất trong diện tích tiếp xúc, sử dụng các nguyên lý chính về cơ học vật rắn.

Cùng với biến dạng của các lớp bề mặt trong ma sát ngoài, tiếp xúc phân tử được tìm thấy ở các phần của các vật rắn tiếp xúc, được phân biệt bởi các khoảng cách nhỏ  $10^{-7}$  cm. Sự cản trở trượt tương đối trong kết quả của các tiếp xúc này, được gọi là *thành phần của lực ma sát phân tử*.

Nhờ có lớp màng mỏng của các bề mặt vật rắn, có chiều dày, cấu trúc phụ thuộc vào vùng bao quanh, nó có thể hiện tính thành phần của lực ma sát phân tử theo lí thuyết với các điều kiện thực tế. Trước kia thành phần này được tính toán là thành phần phân tử của hệ số ma sát ngoài, được lấy từ thực nghiệm và giá trị áp suất pháp tuyến trung bình trên vùng diện tích tiếp xúc thực. Đối với bề mặt được gia công lần cuối siêu nhẵn, nhấp nhô bề mặt từ cấp 13 và cao hơn, thành phần phân tử phải được xác định và coi như không có tương tác tiếp xúc.

Lực ma sát ngoài tổng cộng sẽ bằng tổng hai thành phần:

- Thành phần phân tử  $F_{mspt}$ .
- Thành phần cơ học  $F_{msch}$ .

$$F_{ms} = F_{mspt} + F_{msch} \quad (3.1)$$

Trong tính toán tiếp xúc giữa các vật rắn, phần cứng hơn sẽ thâm nhập vào phần mềm hơn, và sự biến dạng trước đó sẽ không còn quan trọng nữa, một trong các vật thể có thể được coi là cứng tuyệt đối, đến mức sự tiếp xúc của các vật thể được quan tâm. Tiếp xúc của một mặt nhám và một mặt nhẵn sẽ là rời rạc. Sự tác động qua lại của các vùng biến dạng riêng biệt có thể được bỏ qua khi tính toán tương tác tiếp xúc, sự tác động này là nhỏ trong các biến dạng dẻo với giá trị tương đối xấp xỉ  $\epsilon \approx 0,5$ .

**Thí dụ:** Một bán cầu trượt trên một mặt phẳng, biến dạng toàn phần xuất hiện trong quá trình là:

$$\frac{h}{r} \leq \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{2\tau_n}{\sigma_T} \right) \quad (3.2)$$

Quan hệ giữa chiều cao h tiếp xúc và áp suất đường bao  $p_{db}$ :

$$h = \frac{R_{max}}{b^{1/v}} \left( \frac{2p_{db}}{HB} \right)^{1/v} \quad (3.3)$$

Chúng ta sẽ thu được biểu thức sau cho giá trị lớn nhất của  $p_{db}$ , khi vượt quá, sẽ tăng lên làm hỏng các điều kiện ma sát ngoài:

$$p_{db} = \frac{HB}{2^{v+1} \Delta^v} \left( 1 - \frac{6\tau_n}{HB} \right)^v$$

Gia công tinh lần cuối, phổ biến nhất với  $b = 2, v = 2$  do đó:

$$p_{db} = \frac{0,125HB}{\Delta^2} \left( 1 - \frac{6\tau_n}{HB} \right)^2 \quad (3.4)$$

Đồ thị quan hệ giữa  $p_{db}$  và  $\frac{\tau_n}{HB}$ , theo công thức (3.4) chỉ ra rằng, áp suất tiếp tuyến là nguyên nhân gây ra tiếp xúc phân tử trong vùng diện tích tiếp xúc thực cơ bản, tác động đến  $p_{db}$ , xác định ngưỡng cho ma sát ngoài. Ở  $\tau_n = 0,4\sigma_T$ , ma sát ngoài trên bề mặt gia công thô lần cuối và phải kể đến áp suất viền  $\left( \frac{p_{db}}{HB} > 0,04 \right)$ . Khi  $\tau_n$  tiến tới  $\frac{\sigma_T}{2}$ , ngưỡng ma sát ngoài thay đổi theo hướng nhỏ hơn giá trị các vùng áp suất, và ma sát ngoài có thể chỉ là phương pháp gia công lần cuối tốt (cấp độ bóng 9 - 10, tải trọng nhỏ).

Áp suất tiếp tuyến  $\tau_n$  xuất hiện ở mặt tiếp xúc chung, vì tiếp xúc phân tử là một hàm của áp suất pháp tuyến:

$$\tau_n = \tau_o + \beta p_r \quad (3.5)$$

Các hằng số  $\tau_n$  và  $\tau_o$ , gọi là các tham số ma sát, phụ thuộc vào các điều kiện của kết cấu ma sát. Giả sử rằng ở bề mặt tiếp xúc của hai vật rắn luôn có một chất, gọi là vật thể thứ ba, kết hợp chặt chẽ với màng chất bôi trơn, oxit, hơi nước, chất khí và thấy rằng, dọc theo khối biến dạng các lớp bề mặt, ma sát ngoài bao gồm một lớp sên sệt như vật thể thứ ba, các biểu thức cho các tham số ma sát  $\tau_n$  và  $\beta$  có thể tính:

$$\tau_n = A(T)c_1 e^{\frac{\beta_1}{kT}} \quad (3.6)$$

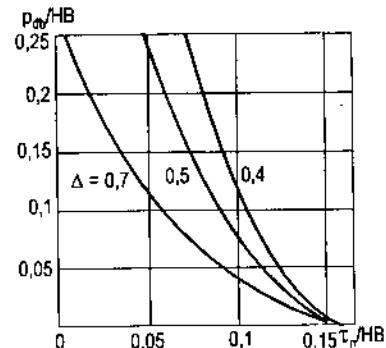
$$\beta = \frac{A(T)c_1 e^{\frac{\beta_1}{kT}}}{kT} \quad (3.7)$$

Trong đó:  $A(T)$  - hàm số của nhiệt độ;

$$c_1 = \frac{dv}{dz} - gradient tốc độ, \beta_1;$$

$\gamma$  - các hằng số ở nhiệt độ không đổi;

$k$  - hằng số Boltzman.



Hình 3.1: Tương quan  $p_{db}/HB$  và  $\tau_n/HB$

Tiếp xúc trượt của các vật rắn sẽ ảnh hưởng rõ ràng bởi loại biến dạng trong diện tích tiếp xúc và mật độ tiếp xúc. Biến dạng đàn hồi, đàn - dẻo, và dẻo có thể xảy ra trên các vùng diện tích tiếp xúc thực. Biến dạng đàn - dẻo là có khả năng xảy ra nhiều nhất. Tuy nhiên, trong một vài trường hợp, các tính toán có thể được giả sử rằng chỉ có biến dạng đàn hồi (ở áp suất đường bao  $p_{db} \leq 100\text{kG/cm}^2$  cho gia công tinh các bề mặt có cấp độ nhám cấp 10 hoặc cao hơn) hoặc biến dạng dẻo (ở áp suất đường bao  $p_{db} \leq 100\text{kG/cm}^2$  hoặc cho các bề mặt gia công tinh lẩn cuối, có cấp độ nhám đến cấp 8) xảy ra trong diện tích tiếp xúc. Tiếp xúc của các vật rắn trong trường hợp biến dạng đàn - dẻo thường không được hiểu rõ ràng. Chúng ta sẽ đưa ra, trước tiên là các công thức tính hệ số ma sát ngoài chỉ cho biến dạng đàn hồi và dẻo.

Tiếp xúc đàn hồi xảy ra ở chỗ áp suất lớn nhất ở đỉnh gỗ ghề đã thâm nhập sâu nhất, là nhỏ hơn độ cứng Brinell của thành phần mềm hơn trong cặp ma sát trượt, tương ứng với:

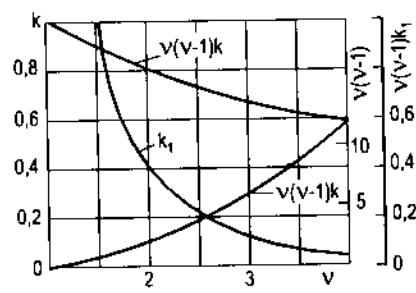
$$\frac{h}{r} = 2,4(1-\mu^2)^2 \left( \frac{HB}{E} \right)^2 \quad (3.8)$$

Và áp suất đường bao:

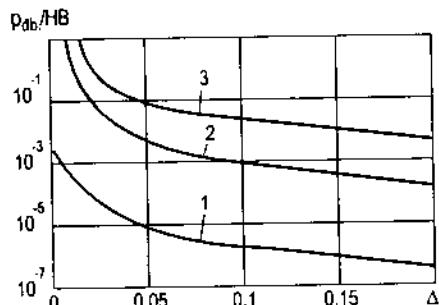
$$p_{db} \leq \frac{2,4 \frac{2v+1}{2} v(v-1)k_1 HB^{2v+1} (1-\mu^2)^{2v}}{5E^{2v} \Delta^v}$$

Trong đó  $k_1$  - hằng số tích phân phụ thuộc vào  $v$ .

Đồ thị chỉ ra  $k_1$  và  $k_1 v(v-1)$  là một hàm của  $v$ , được chỉ ra trên hình 3.2.



Hình 3.2: Sơ đồ minh họa sự phụ thuộc  $k_1$  và  $k_1 v(v-1)$  vào  $v$



Hình 3.3: Quan hệ giữa  $P_{db}$  và  $\Delta$

$$1 - \frac{HB}{E} = 0,01, \mu = 0,3; 2 - \frac{HB}{E} = 0,05 \\ \mu = 0,5; 3 - \frac{HB}{E} = 0,1, \mu = 0,01$$

Các giá trị thường được sử dụng nhất cho độ nhám bề mặt trong các chi tiết cơ khí  $v = 2, b = 2$ :

$$p_{db} = \frac{1,4}{\Delta^2} \cdot \frac{HB^5(1-\mu^2)^4}{E^4} \quad (3.9)$$

Sự thay đổi áp suất đường bao  $p_{db}$  là nguyên nhân quá độ từ biến dạng đàn hồi tới biến dạng đàn - dẻo như là một hàm của độ nhám bề mặt ở các tỉ số HB/E khác nhau, được mô tả trên hình 3.3. Với các vật liệu có môđun đàn hồi cao (Thí dụ như các kim loại), tiếp xúc đàn hồi ở lúc tác dụng tải ban đầu chỉ có thể cho các bề mặt được gia công tinh lân cuối tốt với  $\Delta \leq 0,005$ , nghĩa là đối với độ nhám bề mặt cấp 10 tới cấp 11. Với vật liệu polime, tiếp xúc đàn hồi có thể đáng kể với các giá trị  $p_{db}/HB$  và cấp độ nhám bề mặt thấp hơn so với kim loại.

Với các biến dạng đàn hồi trong diện tích tiếp xúc, thành phần cơ lực của ma sát ngoài xảy ra từ tiếp xúc đàn hồi không đầy đủ của vật rắn. Để giải thích cho lí do này, biến dạng lớp bề mặt của vật thể mềm hơn bằng sự thâm nhập các nhấp nhô, làm cản trở quá trình trượt tương đối, làm mất đặc tính trễ. Các công thức được đưa ra dưới đây để tính toán hệ số ma sát ngoài cho biến dạng đàn hồi trong diện tích tiếp xúc.

Tiếp xúc rạc xảy ra ở một số đỉnh tiếp xúc,  $n_r$  - nhỏ hơn số đỉnh trong diện tích tiếp xúc đường bao,  $n_{db}$ , tương ứng với áp suất đường bao.

$$p_{db} < p_{gh} = \frac{8 \cdot 10^{-2} \Delta^{1/2} E}{(b^{1/v} \cdot v)^{\frac{2v+1}{2v-1}} \cdot (1-\mu^2)} \quad (3.10)$$

hoặc, cho các bề mặt chi tiết có cấp độ nhám bình thường  $v = 2$ ,  $b = 2$ :

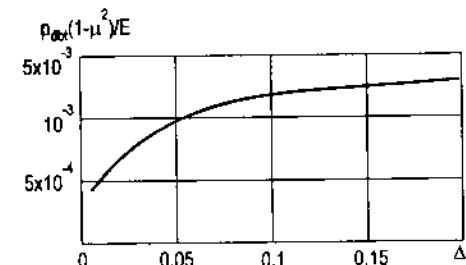
$$p_{gh} \geq 6 \cdot 10^{-3} \Delta^{1/2} \frac{E}{(1-\mu^2)} \quad (3.11)$$

Đồ thị quan hệ giữa  $\frac{p_{db_1}(1-\mu^2)}{E}$  được tính theo công thức (3.11), và tỉ số  $\Delta = \frac{R_{max}}{rb^{1/v}}$ ,

được biểu thị trên hình 3.4.

Thông thường, biến dạng đàn hồi trên diện tích tiếp xúc có thể dẫn đến tiếp xúc dày đặc chỉ trên vật liệu mềm hơn trong cấp ma sát trượt có môđun đàn hồi thấp. Với vật liệu có môđun đàn hồi cao, áp suất đường bao làm tiếp xúc dày đặc cao hơn áp suất đường bao tương ứng với trạng thái quá độ từ biến dạng đàn hồi đến biến dạng đàn - dẻo trên vùng tiếp xúc.

Hệ số ma tĩnh ngoài, là tỉ số giữa lực ma sát và tải trọng pháp tuyến, và bằng tổng hai thành phần ma sát cơ và phân tử:



Hình 3.4: Tương quan giữa  $\frac{p_{db} (1 - \mu^2)}{E}$  và  $\Delta$

$$\mu = \frac{2,4\tau_o(1-\mu^2)r^{1/2}}{v(v-1)k_1 Eh^{1/2}} + \beta + \frac{0,4\alpha_f h^{1/2}}{k_1 v(v^2-1)r^{1/2}} \quad (3.12)$$

Trong đó:  $\alpha_f$  - hệ số kể đến sự mất đặc tính trễ trong các điều kiện phức tạp;

$P_{dbl}$  - áp lực đường bao khi ma sát tĩnh.

Với một mặt hình cầu lõm,  $\alpha_f = 2,5\alpha_h$  trong đó  $\alpha_h$  - hệ số kể đến sự mất đặc tính trễ trong điều kiện ứng suất nén đơn giản. Giá trị của  $\alpha_h$  được đưa ra với các loại vật liệu khác nhau, trong bảng 3.1.

Bảng 3.1. Giá trị hệ số đặc tính trễ  $\alpha_h$

Vật liệu	$\alpha_h$	Vật liệu	$\alpha_h$
Đồng cứng	0,04	Cao su	0,09 - 0,13
Đồng, thiếc, phốtpho	0,04	Gỗ	0,2
Hợp kim Dura	0,03	Da:	
Thép tôi	0,02	Sóng	0,06
Chất dẻo	0,08 - 0,12	Súc vật	0,1

Các bề mặt được gia công lần cuối thông thường  $v = 2$ ,  $b = 2$ :

$$\mu = \frac{3\tau_o(1-\mu^2)r^{1/2}}{Eh^{1/2}} + \beta + 0,17\alpha_f \left(\frac{h}{r}\right)^{1/2} \quad (3.13)$$

Từ các công thức (3.12) và (3.13) cho ta thấy được thành phần trội hơn trong hệ số ma sát tổng, phụ thuộc điều kiện vận hành cặp ma sát trượt (các giá trị  $\tau_o$ ,  $\beta$  và chiều sâu tiếp xúc  $h$ ), trên các đặc tính nhấp nhô bề mặt  $r$  và  $v$ , và trên cơ tính của thành phần mềm hơn trong cặp ma sát trượt ( $E$  và  $\mu$ ). Biến dạng đàn hồi trong diện tích ma sát, thành phần cơ của hệ số ma sát ngoài có thể được bỏ qua, so với thành phần phân tử, các vật liệu với môđun đàn hồi cao và hệ số mất đặc tính trễ thấp, và các vật liệu có môđun đàn hồi thấp (đồng, chất dẻo) khi đó giá trị của thành phần phân tử lớn ( $u > 0,3$ ). Nếu các vật liệu trượt với môđun đàn hồi nhỏ, có hiệu quả như chất bôi trơn, thành phần cơ không thể bỏ qua; trong trường hợp này, Thí dụ, xảy ra khi cho cặp vật liệu đồng trượt tương đối nhau, mà chất bôi trơn là nước hoặc trong quá trình nửa tinh chế da thuộc. Cho lí do này, trong một cặp ma sát trượt, đòi hỏi hệ số ma sát ổn định, các điều kiện đặt ra để thành phần cơ chiếm ưu thế, đó là bôi trơn toàn phần phải được thực hiện.

Chú ý rằng, tiếp xúc kín giữa các bề mặt, thành phần của hệ số ma sát phân tử ngoài giảm, khi đó thành phần cơ sẽ tăng lên. Sự thay đổi của các thành phần chỉ ra rằng, chắc chắn ảnh hưởng của hệ số ma sát là nhỏ. Sử dụng khái niệm cực trị của một hàm toán học, chúng ta thu được tiếp xúc phù hợp với giá trị nhỏ nhất của hệ số ma sát:

$$\frac{h}{r} = \frac{6\tau_o(1-\mu^2)(v+1)}{E\alpha_f} \quad (3.14)$$

Áp suất đường bao dẫn đến tiếp xúc sẽ là:

$$p_{db} = \frac{0,2v(v-1)k_1}{\Delta^v} \cdot \left\{ \frac{6\tau_o(v+1)(1-\mu^2)^{\frac{2v+1}{2v-1}}}{\alpha_f E^{\frac{2v+1}{2v-1}}} \right\}^{\frac{2v+1}{2}} \quad (3.15)$$

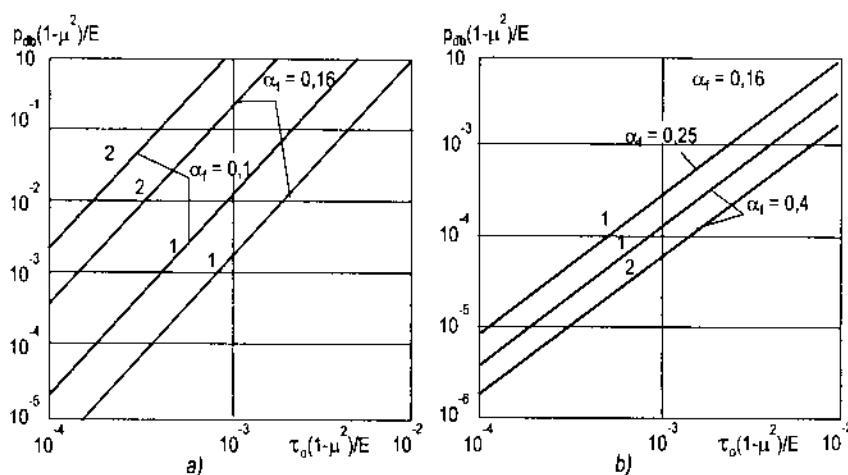
Với các giá trị tiêu biểu nhất của các bề mặt nhám:

$$p_{db} = \frac{2,2 \cdot 10^2}{\Delta^2} \cdot \left\{ \frac{\tau_o(1-\mu^2)^{3/5}}{\alpha_f E^{3/5}} \right\}^5 \quad (3.16)$$

Phân tích các công thức (3.15) và (3.16) cho ta thấy rằng hệ số ma sát ngoài nhỏ nhất với biến dạng đàn hồi trong diện tích tiếp xúc chỉ có thể xảy ra với vật liệu có môđun đàn hồi thấp. Với kim loại, thành phần cơ của hệ số ma sát ngoài, thông thường có thể bỏ qua. Trước kia, với sự tăng độ lớn giá trị thâm nhập, và do đó, áp suất đường bao hệ số ma sát ngoài tĩnh cho cặp ma sát trượt kim loại giảm trong tiếp xúc đàn hồi.

Quan hệ giữa  $\frac{p_{db}(1-\mu^2)}{E}$ , tương ứng với giá trị nhỏ nhất của hệ số ma sát ngoài tĩnh, với  $\frac{\tau_o(1-\mu^2)}{E}$  cho các giá trị khác nhau của  $\alpha_f$  và  $\frac{R_{max}}{rb^{1/v}}$  được mô tả trên hình 3.5a. VỚI bề mặt mịn hơn, giá trị áp suất cao hơn dẫn đường bao đến giá trị hệ số ma sát ngoài giảm  $p_{db}$  tương ứng với  $\mu_{min}$ . Tăng môđun đàn hồi hoặc hệ số mất đặc tính trễ làm giảm  $p_{db}$  tương ứng với  $\mu_{min}$ . Tăng môđun đàn hồi, tuy nhiên hầu hết làm ảnh hưởng sự tăng hệ số mất đặc tính trễ.

$$\mu_{min} = \frac{1,5\tau_o^{1/2}\alpha_f^{1/2}(1-\mu^2)^{1/2}}{E^{1/2}} + \beta \quad (3.17)$$



**Hình 3.5:** Tương quan giữa  $\frac{p_{db}(1-\mu^2)}{E}$  vào  $\mu_{min}$  và  $\frac{\tau_o(1-\mu^2)}{E}$

a) Tiếp xúc hàn; b) Tiếp xúc khô

Do đó, tiếp xúc đàn hồi dư để hệ số ma sát ngoài nhỏ nhất không phụ thuộc độ lớn áp lực pháp tuyến: Hệ số được xác định bằng các điều kiện vận hành cặp ma sát trượt ( $\tau_o$  và  $\beta$ ) và cơ tính của vật liệu thành phần cứng hơn trong cặp ma sát này.

Sự thay đổi giá trị nhỏ nhất hệ số ma sát ngoài với  $\frac{\tau_o(1-\mu^2)}{E}$  ở các giá trị khác nhau của hệ số mất đặc tính trễ, được chỉ ra trên hình 3.6. Hằng số ma sát  $\beta$  có hiệu lực trên giá trị hệ số ma sát nhỏ nhất (đáng kể).

Để đưa ra công thức thực tế cho hệ số ma sát ngoài tĩnh và cũng cho hệ số ma sát trượt với điều kiện: tốc độ trượt nhỏ đối với các tham số đưa vào công thức.

Tiếp xúc đàn hồi dây đặc xảy ra ở áp suất đường bao cao hơn, nhận được từ công thức (3.10), tức là, khi số đỉnh tham gia tiếp xúc bằng số đỉnh trong vùng diện tích đường bao. Với các điều kiện tiếp xúc thì tiếp xúc khép kín là nguyên nhân diện tích tiếp xúc lớn lên, phần lớn là do tăng số vết tiếp xúc, kết quả từ sự tăng dần các đỉnh trong diện tích tiếp xúc, và trở thành các vết tiếp xúc riêng biệt lớn hơn; trong tiếp xúc, dưới các điều kiện tiếp xúc dây đặc, diện tích tiếp xúc tăng chỉ là do tăng kích thước các vết tiếp xúc.

Hệ số ma sát tĩnh ngoài:

$$\mu = \frac{2,4\tau_o(1-\mu^2)v^{1/2}}{v[v\varepsilon - (v-1)\varepsilon_d]^{1/2}} + \frac{0,2\alpha_f}{v^{1/2}} \left( \frac{R_{max}}{r} \right)^{1/2} [v\varepsilon - (v-1)\varepsilon_d]^{1/2} \quad (3.18)$$

Trong đó:  $\varepsilon$  - tiếp xúc có hiệu lực ở thời điểm tất cả các đỉnh tham gia tiếp xúc.

Giá trị  $\varepsilon_d$  phụ thuộc các tham số đường đặc tính bề mặt, được tìm bởi công thức:

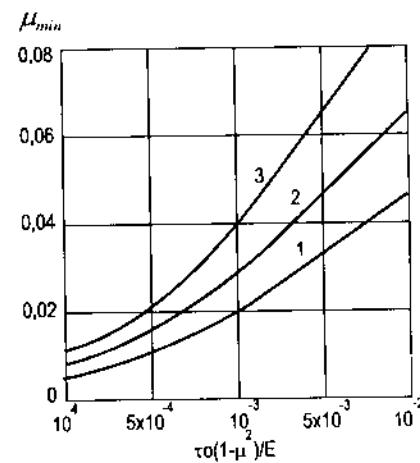
$$\varepsilon_d = \frac{1}{(bv)^{\frac{1}{v-1}}} \quad (3.19)$$

Trong diện tích tiếp xúc dày đặc, giá trị hệ số ma sát ngoài sẽ là nhỏ nhất với:

$$\frac{h_m}{r} = \frac{1,2\tau_o(1-\mu^2)}{\alpha_f E} \quad (3.20)$$

Trong đó:  $h_m$  - độ tiếp cận trung bình, được tính bằng:

$$h_m = \frac{R_{max}}{v} [v\varepsilon - (v-1)\varepsilon_d] \quad (3.21)$$



Hình 3.6: Tương quan của  $\mu_{min}$  và  $\frac{\tau_o}{E}$   
1 -  $\alpha_f = 0,1$ ; 2 -  $\alpha_f = 0,2$ ; 3 -  $\alpha_f = 0,4$

Áp suất đường bao tương ứng với hệ số ma sát tĩnh nhỏ nhất trong diện tích tiếp xúc đàn hồi dây đặc sẽ là:

$$P_{db} = \frac{0,25r}{v^{3/2} R_{max}} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{1/2} \left( \frac{\tau_o}{\alpha_v} \right)^{3/2} \quad (3.22)$$

Với các bề mặt có độ nhám thông thường, tức là với  $v = 2, b = 2$ :

$$P_{db} = 0,09 \frac{r}{R_{max}} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{1/2} \left( \frac{\tau_o}{\alpha_v} \right)^{3/2} \quad (3.23)$$

Công thức (3.15) và (3.23) dẫn tới kết quả tiếp xúc rải rác so sánh với tiếp xúc dày đặc, áp suất đường bao tương ứng với giá trị hệ số ma sát tĩnh ngoài nhỏ nhất, phụ thuộc nhiều hơn vào độ nhám bề mặt, các điều kiện vận hành và cơ tính của vật liệu mềm hơn trong cấp ma sát trượt. Quan hệ giữa áp suất đường bao tương ứng với hệ số ma sát nhỏ nhất, và  $\frac{\tau_o(1-\mu^2)}{E}$  với các giá trị khác nhau của  $\alpha$  trong tiếp xúc rời rạc, được chỉ ra trên hình 3.5b.

Trong tiếp xúc dày đặc, giá trị hệ số ma sát tĩnh sẽ là:

$$\mu_{min} = \frac{1,5\tau_o^{1/2}\alpha_f^{1/2}(1-\mu^2)^{1/2}}{E^{1/2}} + \beta \quad (3.24)$$

Theo đó, các giá trị hệ số ma sát tĩnh nhỏ nhất (theo công thức (3.17) và (3.24) trùng nhau với các giá trị giống nhau trong tiếp xúc dày đặc và rời rạc. Tiếp xúc dẻo xảy ra khi áp suất pháp tuyến trung bình trong diện tích tiếp xúc giữa bề mặt gỗ ghê đến các giá trị độ cứng Brinell làm vật liệu biến dạng. Điều kiện này sẽ đúng ở quá trình tiếp xúc:

$$\frac{h}{r} = 5,4(1-\mu^2)^2 \left( \frac{HB}{E} \right)^2 \quad (3.25)$$

Sử dụng công thức (3.25), chúng ta thu được độ lớn của áp suất đường bao dẫn đến tiếp xúc dẻo:

$$P_{db} \geq \frac{5,4^v}{2\Delta^v} \cdot \frac{HB^{2v+1}(1-\mu^2)^{2v}}{E^{2v}} \quad (3.26)$$

Cho các bề mặt gia công tinh được dùng rộng rãi trong kỹ thuật:

$$P_{db} \geq 14,5 \cdot \frac{1}{\Delta^2} \cdot \frac{HB^5(1-\mu^2)^4}{E^4} \quad (3.27)$$

Quan hệ giữa  $\frac{P_{db}}{HB}$  và  $\Delta$  ở các tỉ số  $\frac{HB(1-\mu^2)}{E}$  khác nhau, được đưa ra trên hình 3.7, cho ta thấy rằng tiếp xúc dẻo xảy ra ở áp suất đường bao tương đối thấp cho các bề mặt gia công cuối cùng có cấp độ nhám thô hơn cấp 8. Với các bề mặt có độ bóng tốt hơn, áp suất đường bao đưa ra dẫn đến biến dạng dẻo trong diện tích tiếp xúc tăng lên đáng kể, đến các giá trị lớn cho các bề mặt có độ nhám cấp 10 và cao hơn.

Vì chiều cao nhấp nhô khác nhau, một vài đỉnh nhấp nhô thâm nhập sâu hơn theo công thức (3.27), biến dạng vật liệu của cặp chi tiết dẻo; tính không phẳng mà quá trình thâm nhập có chiều sâu nhỏ hơn, được đưa ra bằng công thức (2.9) biến dạng vật liệu dẻo, và tính không đều của quá trình thâm nhập trong phạm vi.

$$2,4(1-\mu^2)^2 \left( \frac{HB}{E} \right)^2 \leq \frac{h}{r} \leq 5,4(1-\mu^2) \left( \frac{HB}{E} \right)^2 \quad (3.28)$$

biến dạng vật liệu đàn - dẻo. Do đó, không có khái niệm tiếp xúc dẻo xảy ra với các vật rắn xù xì. Tuy nhiên, trong tính toán với các bề mặt có cấp độ nhám thấp hơn cấp 9, biến dạng dẻo xảy ra trên mỗi chi tiết trong diện tích tiếp xúc, biến dạng của vật liệu đàn - dẻo trong tương tác giữa các vật rắn là vô nghĩa khi đem so sánh với biến dạng vật liệu dẻo. Phân tích để chỉ ra rằng (xem công thức 3.10 và 3.11), các bề mặt được gia công lần cuối đạt độ bóng cấp 10 làm việc bình thường trong phạm vi biến dạng đàn hồi và đàn dẻo, trong diện tích tiếp xúc. Trước kia, để tính toán xấp xỉ đầu tiên, nó được kết luận rằng: một trong các giá trị áp suất đường bao được xác định bằng các công thức (3.26) và (3.27) đã được nhắc đến với việc xảy ra tiếp xúc dẻo lí tưởng. Tiếp xúc trong biến dạng dẻo có thể là rời rạc hay dày đặc.

Tiếp xúc dẻo rời rạc xảy ra ở áp suất đường bao thoả mãn điều kiện sau:

$$\frac{14,5}{\Delta^2} \left\{ \frac{HB(1-\mu^2)}{E} \right\}^4 \leq \frac{P_{db}}{HB} \leq \frac{0,5}{(vB^{1/v})^{v-1}} \quad (3.29)$$

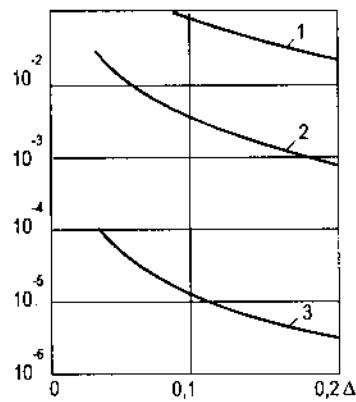
hoặc, cho các bề mặt có độ nhám phổ biến nhất:

$$\frac{14,5}{\Delta^2} \left\{ \frac{HB(1-\mu^2)}{E} \right\}^4 \leq \frac{P_{db}}{HB} \leq 0,062$$

trong khi tiếp xúc dẻo rời rạc, lực ma sát tĩnh ngoài bằng giá trị cản trở từ bề mặt của thành phần mềm hơn trong cặp ma sát trượt bằng việc thâm nhập các đỉnh nhấp nhô và hơn nữa, sự cản trở bắt nguồn từ tiếp xúc phân tử trong diện tích tiếp xúc thực.

Hệ số ma sát tĩnh ngoài khi biến dạng dẻo trong vùng tiếp xúc là:

$$\mu = \frac{\tau_o}{HB} + \beta + 0,55v(v-1)k_1 \left( \frac{h}{r} \right)^{1/2} \quad (3.30)$$



Hình 3.7: Tương quan giữa  $P_{db}$  và  $\Delta$

$$1 - \frac{HB}{E} = 0,1 ; \mu = 0,5;$$

$$2 - \frac{HB}{E} = 0,05;$$

$$\mu = 0,5 ; 3 - \frac{HB}{E} = 0,01 , \mu = 0,3$$

Đối với các bề mặt thông thường trong cơ khí:

$$\mu = \frac{\tau_o}{HB} + \beta + 0,44 \left( \frac{h}{r} \right)^{1/2} \quad (3.31)$$

Do đó, với biến dạng đàn hồi trong diện tích tiếp xúc, thành phần phân tử của hệ số ma sát ngoài không phụ thuộc vào quá trình tiếp xúc giữa các bề mặt của vật rắn. Thành phần cơ của hệ số ma sát sinh ra từ sự tiếp xúc.

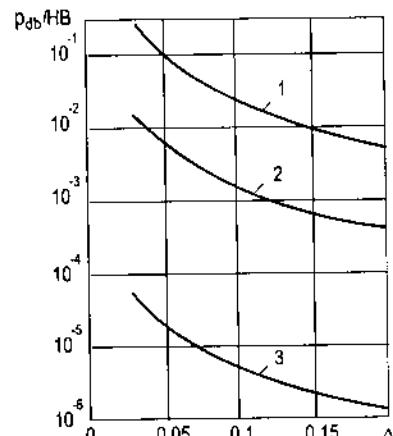
Trước kia, tổng hệ số ma sát tĩnh ngoài tăng lên cùng với sự thâm nhập trên diện tích tiếp xúc trong quá trình biến dạng dẻo.

Khi tiếp xúc thay đổi trên diện rộng, hệ số ma sát trải qua giá trị nhỏ nhất. Với vật liệu chỉ biến dạng đàn hồi, giá trị nhỏ nhất này phụ thuộc vào tỉ số của thành phần phân tử và thành phần cơ. Với vật liệu có cả biến dạng đàn hồi và dẻo, giá trị nhỏ nhất của hệ số ma sát là do quá trình chuyển tiếp các biến dạng đàn hồi trong diện tích tiếp xúc thành biến dạng đàn - dẻo và biến dạng dẻo hoàn toàn. Hầu hết các vật liệu, thành phần cơ của hệ số ma sát là nhỏ khi biến dạng đàn hồi trong vùng tiếp xúc, trong khi đó thành phần phân tử, cũng theo công thức đó, giảm với sự thâm nhập lớn hơn. Thành phần này vẫn không thay đổi trong khi biến dạng dẻo, ngược lại thành phần cơ lại lớn lên. Do đó, trong các phần diện tích tiếp xúc, chỗ biến dạng đàn - dẻo xảy ra, tức là, trong diện tích thâm nhập xác định bằng công thức (3.28), hệ số ma sát trải qua giá trị nhỏ nhất và lớn dần với sự gia tăng sự thâm nhập trên khắp diện tích biến dạng dẻo. Giá trị thâm nhập chính xác mà hệ số ma sát ở giá trị nhỏ nhất không thể tìm thấy, vì tiếp xúc của các vật rắn trong quá trình biến dạng dẻo xảy ra ở quá trình thâm nhập:

$$\frac{h}{r} = 3,9(1-\mu^2) \left( \frac{HB}{E} \right)^2 \quad (3.32)$$

Với bề mặt cỡ độ nhám được sử dụng thông dụng nhất trong khí cơ thông thường, áp suất đường bao tạo lên sự thâm nhập sẽ là:

$$\frac{p_{db}}{HB} = 7,5 \frac{1}{\Delta^2} \left\{ \frac{(1-\mu^2)HB}{E} \right\}^4 \quad (3.33)$$



Hình 3.8: Tương quan giữa  $\frac{p_{db}}{HB}$

$$J - \frac{p_{db}(1-\mu^2)}{E}; \mu = 0,5; \frac{HB}{E} = 0,05;$$

$$\mu = 0,5; 3 - \frac{HB}{E} = 0,01, \mu = 0,3$$

Hình 3.8 cho ta biểu đồ sự thay đổi tỉ số  $\frac{P_{db}}{HB}$  với  $\Delta$  ở các giá trị  $\frac{HB}{E}(1-\mu^2)$  khác nhau cho vật liệu biến dạng dẻo của thành phần mềm hơn trong cặp ma sát trượt ở giá trị hệ số ma sát nhỏ nhất.

Hệ số ma sát nhỏ nhất dưới các điều kiện này sẽ là:

$$\mu_{min} = \frac{\tau_o}{HB} + \beta + 0,9(1-\mu^2)^2 \left( \frac{HB}{E} \right)^2 \quad (3.34)$$

Từ công thức (3.34) cho ta thấy: với vật liệu cho chi tiết mềm hơn trong cặp ma sát trượt mà có módun đàn hồi cao, Thí dụ, với vật liệu có  $\frac{HB}{E} \approx 0,01$ , thành phần cơ trong hệ số ma sát nhỏ nhất có thể luôn luôn bị bỏ qua khi so với thành phần phân tử. Do đó, giá trị nhỏ nhất của hệ số ma sát trong quá trình thâm nhập được xác định bằng biểu thức (3.32), dưới các điều kiện này, là bằng giá trị thành phần phân tử của hệ số ma sát ngoài.

Trong một số ứng dụng khớp ma sát, nó là yếu tố cần thiết để biết sự thâm nhập và áp suất đường bao phù hợp, ở đó thành phần tử hệ số ma sát bằng thành phần cơ. Điều kiện này, theo thức công (3.31), trong quá trình thâm nhập:

$$\frac{h}{r} = 0,23\mu_{ml} \quad (3.35)$$

Tuy nhiên, giá trị thành phần phân tử của hệ số ma sát lớn nhất có thể khi tiếp xúc dẻo,  $\mu_{ml} = 0,2$ , sẽ bằng giá trị thành phần cơ ở tỉ số  $\frac{h}{r} \approx 0,046$ , tức là ở chiều sâu thâm nhập nhỏ.

Áp suất đường bao ở điều kiện này, được tính bằng công thức:

$$\frac{P_{db}}{HB} = \left\{ \frac{\mu_{ml}}{0,55v(v-1)k_1} \right\}^{2v} \cdot \frac{1}{\Delta^v} \quad (3.36)$$

Đối với các bề mặt gia công thông thường:

$$\frac{p_{db}}{HB} = \frac{2,8 \cdot 10^{-3} \mu_{ml}}{\Delta^2} \quad (3.37)$$

Công thức (3.37) cho thấy áp suất đường bao theo điều kiện  $\mu_{ml} = \mu_{ml/db}$  phụ thuộc rất nhiều vào độ nhám bề mặt, nó tăng lên khi nhấp nhô bề mặt giảm đi.

*Tiếp xúc dẻo dày đặc* xảy ra khi áp suất đường bao vượt quá các giá trị thu được từ công thức (3.29). Trên diện tích tiếp xúc dẻo dày đặc, hệ số ma sát tĩnh ngoài được đưa ra bằng công thức:

$$\mu = \frac{\tau_o}{HB} + \beta + \frac{0,54}{v^{1/2}} \left( \frac{h}{r} \right)^{1/2} \left\{ v - (v-1) \frac{h_d}{h} \right\}^{1/2} \quad (3.38)$$

Trong đó:  $h_d$  - chiều sâu tiếp xúc tương ứng với quá trình biến đổi từ tiếp xúc rời rạc sang dày đặc.

### 3.2.1. Các tác nhân ảnh hưởng đến hệ số ma sát tĩnh

Hệ số ma sát tĩnh ngoài là một hàm phức tạp của các điều kiện vận hành cặp ma sát trượt; nó phụ thuộc vào sự hiện diện hoặc không tồn tại bôi trơn màng mỏng, giá trị áp suất đường bao, cơ tính của vật liệu được sử dụng, độ nhám của bề mặt ma sát, áp suất đường bao xảy ra giữa các vật thể cọ xát phụ thuộc nhiều vào khớp ma sát được thiết kế. Vì vậy, thiết kế này cũng làm ảnh hưởng đến hệ số ma sát tĩnh ngoài.

#### 3.2.1.1. Áp suất đường bao

Áp suất đường bao trong khớp ma sát phụ thuộc nhiều vào tải trọng pháp tuyến tác dụng lên khớp. Một số tác giả của một số tài liệu cho rằng hệ số ma sát  $f$  giảm khi tải trọng pháp tuyến tăng, một số lại cho rằng ngược lại. Một vài nhà nghiên cứu cho rằng, thay đổi tải trọng tác động trên một rải rộng, hệ số ma sát sẽ thay đổi qua khoảng nhỏ nhất. Sự việc sau cùng là một luật tổng quát, và lần thứ nhất, thứ hai là các trường hợp riêng biệt.

Phụ thuộc vào khớp ma sát được thiết kế, các áp lực pháp tuyến giống nhau sẽ cho các áp suất đường bao khác nhau; để rõ hơn, ta phân tích sự thay đổi của hệ số ma sát tĩnh ngoài với áp lực pháp tuyến thích hợp, thực hiện bởi sử dụng áp suất đường bao, là tỉ số giữa áp lực pháp tuyến với diện tích tiếp xúc đường bao...

Theo lí thuyết cơ - phân tử trong ma sát, sự thay đổi hệ số ma sát tĩnh ngoài với áp suất đường bao được xác định bằng loại biến dạng trên các vết tiếp xúc thực.

*Tiếp xúc dẻo.* Thay thế vào công thức (3.12) giá trị tiếp xúc, ta thu được quan hệ giữa hệ số ma sát tĩnh ngoài và áp suất đường bao trên tiếp xúc dẻo rời rạc:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{2,4\tau_o}{p_{db}^{\frac{1}{2v+1}}} \left\{ \frac{1-\mu^2}{v(v-1)k_1 S^{1/2v} E} \right\}^{\frac{2v}{2v+1}} \cdot \frac{1}{\Delta^{\frac{v}{2v+1}}} \\ &\quad + \beta + \frac{0,4f}{v^2-1} \cdot \left\{ \frac{5_{db}(1-\mu^2)}{(k_1 v)^{2v+2} (v-1) E} \right\}^{\frac{1}{2v+1}} \cdot \Delta^{\frac{v}{2v+1}} \end{aligned} \quad (3.39)$$

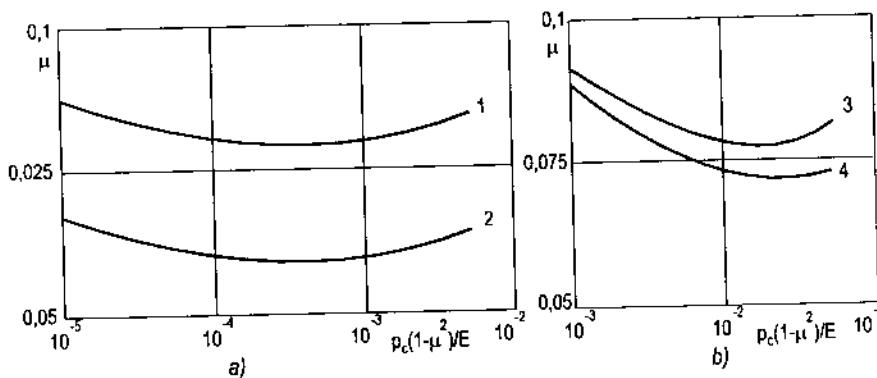
Cho các bề mặt được gia công thông thường:

$$\mu = \frac{2,1\tau_o}{P_{db}^{0,2}} \left\{ \frac{1-\mu^2}{E} \right\}^{0,8} \cdot \frac{1}{\Delta^{0,4}} + \beta + 0,24\alpha_f P_{db}^{0,2} \left\{ \frac{(1-\mu^2)}{E} \right\}^{0,2} \cdot \Delta^{0,4} \quad (3.40)$$

Nếu áp suất đường bao tăng lên trong quá trình tiếp xúc dẻo, thành phần phân tử của hệ số ma sát ngoài giảm và thành phần cơ sẽ tăng lên; do đó sự thay đổi hệ số ma sát tổng cộng trong trường hợp này phụ thuộc vào sự cân đối chung của các thành phần này.

Giá trị nhỏ nhất xảy ra ở áp suất đường bao được xác định bằng công thức (3.15). Sự thay đổi hệ số ma sát với áp suất đường bao ở  $\beta = 0,05$ ;  $\Delta = 0,5$ ;  $v = 2$ ;  $b = 2$  và  $\frac{\tau_0(1-\mu^2)}{E} = 10^{-3}$  được chỉ ra trên hình 3.9a và các công thức (3.39) và (3.40), cho ta

thấy rằng giá trị nhỏ nhất của hệ số ma sát chỉ có thể khi các giá trị  $\tau_0$  và  $\beta$  nhỏ, và các giá trị  $\alpha_f$  của thông số tổng hợp  $\Delta$  (xem hình 3.5) là đủ lớn, tức là, khi các giá trị các thành phần cơ - phân tử của hệ số ma sát là gần bằng nhau. Điều kiện này thoả mãn khi bôi trơn đầy đủ (toàn phần), thành phần mềm hơn trong cặp ma sát trượt đưa ra có môđun đàn hồi thấp (cho trường hợp, được làm từ cao su hoặc vật liệu dẻo), ngược lại thành phần cứng hơn có mặt nhám phù hợp. Nếu như thành phần mềm hơn có môđun đàn hồi cao, khi đó dải áp suất thấp hơn những giá trị được xác định bằng công thức (3.33) hệ số ma sát sẽ giảm. Khi đó áp suất đường bao vượt quá các giá trị này, sự tăng hệ số ma sát có thể trông mong vào quá trình tiếp xúc đàn - dẻo và dẻo. Với việc tăng áp suất tiếp xúc, giá trị nhỏ nhất của hệ số ma sát thay đổi về hướng gốc của hệ toạ độ. Trong vùng tiếp xúc rái rác, tuy nhiên không có sự thay đổi rõ ràng trong hệ số ma sát và áp suất đường bao xảy ra.



**Hình 3.9: Tương quan  $\mu$  và  $p_{db}$**

a) Tiếp xúc đàn hồi; b) Tiếp xúc nhẵn phẳng

1 -  $\alpha_f = 0,4$ ; 2 -  $\alpha_f = 0,25$ ; 3 -  $\beta = 0,05$ ; 4 -  $\beta = 0,03$

Trong khi tiếp xúc đàn hồi dày đặc, hệ số ma sát tĩnh ngoài, theo công thức (3.18), thay đổi với áp suất đường bao theo quan hệ sau:

$$\mu = \frac{1,4\tau_0(1-\mu^2)^{2/3}}{E^{2/3}P_{db}^{1/3}} \left( \frac{r}{R_{max}} \right)^{1/3} + \beta + \frac{0,35\alpha_f P_{db}^{1/3} (1-\mu^2)^{1/3}}{E^{1/3}} \left( \frac{R_{max}}{r} \right)^{1/3} \quad (3.41)$$

Hệ số ma sát như một hàm của tỉ số giữa áp suất đường bao với môđun đàn hồi được đưa ra bằng đồ thị hình 3.9b. Các tính toán  $\beta = 0,05$ ;  $\beta = 0,03$ ;  $\alpha_f = 0,4$ ;  $\Delta = 0,05$  và  $\frac{\tau_0(1-\mu^2)}{E} = 10^{-3}$ . Trong tiếp xúc đàn hồi dày đặc, hệ số ma sát tĩnh ngoài thay đổi cùng với áp suất đường bao mạnh mẽ hơn khi xảy ra tiếp xúc dẻo rời rạc (hình 3.9). Trường hợp tổng quát, hệ số ma sát tĩnh ngoài trong tiếp xúc dẻo dày đặc sẽ chuyển qua giá trị nhỏ nhất khi áp suất đường bao tăng.

Áp suất đường bao phù hợp với giá trị nhỏ nhất của hệ số ma sát được tìm bởi công thức (3.22). Giá trị hệ số ma sát nhỏ nhất trong tiếp xúc dẻo dày đặc chỉ riêng đối với vật liệu có môđun đàn hồi thấp. Với vật liệu có môđun đàn hồi cao (kim loại) trạng thái tiếp xúc đàn hồi dày đặc khi biến dạng đàn hồi là không thể với tới được (xảy ra).

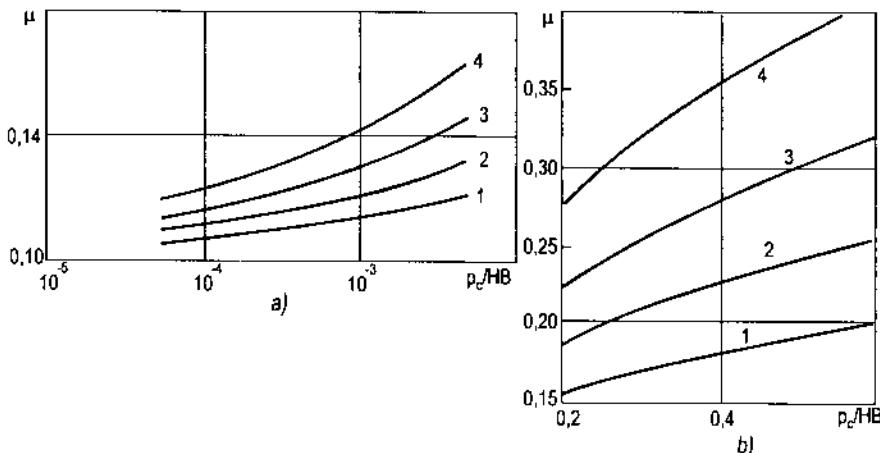
Tiếp xúc dẻo rời rạc xảy ra với áp suất đường bao đã xác định bằng công thức (3.29). Thành phần phân tử của hệ số ma sát trong điều kiện tiếp xúc dẻo không phụ thuộc vào áp suất đường bao. Thành phần cơ, theo công thức (3.30), tăng lên với sự tăng áp suất đường bao. Hệ số ma sát tổng thay đổi với áp suất đường bao theo biểu thức sau:

$$\mu = \frac{\tau_n}{HB} + 0,55v(v-1)k_1\Delta^{1/2} \left( \frac{2p_{db}}{HB} \right)^{1/2v} \quad (3.42)$$

hoặc, với các bề mặt được gia công lần cuối thông thường:

$$\mu = \frac{\tau_n}{HB} + 0,44\Delta^{1/2} \left( \frac{2p_{db}}{HB} \right)^{1/4} \quad (3.43)$$

Trong tiếp xúc dẻo rời rạc, hệ số ma sát tăng lên nhưng nhỏ so với áp suất đường bao. Đồ thị cho biết quan hệ giữa hệ số ma sát và áp suất đường bao được đưa ra trên hình 3.10a.



**Hình 3.10: Tương quan  $\mu$  và  $p_{db}$**

a) Khi độ nhám thấp; b) Khi độ nhám cao

1-  $\Delta = 0,02$ ; 2 -  $\Delta = 0,05$ ; 3 -  $\Delta = 0,1$ ; 4 -  $\Delta = 0,02$

Nó được trình bày từ công thức (3.43) cho các bề mặt có các giá trị độ nhám nhỏ hơn, hệ số ma sát trong các điều kiện giống nhau thay đổi với áp suất đường bao là kém mạnh mẽ. Thông thường, v có quan hệ nghịch đảo với độ nhám bề mặt; do đó, hệ số ma sát thay đổi thường kém mạnh mẽ so với áp suất đường bao.

Tiếp xúc dẻo dày đặc xảy ra ở áp suất:

$$\frac{P_{db}}{HB} \leq \frac{0,5}{(vb^{1/v})^{\frac{v}{v-1}}} \quad (3.44)$$

Như với tiếp xúc dày đặc, sự thay đổi hệ số ma sát ngoài là do thành phần cơ. Quan hệ sau giữa hệ số ma sát và áp suất đường bao có thể nhận được từ công thức (3.38)

$$\mu = \frac{\tau_n}{HB} + 0,76 \left( \frac{R_{max}}{r} \right)^{1/2} \left( \frac{P_{db}}{HB} \right)^{1/2} \quad (3.45)$$

So sánh giữa các biểu thức (3.43) và (3.45) cho thấy rằng: hệ số ma sát thay đổi nhạy hơn áp suất đường bao trong tiếp xúc dẻo dày đặc so với tiếp xúc rời rạc. Hệ số ma sát coi như là một hàm của áp suất đường bao được đưa ra trên đồ thị hình 3.10b. Như đã trình bày, trong quá trình tiếp xúc đòn hồi của các thành phần cọ xát, trong đó thành phần mềm hơn có môđun đòn hồi thấp, hệ số ma sát thông thường chuyển qua giá trị nhỏ nhất với việc áp suất đường bao tăng. Một quan hệ tương tự thường xảy ra với thành phần tiếp xúc mềm hơn được làm từ kim loại. Trong các điều kiện này, hệ số ma sát giảm bởi vì thành phần phân tử của nó giảm trong tiếp xúc đòn hồi và tăng là do thành phần cơ trong tiếp xúc dẻo. Do đó, trong ma sát ngoài của các vật rắn, luật tổng quát bao trùm sự thay đổi hệ số ma sát là vì chuyển qua giá trị nhỏ nhất sau hơn với sự tăng áp suất đường bao. Các điều kiện mà hệ số ma sát ngoài tăng lên hoặc giảm đi được xác định phụ thuộc vào các tham số khi thực hiện cặp ma sát trượt.

Như vậy, mâu thuẫn giữa các tác giả khác nhau trong việc giải thích quan hệ giữa hệ số ma sát và tải trọng pháp tuyến được giải quyết bằng lí thuyết cơ - phân tử của ma sát ngoài dựa trên cơ sở tương tác giữa các vật rắn khi biến dạng của các loại khác nhau trong các diện tích tiếp xúc thực.

### 3.1.2.2. Nhấp nhô bề mặt (độ nhám bề mặt)

Khác với độ cứng của vật rắn trong tiếp xúc tăng lên trong quá trình thẩm nhập của mặt thô cứng hơn vào bề mặt vật thể mềm hơn. Biến dạng của vật thể cứng hơn, về căn bản là nhỏ hơn vật thể mềm hơn và có thể được bỏ qua. Độ nhám bề mặt của vật thể cứng hơn, trước kia, được đưa vào tính toán ảnh hưởng của độ nhám trong tương tác của các vật rắn.

Điều khác biệt được tạo ra giữa độ nhám đầu tiên và độ nhám được phát triển sau đó, hoặc độ nhám có trạng thái ổn định. Độ nhám đầu tiên được hiểu là độ nhám bề mặt vật rắn, thu được việc gia công cơ. Trạng thái độ nhám ổn định phát triển trên các bề mặt của các thành phần tiếp xúc cũng như khả năng chống trượt lên mỗi thành phần; nó phụ

thuộc điều kiện vận hành khớp ma sát. Xét riêng kỹ thuật tạo thành trạng thái ổn định độ nhám, cho phép ta tính toán dựa trên cơ sở mối quan hệ giữa hệ số ma sát và hình học bề mặt.

Nó có thể được nhấn mạnh rằng kết quả phân bố vật liệu qua lớp bề mặt của các vật rắn trên hệ số ma sát ngoài là một loại rất phức tạp. Phân bố vật liệu trên lớp bề mặt được đánh giá bằng phân bố chiều cao nhấp nhô (đặc tính bề mặt, các tham số b và v) và bằng kích thước tuyệt đối của các tham số nhấp nhô (các tham số  $R_{max}$ ,  $r$ ,  $R_Z$ , và các tham số khác). Quan hệ lí thuyết chặt chẽ giữa các thông số của đường đặc tính lớp bề mặt và các tham số  $R_{max}$  và  $r$  chưa thu được. Vì chúng thay đổi bình thường đối với một dải đủ lớn các phương pháp gia công tinh bề mặt, các tham số b và v có thể được thừa nhận là không thay đổi trong đánh giá sự thay đổi hệ số ma sát với độ nhám bề mặt.

Nó được đưa ra mới đây để đánh giá độ nhám bề mặt bằng tham số tổng hợp  $\Delta$ , nó được coi là mô tả hình học bề mặt thoả đáng hơn (Chương 2).

Sự thay đổi hệ số ma sát với hình học bề mặt bị ảnh hưởng lớn bởi đặc điểm biến dạng trong các vùng diện tích tiếp xúc thực. Cho phép ta hiểu kĩ hơn về quan hệ giữa hệ số ma sát và độ nhám bề mặt cho các loại tiếp xúc đàn hồi và dẻo.

*Tiếp xúc đàn hồi.* Trong tiếp xúc đàn hồi rời rạc, hệ số ma sát được tính toán bằng công thức (3.39) hoặc tính xấp xỉ bằng công thức (3.40). Công thức (3.39) có thể được viết dưới dạng:

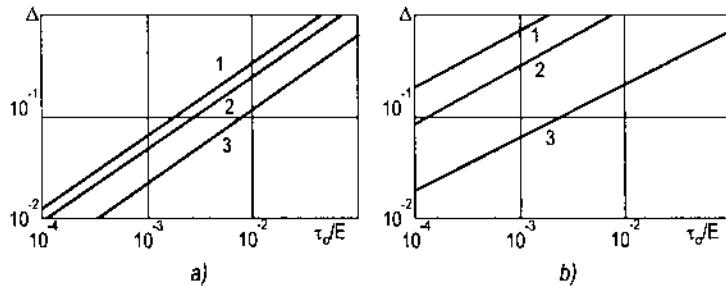
$$\mu = \frac{A'}{\Delta^{\frac{v}{2v+1}}} + \beta + B' \Delta^{\frac{v}{2v+1}} \quad (3.46)$$

Rõ ràng từ công thức (3.46), khi tăng tham số tổng hợp, thành phần phân tử giảm, và thành phần cơ tăng lên. Vì thế, việc tăng tham số tổng hợp có thể là nguyên nhân hệ số ma sát, phụ thuộc vào tỉ số các thành phần, tăng lên hoặc giảm đi, hoặc khác thế, trong trường hợp tổng quát, nó qua giá trị nhỏ nhất. Các tính toán cho thấy rằng, giá trị tham số tổng hợp phù hợp với giá trị nhỏ nhất của hệ số ma sát, được tính bằng:

$$\Delta = \frac{15\tau_0^{5/4}(1-\mu^2)^{3/4}}{P_{db}^{t/2} E^{3/4} \alpha_f^{5/4}} \quad (3.47)$$

Độ nhám bề mặt phù hợp với giá trị nhỏ nhất của hệ số ma sát được xem là điều kiện tốt nhất.

Giá trị tham số tổng hợp phù hợp để có hệ số ma sát nhỏ nhất bị ảnh hưởng cơ bản bởi các đặc trưng xác định điều kiện vận hành khớp ma sát ( $P_{db}, \tau_0$ ) và cơ tính của thành phần mềm hơn ( $\alpha_f, E, \mu$ ). Sự thay đổi tham số tổng hợp, làm hệ số ma sát nhỏ nhất, với tỉ số  $\frac{\tau_0(1-\mu^2)}{E}$  ở áp suất đường bao  $P_{db}$  khác nhau, được chỉ ra trên hình 3.11.



**Hình 3.11: Tương quan  $\Delta$  và  $\frac{\tau_o}{E}$**

a) Độ nhám cao; b) Độ nhám thấp

$$1 - \frac{\tau_o}{P_{db}} = 0,1; 2 - \frac{\tau_o}{P_{db}} = 0,05; 3 - \frac{\tau_o}{P_{db}} = 0,01$$

Thay thế giá trị tham số tổng hợp vào công thức (3.39), chúng ta thu được hệ số ma sát nhỏ nhất dưới các điều kiện vận hành không đổi của khớp ma sát và hiệu quả cho độ nhám bề mặt tốt nhất của thành phần cứng hơn.

$$\mu = 1,5 \left\{ \frac{\tau_o \alpha_f (1 - \mu^2)}{E} \right\}^{1/2} + \beta \quad (3.48)$$

Chú ý rằng, các biểu thức nhận được là đúng ở điều kiện áp suất đường bao nhỏ hơn các giá trị xác định bằng công thức (3.22).

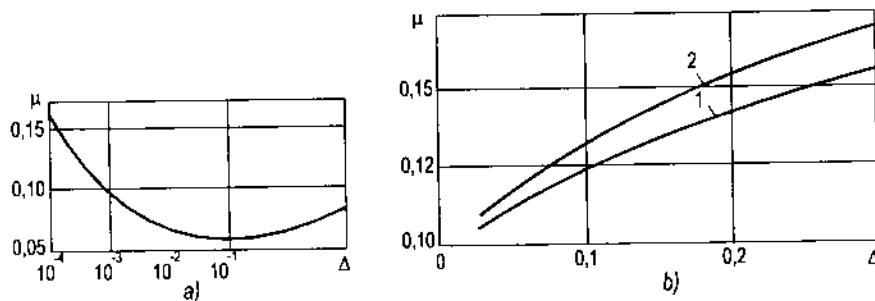
Giá trị hệ số ma sát ngoài nhỏ nhất này trùng khớp với  $\mu_{min}$  xác định bằng tải trọng. Tuy nhiên,  $\mu_{min}$  đối với khớp ma sát thì không phụ thuộc vào cả tải trọng và độ nhám bề mặt và được xác định bằng vật liệu các thành phần và điều kiện trượt. Trong quá trình tiếp xúc dẻo đặc, hệ số ma sát, như từ công thức (3.48), phụ thuộc vào tỉ số  $\frac{R_{max}}{R}$ , thành phần phân tử giảm và thành phần cơ tăng với cùng tỉ lệ. Trong trường hợp tiếp xúc rời rạc, quan hệ đó dẫn đến tăng chiều sâu lớp biến dạng bề mặt ở một giá trị áp suất đường bao không đổi. Tham số  $\Delta$ , tìm được tương tự cho tiếp xúc rời rạc, được tính bằng công thức:

$$\Delta = \frac{15 \tau_o^{3/2} (1 - \mu)^{1/2}}{E^{1/2} p_{db} \alpha_f^{3/2}} \quad (3.49)$$

Hình 3.11b đưa ra các giá trị khác nhau của  $\Delta$ , phù hợp với giá trị hệ số ma sát nhỏ nhất, ứng với  $\frac{\tau_o}{E}$ . Các tính toán được thực hiện với  $\mu = 0,5$ ;  $\alpha_f = 0,4$ ;  $b = 2$ ;

$v = 2$ . Hệ số ma sát ở điều kiện độ nhám bề mặt tốt nhất trong tiếp xúc đòn hồi dàn đặc trưng với giá trị hệ số ma sát nhỏ nhất đã xác định như một hàm của áp suất đường bao và chiều sâu thâm nhập. Sự thay đổi hệ số ma sát với độ nhám bề mặt được chỉ ra trên hình 3.12a. Các tính toán được xuất phát từ công thức (3.40) với các giá trị:

$$\frac{\tau_0}{E} = 5 \cdot 10^{-4}; \frac{P_{db}}{E} = 10^{-3}; \alpha_f = 0,25; \mu = 0,5; \beta = 0,05.$$



**Hình 3.12a: Tương quan  $\mu$  và  $\Delta$**

a) Tiếp xúc đòn hồi; b) Tiếp xúc dẻo

$$1 - \frac{P_{db}}{E} = 10^{-1}; 2 - \frac{P_{db}}{HB} = 10^{-2}$$

Cần nhớ các công thức (3.48) và (3.49) đúng khi thành phần mềm hơn có môđun đòn hồi nhỏ. Nếu thành phần này được làm từ vật liệu có môđun đòn hồi cao, khi đó hệ số ma sát sẽ giảm cùng với độ nhám. Với các bề mặt được gia công lần cuối có độ nhám rất nhỏ ( $R_z < 0,2\mu$ ), tuy nhiên, hệ số ma sát có thể tăng lên, vì diện tích phần tương tác của các vật rắn làm tương tác phân tử về căn bản sẽ vượt quá diện tích tiếp xúc thực.

*Tiếp xúc dẻo rời rạc.* Trong quá trình biến dạng dẻo trong diện tích tiếp xúc thực, thành phần phân tử của hệ số ma sát ngoài không phụ thuộc vào vị trí bề mặt. Thành phần cơ, theo công thức (3.42), lớn lên cùng với tham số tổng hợp  $\Delta$ . Do đó, trong quá trình tiếp xúc dẻo rời rạc, hệ số ma sát tăng lên cùng với độ nhám bề mặt. Quan hệ giữa hệ số ma sát với tham số tổng hợp  $\Delta$  ở các giá trị  $p_{db}$  khác nhau được minh họa trên hình 3.12b. Các tính toán được thực hiện bằng công thức (3.43) ở  $\mu_m = 0,08$ . Trong khoảng dải áp suất đường bao gần với các giá trị xác định bằng công thức (3.33) cho các vật liệu có môđun đòn hồi cao, hệ số ma sát có thể trải qua giá trị nhỏ nhất nếu tham số tổng hợp thay đổi đáng kể. Giá trị nhỏ nhất này là kết quả của quá trình chuyển từ biến dạng đòn hồi sang đòn - dẻo và dẻo hoàn toàn với sự tăng độ nhám bề mặt. Các quan hệ đã nói nhận được với giả thiết bỏ qua ảnh hưởng của độ nhám trên cơ sở hằng số ma sát  $\tau_0$  và  $\beta$  của bề mặt là xấp xỉ. Tuy nhiên người ta đã giải thích bằng kết quả của nhiều thí nghiệm. Do đó, người ta có thể sử dụng cho tính toán hệ số ma sát như một hàm của độ nhám bề mặt đủ chính xác.

### 3.2.2. Tính chất cơ học của các vật liệu tiếp xúc

Các lớp bề mặt của thành phần mềm hơn trong một cặp ma sát trượt bị biến dạng nhiều hơn so với thành phần cứng hơn; để giải thích cho lí do này, thành phần mềm hơn được cho rằng để xác định hệ số ma sát ngoài. Sự phụ thuộc này là rất phức tạp: cơ tính của thành phần mềm hơn có thể bị thay đổi hoặc thay thế hoặc xử lý đặc biệt (gia cường, tôi cứng, hoặc các phương pháp tương tự) với vật liệu của nó, có thể thấy được sẽ ảnh hưởng đến các tham số ma sát  $\tau_o$  và  $\beta$ . Quan hệ giữa các tham số này và cơ tính của các vật liệu khác nhau cũng không rõ ràng. Trong vài trường hợp, (Thí dụ các điều kiện bôi trơn giới hạn), sự thay đổi cơ tính của thành phần mềm hơn không ảnh hưởng rõ rệt đến các tham số này, và người ta có thể xem như là hằng số. Cho lí do này, quan hệ giữa hệ số ma sát và cơ tính của thành phần mềm hơn trong cặp ma sát trượt sẽ được coi như điều kiện tiếp xúc đàn hồi và dẻo ở điều kiện các tham số ma sát ( $\tau_o$  và  $\beta$ ), áp suất đường bao và độ nhám bề mặt không thay đổi.

*Tiếp xúc đàn hồi rời rạc* Đặc trưng đem so sánh là môđun đàn hồi. Thành phần phân tử của hệ số ma sát cho các bề mặt được gia công lần cuối thường giảm với sự tăng môđun đàn hồi. Dải thay đổi của  $f_{ml}$  phụ thuộc vào giá trị tham số ma sát  $\beta$ .

$$\mu_{ml} = \frac{2,1\tau_o}{P_{db}^{0,2}\Delta^{0,4}} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{0,8} + \beta \quad (3.50)$$

Nếu  $\beta$  nhỏ so với thành phần đầu tiên trong công thức (3.50), thì thành phần phân tử sẽ thay đổi nghịch đảo với  $E^{0,8}$ .

$$\text{Nếu } \beta >> \frac{2,1\tau_o}{P_{db}^{0,2}\Delta^{0,4}} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{0,8} \quad (3.51)$$

thì thành phần phân tử của hệ số ma sát thực tế không thay đổi với  $E$ .

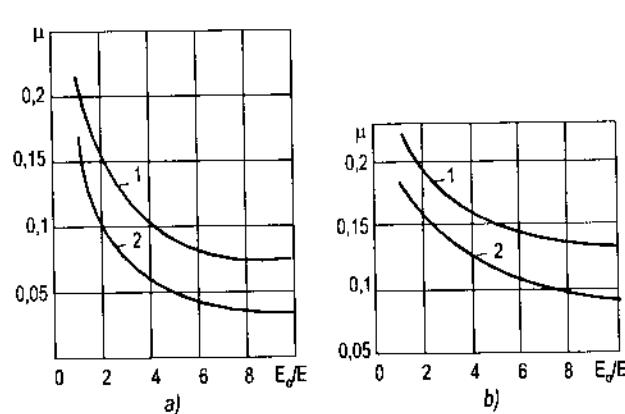
Sự giảm thành phần phân tử với giá trị  $E$  lớn hơn được phát triển theo áp suất pháp tuyến trên vết tiếp xúc, kết quả từ việc giảm diện tích tiếp xúc. Sự thu nhỏ diện tích này với chỉ có môđun đàn hồi cao để giảm sự thâm nhập, và vì vậy giảm thành phần cơ của hệ số ma sát (hệ số mất đặc tính trễ còn lại không có hiệu lực).

$$\mu_{ml} = 0,2\alpha_f P_{db}^{0,2} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{0,2} \cdot \frac{1}{\Delta^{0,4}} \quad (3.52)$$

Với việc tăng giá trị môđun đàn hồi, hệ số mất đặc tính trễ thường giảm. Với lí do này thành phần cơ của hệ số ma sát sẽ rất dễ ảnh hưởng đến sự thay đổi môđun đàn hồi của thành phần mềm hơn, hệ số ma sát ngoài giảm bằng sự tiêu hao (giảm) cả hai thành phần cơ và phân tử. Sự giảm này trong hệ số  $f$  như một hàm của môđun đàn hồi được thu được bằng thực nghiệm.

*Tiếp xúc đàn hồi dày đặc.* Quan hệ tương tự ta nhận được ở điều kiện tiếp xúc đàn hồi dày đặc (3.41). Hàm số  $\mu = \psi(E)$  cho điều kiện tiếp xúc rời rạc và dày đặc với các giá trị

$\beta$  thay đổi, được vẽ trên đồ thị hình 3.13. Các tính toán với các giá trị không đổi:  $\frac{\tau_o}{E} = 2 \cdot 10^{-2}$ ;  $\frac{P_{db}}{E_o} = 0,02$ ;  $\Delta = 0,12$ ;  $\mu = 0,5$ ;  $\alpha = 0,3$ . Tỉ số  $E/E_o$  trong đó  $E_o$  là môđun đàn hồi tham khảo, được vẽ trên hệ toạ độ Đề các.



Hình 3.13: Tương quan  $\mu$  và  $E_o/E$

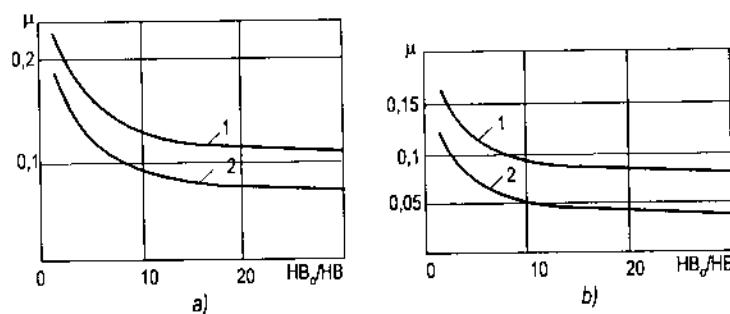
a) Khi độ nhám cao; b) Khi độ nhám thấp; 1:  $\beta = 0,05$ ; 2:  $\beta = 0,01$

Tiếp xúc dẻo rời rạc. Đặc trưng bởi sự so sánh độ cứng Brinell và thành phần phân tử của hệ số ma sát:

$$\mu_{ml} = \frac{\tau_o}{HB} + \beta \quad (3.53)$$

thay đổi nghịch đảo với độ cứng vật liệu. Sự giảm được để ý nếu tham số ma sát nhỏ hơn số hạng đầu tiên trong công thức (3.53). Khi  $\beta > \frac{\tau_o}{HB}$ , thành phần phân tử hầu như không thay đổi so với độ cứng.

Thành phần cơ giảm với sự tăng độ cứng, vì chiều sâu thâm nhập của các đinh giảm. Do đó, giá trị hệ số ma sát tổng có quan hệ nghịch đảo với độ cứng của thành phần mềm hơn trong tiếp xúc đàn hồi rời rạc. Hàm số  $\mu = \psi(HB)$  (hình 3.14).



Hình 3.14: Tương quan  $\mu$  và  $HB_o/HB$

a) Độ nhám cao; b) Độ nhám thấp

1 -  $\beta = 0,05$ ; 2 -  $\beta = 0,01$

Được vẽ trong hệ toạ độ  $\Delta$  -  $\mu_m$  theo tỉ số  $\frac{HB_o}{HB}$ , trong đó  $HB_o$  là độ cứng tham khảo phù hợp. Các tính toán được lấy ra với  $\frac{\tau_o}{HB_o} = 0,1$ ;  $p_{db} = 0,02HB_o$ ; và  $\Delta = 0,1$ . Giá trị  $\beta$  càng

lớn, hệ số ma sát ngoài càng khó cảm nhận được sự thay đổi so với độ cứng.

*Tiếp xúc dẻo dày đặc.* Trong điều kiện tiếp xúc này, hệ số ma sát ngoại thay đổi với độ cứng vật liệu (xem công thức 3.45).

### 3.2.3. Nhiệt độ của các vật rắn khi tiếp xúc

Điều làm chúng ta phải suy nghĩ là sự thay đổi hệ số ma sát theo nhiệt độ của các vật thể trong quá trình tiếp xúc dẻo.

Sự tăng lên của nhiệt độ dẫn đến thay đổi cả thành phần phân tử và thành phần cơ của hệ số ma sát. Đặc điểm của sự biến đổi thành phần phân tử được xác định bằng sự thay đổi lực đặc trưng cho sự cản trở sự trượt (đó là, ứng suất tiếp tuyến  $\tau_n$  trên bề mặt các thành phần cọ xát) và bằng sự thay đổi áp suất pháp tuyến trung bình trong tiếp xúc. Sử dụng khái niệm vật thể thứ ba, nguyên nhân bởi tính bền sệt của vật thể thứ ba, giảm với sự tăng nhiệt độ:

$$\tau_n = \tau_{n_0} e^{-\gamma \Delta \theta} \quad (3.54)$$

Trong đó:  $\eta$  - hệ số nhiệt độ;

$\tau_{n_0}$  - giá trị  $\tau_n$  ở một hằng số nhiệt độ tham khảo nào đó;

$\Delta \theta$  - khoảng thay đổi nhiệt độ.

Trong quá trình tiếp xúc dẻo, ứng suất pháp tuyến trung bình bằng độ cứng Brinell, phụ thuộc vào sự thay đổi nhiệt độ, thay đổi theo:

$$HB = HB_o e^{-\alpha \Delta \theta} \quad (3.55)$$

Trong đó:  $HB_o$  - độ cứng ở nhiệt độ tham khảo;

$\alpha$  - hệ số nhiệt độ.

Các giá trị  $\alpha$  và  $\gamma$  được tìm bằng thực nghiệm, bằng các phương pháp được mô tả dưới đây.

Thành phần phân tử của hệ số ma sát tĩnh ngoại thay đổi cùng với nhiệt độ vận hành kết cấu ma sát, phù hợp theo quan hệ sau:

$$\mu_m = \frac{\tau_{n_0}}{HB_o} e^{(\alpha-\gamma)\Delta \theta} = \mu_{m_0} e^{(\alpha-\gamma)\Delta \theta} \quad (3.56)$$

Trong đó:  $\mu_{m_0}$  - thành phần phân tử ở nhiệt độ tham khảo.

Phụ thuộc vào sự thay đổi nhiệt độ, thành phần phẳng có thể giảm bớt, tăng lên, hoặc giữ nguyên không thay đổi.

Theo số liệu của N.I. Amosov, dưới sự bảo dưỡng bình thường trong không khí, ma sát ngoài trong kết cấu ma sát kín (hệ số chống chéo lên nhau là bằng 1) xảy ra ở nhiệt độ:  $-150^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq (0,1 \div 0,3) \vartheta_f$ ; trong đó  $\vartheta_f$  - nhiệt độ nấu chảy. Cho các kết cấu ma sát với hệ số chống chéo nhỏ hơn 1, ma sát ngoài xảy ra trên dải nhiệt độ  $-40^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq (0,2 \div 0,3) \vartheta_f$ , ma sát ngoài dừng, vì xảy ra sự nám giữ mạnh đối với các vật thể cọ xát trong vùng tiếp xúc.

Phân tích cho thấy rằng, ảnh hưởng của sự thay đổi trong hình dạng bề mặt với sự tăng lên của nhiệt độ trên thành phần cơ của hệ số ma sát có thể được bỏ qua. Trong trường hợp đó, sự thay đổi nhiệt độ sẽ tác động lên thành phần cơ thông qua sự thay đổi độ cứng vật liệu. Sự giảm của độ cứng với sự tăng của nhiệt độ tạo lên sự thâm nhập lớn hơn của các đinh nhấp nhô và do đó có sự tăng lên của thành phần cơ:

$$\mu_{mc} = \mu_{mc_0} e^{\frac{\alpha \Delta \vartheta}{2v}} \quad (3.57)$$

Giá trị hệ số ma sát tĩnh ngoài tổng, phụ thuộc vào nhiệt độ vận hành, sẽ là:

$$\mu = \mu_{ml} e^{\frac{\alpha \Delta \vartheta}{2v}} + \mu_{mc_0} e^{\frac{\alpha \Delta \vartheta}{2v}} \quad (3.58)$$

Kể từ đây, như một quy tắc, thành phần phẳng của hệ số ma sát tĩnh ngoài giảm, và thành phần cơ tăng lên với sự tăng lên của nhiệt độ. Tổng quát, hàm số  $\mu = \psi(\vartheta)$  trải qua giá trị nhỏ nhất trong quá trình thay đổi nhiệt độ vận hành kết cấu ma sát trong một dải tương ứng vùng ma sát ngoài.

### 3.3. TÍNH HỆ SỐ MA SÁT TĨNH

Thành phần cơ của hệ số ma sát có thể được tính toán đủ chính xác từ các đặc trưng cơ học của thành phần mềm hơn trong cặp ma sát trượt, hình dạng bề mặt thành phần cứng hơn, và độ lớn áp suất đường bao trong kết cấu ma sát. Các phương pháp tính toán thành phần phân tử từ các đặc trưng của vật rắn cọ xát không được phát triển; với lí do này, nó được xác định bằng thực nghiệm.

#### 3.3.1. Xác định thành phần phân tử của hệ số ma sát ngoài và các tham số ma sát $\alpha$ và $\beta$

Thành phần phân tử hệ số ma sát ngoài tổng quát được tính bằng:

$$\mu_{ml} = \frac{\tau_\eta}{p_t} \quad (3.59)$$

hoặc

$$\mu_{ml} = \frac{\tau_o}{p_t} + \beta \quad (3.60)$$

Thành phần phân tử cho tiếp xúc dẻo ( $p_t = HB$ ) phải được xác định bằng thực nghiệm. Trong quá trình tiếp xúc đòn hồi, giá trị  $p_t$  thay đổi. Các tham số ma sát  $\tau_o$  và  $\beta$ , không phụ thuộc vào áp suất tiếp xúc pháp tuyến, có thể trước kia đã được sử dụng cho tính toán thành phần phân tử. Biết rằng các giá trị  $\tau_o$  và  $\beta$ , tính toán theo công thức sau:

Cho tiếp xúc dày đặc:

$$\mu_{ml} = \frac{2,1\tau_o}{p_{db}^{0,2}} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{0,8} \cdot \frac{1}{\Delta^{0,4}} + \beta \quad (3.61)$$

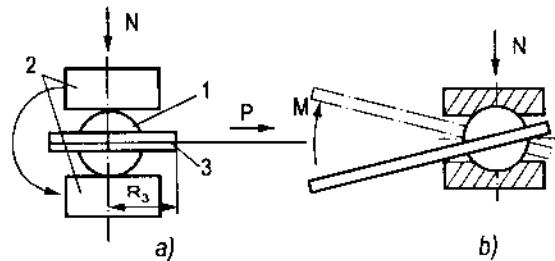
và cho tiếp xúc rời rạc:

$$\mu_{ml} = \frac{1,4\tau_o(1-\mu^2)^{2/3}}{E^{2/3} p_{db}^{1/3}} \left( \frac{r}{R_{max}} \right)^{1/3} + \beta \quad (3.62)$$

Trong việc xác định thành phần phân tử, các yêu cầu sau phải được thỏa mãn: (1) các điều kiện phòng thí nghiệm thực nghiệm càng gần giống với điều kiện thực tế vận hành cùi ma sát; và (2) áp suất pháp tuyến trung bình với mẫu thí nghiệm và với sản phẩm thực tế phải bằng nhau, vì thành phần phân tử phụ thuộc vào áp suất pháp tuyến.

Một phương pháp thỏa mãn các yêu cầu trên, về cơ bản là ở sự cản trở sự trượt tương đối, nguyên nhân gây ra biến dạng các lớp bề mặt (đó là: thành phần cơ của lực ma sát), được loại ra hoặc rút gọn một lượng không đáng kể;  $\mu_{ml}$  tìm được sau đó từ việc thu được giá trị thành phần phân tử lực ma sát. Phương pháp được thực hiện đầy đủ bằng sự ép vật 1 (vật in) có hình cầu (hình 3.15a) giữa hai tấm phẳng, song song của khối 2, quay vật 1 (vật in) xung quanh trục đối xứng của nó, và đo lực ma sát cần thiết cho sự quay này. Để tiện lợi, nó được lắp đặt trong chi tiết 3. Các tấm phẳng của khối được chọn phù hợp với yêu cầu khoảng cách các mẫu kiểm tra độ cứng Brinell, phụ thuộc vào vật liệu được nghiên cứu và đường kính của vật 1 (vật in). Các vật in được làm khác nhau đặc biệt để kiểm tra hoặc lựa chọn, có thể là các viên bi của ổ bi. Bề mặt làm việc của khối được gia công theo độ cứng Brinell của vật liệu. Nếu độ cứng  $HB < 35$ , các khối có thể được giũa trước khi kiểm tra với một cái giũa tốt. Bề mặt của khối với  $HB > 35$  cần thiết được đánh bóng.

Vật in hình cầu làm từ vật liệu cứng hơn phải được gia công tinh với cấp độ nhám cao (cấp 12 hoặc 13). Lực cản trở sự quay gần bằng (khoảng 0,5%) thành phần phân tử của



**Hình 3.15: Tương quan  $\mu_{ml}$**   
a) Kết cấu cầu; b) Kết cấu trục

lực ma sát. Tải trọng tác dụng phải đảm bảo đường kính vết in:  $0,064 \leq d/D \leq 0,6$ . Dựa vào tính toán dài đường kính vết in này, áp suất tiếp xúc trung bình không thay đổi và bằng độ cứng Brinell, và hơn nữa:

$$N = 2\pi R_{sp} h HB \quad (3.63)$$

tải trọng cần thiết để kiểm tra trong điều kiện tiếp xúc dẻo sẽ thay đổi trong khoảng:

$$0,126 \cdot 10^{-3} R_{sp}^2 HB \leq N \leq 1,26 R_{sp}^2 HB \quad (3.64)$$

Trong đó:  $R_{sp}$  bán kính cầu của vật in.

Ứng suất tiếp tuyến (nguyên nhân bởi lực yêu cầu) để quay vật in quanh trục đối xứng vuông góc với các bề mặt làm việc của khối được tính bởi:

$$\tau_n = \frac{3FR_s}{4\pi r_{in}^3} \quad (3.65)$$

và thành phần phân tử của hệ số ma sát (xem công thức 3.59) được tính bằng:

$$\mu_{ml} = \frac{3FR_s}{4Nr_{in}} \quad (3.65a)$$

Trong đó:  $R_s$  - bán kính của vật giữ vật in (trên hình 3.15a);

$r_{in}$  - bán kính vết in.

Bán kính vết in có thể được đo với sự trợ giúp của một kính lúp phù hợp với thiết bị đo độ cứng Brinell, hoặc với sự trợ giúp của máy so mẫu Model МИР-12 hoặc kính hiển vi.

Các giá trị thành phần phân tử hệ số ma sát đối với các vật liệu khác nhau trong tiếp xúc với vật in hình cầu được làm từ thép mác IIIХ-15 được đưa ra trong bảng 3.2.

Trong vài trường hợp  $\mu_{ml}$  có thể được tìm từ thực nghiệm bằng việc sử dụng vật in hình trụ thay cho việc sử dụng vật in hình cầu (hình 3.15b). Áp lực pháp tuyến tác dụng phải được lấy để đảm bảo áp suất tiếp xúc trung bình bằng HB. Ứng suất tiếp tuyến trên bề mặt chung giữa mặt phẳng mẫu và hình trụ, và do vậy thành phần phân tử của hệ số ma sát được tính toán bằng công thức:

$$\tau_n = \frac{F_o R_o}{2NR_{cl}} HB; \quad \mu_{ml} = \frac{F_o R_o}{2NR_{cl}}$$

Điều trở ngại là phương pháp này có độ chính xác thấp, có thể xảy ra sự lệch giữa các mẫu và hình trụ.

Các tham số ma sát  $\tau_o$  và  $\beta$  có thể được tìm phù hợp trong sự cọ xát các vật liệu, ứng dụng cho các gối tựa khác nhau. Bằng việc xác định giá trị của  $\tau_n$  và giống như cặp ma sát trượt cho ít nhất hai độ lớn khác nhau ứng suất pháp tuyến trung bình và đồ thị  $\tau_o = \psi(p_r)$  như trên hình 2.16 chúng ta tìm được các giá trị  $\tau_o$  và  $\beta$ .

**Bảng 3.2. Giá trị các thành phần hệ số ma sát  
và các tham số ma sát  $\tau_0$  và  $\beta$  (theo K.S.Lyapin).**

Vật liệu	HB, kG /mm <sup>2</sup>	$\mu_m$	$\tau_0$ , kG /mm <sup>2</sup>	$\beta$
1	2	3	4	5
<b>Kim loại</b>				
Pb	3,3 2,8	0,140 0,155	0,274 -	0,057 -
Ag	55 23	0,096 0,124	0,77 -	0,081 -
Cu	28,5 40,0 52,0 0,85	0,139 0,125 0,115 0,100	1,68 1,8 1,82 1,70	0,080
Ni	70 105,0 180,0	0,123 0,130 0,095	0,49 1,47 3,78	0,116
Sắt Armco	70,0 130,0 65,0	0,139 0,097 0,160	- - -	- - -
Va	110,0	0,103	-	-
Ta	78,0	0,115	2,42	0,084
Mo	110,0 186,0 140,0	0,105 0,095 0,128	1,87 2,79 -	0,088 0,080 -
W	285,0	0,082	-	-
N <sub>b</sub>	32,0	0,142	0,896	0,114
Re	105,0	0,095	-	-
Cr	200,0 100,0	0,095 0,135	- 1,50	- 0,120
Cd	23,0	0,096	0,943	0,055
Zn	33,0	0,088	-	-
Mg	44,0	0,082	-	-
Ti	128,0 190,0	0,100 0,085	2,82 -	0,078 -
Zn	74,0	0,121	-	-

1	2	3	4	5
Co	130,0 83,5	0,092 0,082	- -	- -
Sb (Antimony)	27,0	0,127	0,73	0,100
Bismuth	7,70 4,40	0,175 0,170	0,454 0,449	0,116 0,068
In (Indi)	0,80 0,60	0,200 0,260	0,107 -	0,066 -

**Plastics (Theo K.S. Lyapin, V.S. Paramonov, và A.I. Smol'yakov**

Fluoroplastic	3,10	0,028	0,341	0,017
Poly-Etylen Grade П9В	3,8	0,080	0,114	0,050
Poly-Etylen	3,70	0,380	0,011	0,035
Poly-Caprolactam	7,5	0,088	-	-
Caprolon	12,0	0,091	0,372	0,06
Commerical capron	13,0	0,065	0,195	0,05
Poly-Etylen Grade 68П	7,0	0,063	0,161	0,04
Plexiglass (thuỷ tinh hữu cơ)	16,0	0,085	-	-
Phenylon	16,0	0,220	-	-
Gỗ đặc	31,0	0,065	-	-
Gỗ thám dầu công nghiệp Grade 45	-	-	0,050	0,061
Gỗ thám dầu	-	-	0,100	0,080
Gỗ thám fluoroplastic Grade Ф-4	-	-	0,025	0,076
Gỗ thám ceresine (xeresin)	-	-	0,70	0,074
Gỗ thám ceresine (xeresin) và axít stearic	-	-	0,07	0,038
Cao su	-	-	0,135	0,028
Da:			0,250	0,010
- Sóng	-	-	$0,22 \cdot 10^{-4}$	0,016
- Đehaired	-	-	$0,20 \cdot 10^{-4}$	0,014
- Da thuộc	-	-	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,080

**Hợp kim ô trục**

BH				
B83				
ACC-6-5				
A-20				
Hợp kim Đồng-Beri				

**Kim cương tổng hợp trên các loại thép khác nhau (Theo A.I.Ershov)**

30ХГСА	340	0,125	20,06	0,066
45	270	0,119	20,39	0,044
О8Х18Н9Т	159	0,15	3,18	0,130
40Х	341	0,109	18,41	0,055
45	324	0,112	12,96	0,072

Khi phương pháp chuyển đổi gối tựa được sử dụng cho việc xác định  $\tau_\eta$  ở các giá trị khác nhau  $p_r$  trên cùng một vật liệu, màng mỏng vật liệu được kiểm tra, được áp dụng cho các gối tựa có độ cứng khác nhau. Để thuận lợi trong việc đo độ cứng các gối tựa cao hơn hoặc bằng độ cứng của vật liệu. Một giá trị của  $\tau_\eta$  có thể được tìm được bằng mô tả ở trên, bằng việc sử dụng các mẫu mặt phẳng làm từ vật liệu được kiểm tra. Để xác định giá trị thứ hai của  $\tau_\eta$ , chủ yếu sử dụng các mẫu composite, tức là, màng mỏng vật liệu kiểm tra trên một gối tựa. Tải trọng được sử dụng đảm bảo biến dạng dẻo trong diện tích tiếp xúc. Chiều dày màng mỏng không nên vượt quá  $10\mu\text{m}$ , để ngăn cản giá trị ứng suất pháp tuyến trung bình, từ việc bị ảnh hưởng đáng kể bởi cơ tính của vật liệu kiểm tra.

Các giá trị  $\tau_o$  và  $\beta$  có thể được ước lượng xấp xỉ trong cách sau: Giá trị  $\tau_\eta$  và  $p_t$  đầu tiên (từ công thức  $p_t = \frac{N}{\pi r_{im}^2}$ ) được xác định trong quá trình tiếp xúc dẻo; tải trọng pháp tuyến thì nhỏ bớt đi không đáng kể (từ 15 - 20%), và các tham số này được xác định nhiều lần. Từ các giá trị  $\tau_\eta$  và  $p_t$  tìm được, hằng số ma sát  $\tau_o$  và  $\beta$  được lấy từ đồ thị  $\tau_\eta = \psi(p_t)$ . Vì các giá trị  $p_t$  tìm được như đã mô tả là xấp xỉ, các tham số  $\tau_o$  và  $\beta$  sẽ nhận được đồ thị  $\tau_\eta = \psi(p_t)$  có sai số. Tuy nhiên, nó có thể được sử dụng để tính toán hệ số ma sát ở giá trị xấp xỉ đầu tiên.

Trong vài trường hợp, phương pháp trên để tìm  $\tau_o$  và  $\beta$  khó thực hiện. Do đó, sử dụng để làm các cặp ma sát gồm một vật in hình cầu (hoặc hình trụ) và một mặt phẳng, hoặc hai hình cầu có các trục giao nhau. Từ thực nghiệm với các mẫu này, ở hai tải trọng khác nhau trong điều kiện tiếp xúc đàn hồi, thành phần phân tử hệ số ma sát thu được từ hai phương trình sau:

$$\mu_{ml1} = \frac{\tau_o}{p_{tl}} + \beta ; \quad \mu_{ml2} = \frac{\tau_o}{p_{t2}} + \beta \quad (3.66)$$

Trên thực tế, thành phần phân tử được tìm cho các kết cấu ma sát thực,  $\tau_o$  và  $\beta$  được tính toán với việc sử dụng phương trình (3.66) và công thức áp suất tiếp xúc Hertz, hoặc cho bề mặt nhám bằng các công thức Demkin (chương 2).

Tải trọng pháp tuyến đảm bảo tiếp xúc đàn hồi cho một vật in hình cầu cọ xát vào một mặt phẳng, từ công thức (3.8) và quan hệ Hertz:

$$h = 0,83 \sqrt{\frac{N^2(1-\mu^2)^2}{R_{sp}E^2}} \quad (3.67)$$

$$N = 5R^2HB \left\{ \frac{HB(1-\mu^2)}{E} \right\}^2 \quad (3.68)$$

sẽ là:

Các vật liệu có môđun đàn hồi cao khi tải tác dụng cao, được tìm trong công thức (3.68), thành phần cơ học của hệ số ma sát có thể được bỏ qua. Từ công thức (3.66) ta thấy rằng với  $\mu_{ml1} > \mu_{ml2}$ .

$$\tau_o = \frac{2,6(\mu_{ml1} - \mu_{ml2})E^{2/3}}{(1-\mu^2)^{2/3}R_{sp}^{2/3}} \cdot \left( \frac{N_1^{1/3}N_2^{1/3}}{N_2^{1/3} - N_1^{1/3}} \right) \quad (3.69)$$

$$\beta = \mu_{ml1} = \frac{6,6(\mu_{ml1} - \mu_{ml2})N_2^{1/3}}{N_2^{1/3} - N_1^{1/3}} \quad (3.70)$$

Trong các công thức (3.69) và (3.70), chỉ số 1 và 2 của các tham số là các giá trị thu được trong lần thí nghiệm thứ nhất và thứ hai. Giá trị  $\tau_o$  và  $\beta$  được xác định bằng các phương pháp khác nhau trong các điều kiện làm việc khác nhau được cho trong bảng 3.2.

### 3.3.2. Phương pháp thực nghiệm để xác định các thông số bề mặt

Chúng ta đã biết, các tham số  $b$  và  $v$  là yếu tố cần thiết cho việc tính toán hệ số ma sát ngoại, áp suất đường bao, quan hệ giữa tải trọng và tiếp xúc bề mặt ma sát, diện tích tiếp xúc, và các đặc trưng tiếp xúc khác. Một phương pháp xác định các tham số đó từ đồ thị biên dạng bề mặt (chương 1). Mặc dù phương pháp này tốn nhiều thời gian, hơn nữa việc tìm các giá trị  $b$  và  $v$  cần phải phân tích sự tiếp xúc của các vật rắn, vì các tham số này tìm được bởi chiều dài phần bề mặt tiếp xúc,...

Các tham số  $b$  và  $v$  có thể tìm bằng thực nghiệm, sử dụng quan hệ giữa tiếp xúc của vật rắn với tải trọng pháp tuyến trong vết tiếp xúc dẻo:

$$h = R_{max} \left( \frac{P_{db}}{bHB} \right)^{1/v} \quad (3.71)$$

Nếu các giá trị  $h_1$  và  $h_2$  được tìm bằng thực nghiệm tương ứng với hai áp suất đường bao  $P_{db1}$  và  $P_{db2}$  phù hợp với vết tiếp xúc dẻo, (xem công thức 3.29), do đó:

$$v = \frac{\lg P_{db2} - \lg P_{db1}}{\lg h_2 - \lg h_1} \quad (3.72)$$

$$b = \frac{P_{db1}}{HB} \left( \frac{R_{max}}{h_1} \right)^v \quad (3.73)$$

Để tìm giá trị  $b$ , cần thiết phải biết  $R_{max}$ ,  $R_{max}$  được tìm từ đồ thị biên dạng về mặt hoặc được chọn từ bảng 2.6 và bảng 2.7, tham khảo phương pháp gia công tinh phù hợp. Bên cạnh đó,  $R_{max}$  và  $b$  được xác định bằng thực nghiệm.

Bằng thực nghiệm ta tìm được  $b$  và nhiều đặc trưng khác của bề mặt. Phân tích các công thức liên quan đến tiếp xúc của các vật rắn bao gồm cả tham số  $\Delta$ . Nếu các giá trị hệ số ma sát tĩnh ngoại  $\mu_1$  và  $\mu_2$  thu được bằng thực nghiệm ở các giá trị  $P_{db1}$  và  $P_{db2}$  của

áp suất đường bao trong vết tiếp xúc (xem công thức (3.29)), sau đó sử dụng công thức (3.42), tham số  $\Delta$  có thể được tính theo:

$$\Delta = \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2 HB^{1/v}}{\left[0,55v(v-1)k_1\right]^2 \left(p_{db1}^{1/2v} - p_{db2}^{1/2v}\right)^2} \quad (3.74)$$

Thay các giá trị  $v$ , tìm được từ (2.72), và  $k_1$  (từ hình 3.2) vào công thức trên, ta thu được  $\Delta$ .

Khi đã biết  $\Delta$ , ta cần xác định bán kính cong các đỉnh nhấp nhô, sử dụng công thức (3.71):

$$r = \frac{h_i}{\Delta} \left( \frac{HB}{p_{dbi}} \right)^{1/v} \quad (3.75)$$

Trong đó:  $h_i$  và  $p_{dbi}$  là giá trị chiều sâu tiếp xúc và áp suất đường bao lấy từ thực nghiệm, từ việc tìm  $v$ .

Giá trị  $r$  đã biết, chiều cao nhấp nhô lớn nhất  $R_{max}$  có thể được tìm bằng thực nghiệm. Cuối cùng, hệ số ma sát  $\mu_3$  và  $\mu_4$  phải được xác định ở áp suất đường bao  $p'_{db1} > p'_{db2}$  trong tiếp xúc dẻo dày đặc, do đó dải áp suất đường bao cao hơn các giá trị xác định bằng quan hệ (3.44). Việc áp dụng công thức tính toán hệ số ma sát tinh ngoài, ta thu được:

$$R_{max} = \frac{1,7 RHB (\mu_3 - \mu_4)^2}{(p_{db1}^{1/2} - p_{db2}^{1/2})^2} \quad (3.76)$$

Thay các giá trị đã tìm được vào công thức (3.73) ta tìm được giá trị  $b$ .

### 3.3.3. Tính hệ số ma sát

#### *Thí dụ 3.1*

Tính hệ số ma sát ngoài:

Áp suất pháp tuyến  $p = 4kG/cm^2$ ; đường dẫn bằng thép:  $HB = 250$ ; cấp độ nhám: 9.

Vật liệu làm chi tiết: Fluoroplastic với:  $E = 10^4 kG/cm^2$ ;  $\alpha = 0,15$ ;  $HB = 31$ , và  $\mu = 0,5$ .

Nhận xét: Các tham số nhấp nhô bề mặt cần phải xác định cho đường dẫn, vì độ cứng của thép cao hơn rất nhiều so với Fluoroplastic.

Từ bảng 2.6 và 2.7 ta tìm được:  $\Delta = 2,6 \cdot 10^{-3}$ ,  $b = 2,3$ .

Và  $\frac{R_{max}}{r} = 0,004$ . Từ bảng 3.2:

$p_{db} = kE^{0,8} \left( \frac{H_s}{R_s} \right)^{0,4} p_{dn}^{0,2}$ , giả sử dạng sóng có hình cầu và chọn  $H_s/R_s = 10^{-5}$  cho bề mặt mài, ta có:

$$p_{db} = 0,5(10^4)^{0,8}(10^{-5})^{0,4}4^{0,2} \approx 10,4 \text{ kG/cm}^2$$

Từ công thức (2.9):

$$\begin{aligned} \frac{p_{db}}{HB} &= \frac{2,4}{5} \frac{\frac{2v+1}{2} v(v-1)k_1}{E} \left( \frac{HB(1-\mu^2)}{E} \right)^{2v} \left( \frac{1}{\Delta} \right)^v = \\ &= \frac{2,4^{2,1} \cdot 1,6 \cdot 0,6 \cdot 0,85}{4} \left[ 2,4 \cdot 10^{-2} \right]^{3,2} \left( \frac{10^3}{2,6} \right) = 9 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$

Áp suất đường bao cần có để chuyển từ biến dạng đàn hồi sang biến dạng đàn dẻo phải là  $p_{db} = 28 \text{ kG/cm}^2$ .

Từ (3.10):

$$\begin{aligned} p_{db} &= \frac{8 \cdot 10^{-2}}{(b^{1/v} v)^{2(v-1)}} \Delta^{1/2} \frac{E}{1-\mu^2} = \frac{8 \cdot 10^{-2}}{(2,3^{0,6} \cdot 1,6)^{3,5}} \cdot (2,6 \cdot 10^{-3})^{1/2} \frac{10^4}{0,75} \approx 2 \text{ kG/cm}^2 \\ \rightarrow \mu &= \frac{1,4 \tau_o (1-\mu^2)^{2/3}}{E^{2/3} p_{db}^{1/3}} \left( \frac{r}{R_{max}} \right)^{1/3} + \beta + \frac{0,35 \alpha_f p_{db}^{1/3} (1-\mu^2)}{E^{1/3}} \frac{R_{max}^{1/3}}{r^{1/3}} = \\ &= \frac{1,4 \cdot 0,032 \cdot 0,75^{0,67}}{10^{8/3} \cdot 10,4^{1/3}} + 0,02 + \frac{0,35 \cdot 2,5 \cdot 0,15 \cdot 10,4^{1/3} \cdot 0,75^{1/3}}{10^{4/3}} \approx 0,044 \end{aligned}$$

### Thí dụ 3.2

Xét cặp ma sát gồm: ổ trượt làm từ thép 45, độ cứng 52 HRC, cấp độ nhám bề mặt: 9. Máng lót ổ trượt là thiếc BpOIIIC 6-6-3, mô đun đàn hồi  $E = 9.103 \text{ kG/mm}^2$ , độ cứng 70 HB và cấp độ bóng bề mặt: 9.

Ta tìm các thông số độ nhám của trực thép. Từ bảng 1.6, chọn  $b = 0,6$ ;  $v = 2$ ;  $\Delta = 9,6 \cdot 10^{-2}$ ,  $R_{max} = 2,4 \mu\text{m}$ ,  $r = 10 \mu\text{m}$ .

Trong điều kiện có dầu bôi trơn, từ bảng 2.2 ta có:  $\mu_m = 0,06$  và  $\tau_\eta = 4,2 \text{ kG/mm}^2$

Theo M.N. Dobychin, ứng suất lớn nhất của ổ trục phụ thuộc số hệ số xác định hoạt động của ổ trượt.

Đối với vật liệu đã chọn:

$$\mu = 0,16\mu_l + 0,554 = 0,16 \cdot 0,03 + 0,554 \approx 0,6$$

$$c_o = \frac{4}{\pi} \left( (1 - 0,9) + 0,91 \frac{9 \cdot 10^3}{2,1 \cdot 10^4} \right) = 1,65$$

$$\alpha' = \frac{100.0,91}{0,05.9.10^3} = \frac{20.10}{10^3} = 0,2$$

$$q_o = 0,32 \left( \frac{1,65 + 0,12}{0,12} \right)^{0,6} \left( \frac{0,2}{1,2} \right)^{0,6} = 0,32.14,7^{0,6}.0,17^{0,6} = 0,57$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_{av} \left( \frac{1}{0,57} + 0,35 \right) = 2,1\sigma_{av}$$

Ứng suất tiếp xúc trung bình  $\alpha_{av}$  cho đường kính trục 80mm là  $1,25\text{kG/mm}^2$ .

Do đó  $\sigma_{av} = 2,6 \text{ kG/mm}^2$ .

Dạng biến dạng trên diện tích tiếp xúc được xác định từ công thức (3.26):

$$\frac{p_{db}}{HB} = \frac{0,5.5,4^v}{\Delta^v} \left( \frac{HB(1-\mu^2)}{E} \right)^{2v} = \frac{0,5.5,4^2}{10^{-2}} \left( \frac{70.0,91}{9.10^3} \right) = 5.29.10^{-11}.2,4.10^3 \approx 3,5.10^{-6}$$

Tức là  $p_{db} = 2,5.10^{-4} \text{ kG/mm}^2$ .

Áp suất đường bao vượt quá giá trị  $p_{db}$  thì phù hợp với việc chuyển trạng thái từ biến dạng đàn dẻo sang biến dạng dẻo. Ở đây, tiếp xúc giữa các bộ phận cọ xát sẽ là dẻo.

Từ công thức (3.4), với điều kiện từ giá trị  $f_{ml}$ , vật liệu và hình dạng bề mặt của trục:

$$\frac{p_{db}}{HB} = \frac{0,125}{\Delta^2} \left( 1 - \frac{6\tau_n}{HB} \right)^2 = 0,125.100.0,64^2 \approx 5,1, \text{ do đó } p_{db} \approx 36\text{kG/mm}^2$$

Giá trị  $p_c$  tìm được vượt quá giá trị lí thuyết. Sau đó nó sẽ làm việc với ma sát ngoài. Mật độ tiếp xúc tìm được theo công thức (3.29):

$$\frac{p_{db}}{HB} = \frac{0,5}{(b^{1/v})^{v-1}} = \frac{0,5}{(0,6^{1/2}.2)} = 0,21$$

Áp suất đường bao chỗ tiếp xúc nhỏ hơn  $p_{db}$  đã tính, do đó tiếp xúc sẽ là dẻo và rải rác.

Hệ số ma sát ngoài:

$$\mu = \mu_{ml} + 0,44\Delta^{1/2} \left( \frac{p_{db}}{HB} \right)^{1/4} = 0,06 + 0,44(9,6.10^{-2})^{1/2} \left( \frac{2,6}{70} \right)^{1/4} = 0,12$$

### Thí dụ 3.3

Cho khớp ma sát đĩa, áp suất danh nghĩa  $p_{dh} = 4\text{kG/cm}^2$ . Bánh đà là GX15-32. Các tham số công nghệ:  $b = v = 2$ ;  $\Delta = 5,3.10^{-2}$  (bảng 2.5). Độ cứng bánh đà  $HB = 250$ . Tấm

lót là vật liệu Composite, HB = 10, môđun đàn hồi  $370\text{ kG/mm}^2$ . Làm việc ở nhiệt độ  $9 = 60^\circ\text{C}$ ,  $\mu_{ml} = 0,15$  (bảng 2.2).

Vì độ cứng vững của tấm ma sát thấp, nên ta giả sử áp suất danh nghĩa bằng áp suất đường bao. Từ công thức (3.26), áp suất đường bao làm tiếp xúc dẻo, sẽ tìm được:

$$\frac{p_{db}}{HB} = \frac{0,5.5,4^2}{(5,3.10^{-2})^2} \left( \frac{10.0,75}{370} \right)^4 = 0,6.10^{-4}$$

$$\Rightarrow p_{db} = 6.10^{-3} \text{ kG/mm}^2$$

Từ đó ta thấy biến dạng dẻo xảy ra trong vùng diện tích tiếp xúc thực áp suất đường bao phù hợp với điều kiện ma sát ngoài là:

$$\frac{p_{db}}{HB} = \frac{0,125}{\Delta^2} \left( 1 - \frac{6\tau_\eta}{HB} \right)^2 = \frac{0,125.0,01.10^4}{(5,3.10^{-2})^2} \approx 0,45$$

$$\Rightarrow p_{db} \approx 4,5 \text{ kG/mm}^2$$

Do đó tiếp xúc dẻo rời rạc xảy ra trong khớp ma sát với các điều kiện đã đưa ra. Hệ số ma sát ngoài sẽ là:

$$\mu = 0,15 + 0,44(5,3.10^{-2})^{1/2} \left( \frac{0,04}{10} \right)^{1/4} = 0,18$$

### 3.3.4. Chuyển dịch ban đầu

Ma sát tĩnh ngoài xảy ra trong vùng dịch chuyển ban đầu. Dịch chuyển ban đầu là một hiện tượng dịch chuyển nhỏ ban đầu của các vật rắn khi chuyển từ trạng thái tĩnh sang trạng thái trượt.

Sự khác biệt giữa khoảng dịch chuyển ban đầu  $a_\tau^b$  là nguyên nhân chủ yếu gây biến dạng các thành phần ma sát và tiếp xúc dịch chuyển ban đầu  $a_\tau^c$ . Tiếp xúc dịch chuyển ban đầu dẫn tới sự thay đổi điều kiện ứng suất trên diện tích tiếp xúc của các vật rắn ở thời điểm bắt đầu dịch chuyển, phụ thuộc vào loại biến dạng trong diện tích tiếp xúc. Do đó, dịch chuyển ban đầu tổng cộng sẽ là:

$$a_\tau = a_\tau^b + a_\tau^c \quad (3.77)$$

Dịch chuyển ban đầu, dưới tác dụng của tải trọng phù hợp với sự trượt tương đối, Giá trị này có thể được tính toán bằng công thức:

$$a_\tau^b = \frac{\tau}{G_1} h_1 + \frac{\tau}{G_2} h_2 \quad (3.78)$$

Trong đó:  $h_1$  và  $h_2$  - khoảng cách riêng từ bề mặt nhám tới phần do  $a_{\tau}^b$  (hình 3.2);

$G_1$  và  $G_2$  - các môđun đàn hồi sự trượt vật thể thứ nhất lên vật thể thứ hai;

$\tau$  - ứng suất trượt lớn hơn.

Dịch chuyển ban đầu tiếp xúc xảy ra trong quá trình biến dạng dẻo, nguyên nhân tăng vùng tiếp xúc khi có một lực tác dụng theo hướng trượt.

Trong quá trình tiếp xúc dẻo, áp lực pháp tuyến tác dụng lên bề mặt chung, tác dụng lên hai diện tích. Một diện tích có bán kính vượt quá  $\rho'$  là đặc trưng bởi sự chống lại sự trượt khi tải tác dụng; trong diện tích thứ hai, bán kính cong nhỏ hơn  $\rho'$ , sự trượt không xảy ra:

$$\rho' = r \left( 1 - \frac{T_i}{fN_i} \right) \quad (3.79)$$

Trong đó:  $T_i$  - lực kéo tiếp tuyến.

Khi  $T$  tăng lên thì diện tích trượt cũng tăng lên, và với  $T_i = f.N_i$  thì  $\rho'$  sẽ bằng không, tức là sự trượt xảy ra trên toàn bộ diện tích tiếp xúc.

Trong một quá trình, dịch chuyển tiếp tuyến:

$$a_{\tau}^c = \frac{(2-\mu)(1+\mu)f_i h}{1-\mu^2} \quad (3.80)$$

Dịch chuyển ban đầu của các bề mặt tiếp xúc sẽ bằng  $a_{\tau}^c$  ở đỉnh nhấp nhô cao nhất. Kể từ đây, trong trường hợp này, dịch chuyển ban đầu tiếp xúc sẽ phụ thuộc vào lượng thâm nhập và hệ số ma sát ở đỉnh cao nhất, khó xác định. Tuy nhiên, trường hợp tiếp xúc,  $\mu_{i,\max} = \mu$  - hệ số ma sát trung bình.

Trong quá trình tiếp xúc dẻo, điều kiện ứng suất trong diện tích tiếp xúc sẽ thay đổi, vì vật liệu sẽ bị cào xước bởi các đỉnh nhấp nhô ở thời điểm dịch chuyển. Nếu chỉ có tải pháp tuyến, một đỉnh nhấp nhô sẽ biến dạng vật liệu như chảy nhót. Lúc này, diện tích tiếp xúc sẽ là:

$$\Delta A_{\tau,st} = 2\pi r h_{i,st} \quad (3.81)$$

Trong quá trình trượt, sự cào xước làm đỉnh nhấp nhô chống lại sự biến dạng phần trước của vật liệu theo phương chuyển động. Diện tích tiếp xúc của đỉnh nhấp nhô với vật liệu biến dạng là:

$$\Delta A_{\tau,sl} = \pi r h_{i,kin} \quad (3.82)$$

Do đó, với phần lớn tiếp xúc mà phù hợp với các tải trọng khác nhau, diện tích tiếp xúc thực trong quá trình trượt sẽ dừng lại - trạng thái nghỉ. Trong tính toán từ công thức

(3.81), diện tích tiếp xúc thực đối với một bề mặt trượt nhấp nhô trên một bề mặt phẳng sẽ là:

$$A_{r,st} = \frac{1}{2} A_c b \epsilon_{kin}^v \quad (3.83)$$

quan hệ giữa lượng tiếp xúc tổng cộng ở trạng thái nghỉ trong quá trình trượt sẽ phụ thuộc vào từng vùng diện tích thực tiếp xúc riêng biệt. Đối với biến dạng dẻo trong vùng tiếp xúc:

$$A_r = \frac{N}{P_r} \quad (3.84)$$

$$P_{r,st} = P_{r,kin} = P_r \quad (3.85)$$

$$A_{r,kin} = A_{r,st} \sqrt{1+f^2} \quad (3.86)$$

$$h_{kin} = 2h_{st} \sqrt{1+f^2} \quad (3.87)$$

$$h_{kin} = h_{st} (2\sqrt{1+f^2})^{1/v} \quad (3.88)$$

$$h_{kin} = h_{st} (2\sqrt{1+f^2})^{\frac{1}{v_1+v_2}} \quad (3.89)$$

$$a_r^c = \int_{h_{st}}^{h_{kin}} \sqrt{\frac{r}{2} z^{-\frac{1}{v}}} dz \quad (3.90)$$

$$a_r^c = \sqrt{2rh_{st}} \left[ (2\sqrt{1+f^2})^m - 1 \right] \quad (3.91)$$

$$a_r^c = \frac{(2-\mu)(1+\mu)f_i r}{(1-\mu^2)^{0.6}} \left[ \frac{5p_{db}}{Ev(v-1)k_1} \right]^{\frac{2}{2v+1}} \Delta^{\frac{2v}{2v+1}} \quad (3.92)$$

$$a_r^c = \frac{(2-\mu)(1+\mu)f_i r}{(1-\mu^2)^{0.6}} \left( \frac{p_{db}}{E} \right)^{0.4} \cdot \Delta^{0.8} \quad (3.93)$$

$$a_r^c = \frac{2.4(2-\mu)(1+\mu)rf_i}{(1-\mu^2)^{\frac{(2v-1)^2}{2v+2}}} \left( \frac{HB}{2} \right)^{2v} \quad (3.94)$$

$$a_r^c = \frac{8(2-\mu)(1+\mu)fN^{2/3}}{E^{2/3}r^{1/3}(1-\mu^2)^{1/3}} \quad (3.95)$$

*Tiếp xúc dẻo, rời rạc.* Từ các công thức (3.33) và (3.90), dịch chuyển tiếp xúc ban đầu sẽ là:

$$a_r^c = \left( \frac{p_{db}}{HB} \right)^{\frac{1}{2v}} \left[ \left( 2\sqrt{1+f^2} \right)^{1/2v} - 1 \right] 1.41r\Delta^{1/2} \quad (3.96)$$

Tiếp xúc dày đặc:

$$a_{\tau}^c = \sqrt{2rR_{max}} \left( \frac{p_{db}}{HB} \right)^{1/2} \left[ (2\sqrt{1+f^2})^{1/2} - 1 \right] \quad (3.97)$$

Cho một vết lõm:

$$a_{\tau}^c = \left( \frac{N}{\pi HB} \right)^{1/2} \left[ \left( 2\sqrt{1+f^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (3.98)$$

## Chương 4

# TÍNH MA SÁT TRÊN CƠ SỞ CÓ HÌNH

### 4.1. TÍNH MA SÁT KHÔ (không có chất bôi trơn)

Vào những năm 1450 Lêona đơ Vanhxi đã kết luận rằng đối với các cặp ma sát trượt thường có hệ số ma sát  $\mu_{khô} = 1/4$ .

Năm 1699, Amon Ton đã đưa ra hai giả thiết:

- Lực ma sát không phụ thuộc vào diện tích tiếp xúc;
- Lực ma sát tỉ lệ với lực tác dụng pháp tuyến với bề mặt tiếp xúc, cho kết quả  $\mu_{khô} = 1/3$ .

Kết quả này tồn tại ở mức độ chính xác thấp.

Sau đó các lí thuyết về ma sát phát triển trên cơ sở các lí thuyết sau:

- Lí thuyết ăn khớp.
- Lí thuyết bám dính
- Lí thuyết biến dạng (đàn hồi, dẻo)

và đã được Paron hoàn thiện dần vào những năm 1740.

#### 4.1.1. Theo lí thuyết bám dính

Khi phát triển theo lí thuyết của Amon Ton có kể đến tương tác giữa các phần tử lực ma sát được tính như sau:

$$F_{ms} = k + \mu F_N \quad (4.1)$$

Trong đó:  $\mu$  - hệ số phụ thuộc vào lực pháp tuyến  $F_N$ ;

$k$  - giá trị kể đến ảnh hưởng của các yếu tố khác  $F_N$ .

Theo Boden, hệ số  $\mu$  được viết như sau:

$$\mu = \frac{\tau_c}{P_{nq}} \quad (4.2)$$

Trong đó:  $\tau_c$  - áp lực cắt làm rách mối liên kết;

$P_{nq}$  - áp lực pháp tuyến làm ngắt quãng sự chảy.

Đối với kim loại có:  $\tau_c = [\sigma_c]/2$  và  $P_{nq} = 3[\sigma_c]$

Trong đó:  $[\sigma_c]$  - ứng suất chảy cho phép của vật liệu và ta có:

$$\mu = \frac{[\tau_o]}{p_{nq}} = \frac{[\sigma_c]}{2.3.[\sigma_c]} = 0,17 \quad (4.3)$$

Khi kể đến các yếu tố vật liệu, không kể ảnh hưởng của kích thước hình học, Boden và Tabor đã đưa ra công thức sau:

$$\mu = \frac{k}{\sqrt{\alpha(1-k^2)}} \quad (4.4)$$

Trong đó:

$$k = \frac{\tau_h}{[\tau_c]}$$

$$\alpha = \left\{ 3 \cdot [\sigma_c]/[\tau_c] \right\}^2 = \left\{ \frac{p_{nq}}{[\tau_c]} \right\}^2 \quad (4.5)$$

với  $p_{nq}$  là áp lực pháp tuyến làm ngắt quãng sự chảy.

Giá trị  $\alpha$  đối với một số vật liệu là:

$$\alpha_{\text{Indium}} = 3; \alpha_{\text{Platin}} = 12; \alpha_{\text{Diaman}} = 25$$

#### 4.1.2. Theo lí thuyết biến dạng

Dựa trên lí thuyết biến dạng các tác giả Leslie (1804) Gumbel (1925) và Drescher (1959) đã đưa ra công thức tính hệ số ma sát sau:

$$\mu = i \lambda \operatorname{tg} \arcsin \left( \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \frac{2+T^\circ}{1+T^\circ} \right) + \phi(v_{ms}, \frac{H}{E}) \quad (4.6)$$

- với  $0,1 \leq \lambda \leq 1$ .
- Khi biến dạng đàn hồi  $\lambda \rightarrow 0,1$ ;
- Khi biến dạng dẻo  $\lambda \rightarrow 1$ .
- $T^\circ$  là hệ số kể đến ảnh hưởng của nhiệt độ:
  - Nếu ở  $0^\circ$  có  $T^\circ = \pi/2$ .
  - Nếu ở  $45^\circ$  có  $T^\circ = 0$
- $i$  - kể đến sự khác nhau hay giống nhau của cặp vật liệu tiếp xúc:
  - $i = 1$  khi hai vật liệu khác nhau.
  - $i = 1$  đến  $2$  khi hai vật liệu giống nhau, chúng phụ thuộc vào kết cấu của cặp ma sát.

Hàm  $\phi(v_{ms}; \frac{H}{E})$  kể đến ảnh hưởng của vận tốc trượt và độ cứng bề mặt  $H$ , môđun đàn hồi  $E$  của vật liệu.

#### 4.1.3. Theo lí thuyết bám dính và biến dạng.

Theo các tác giả Kragelski (1939); Kampbel (1939) Ernst, Merchant (1940); Goldait, Wilinan (1962) Rabinovich (1965) và một số tác giả khác, thì kết quả bao quát của lí thuyết này, sau khi được Kragelski kiểm chứng là hệ số ma sát kể cả ảnh hưởng của bám dính và biến dạng được viết như sau:

$$\mu = \mu_{b,di} + \mu_{b,dg} \quad (4.7)$$

Trong đó:

$$\mu_{b,di} = \frac{\tau_o}{p_t} + \beta \quad (4.8)$$

$$\tau_{c,di} = \tau_o + \beta p_t \quad (4.9)$$

Trong đó:  $\tau_o$  - ứng suất cắt khi  $p_t = 0$ ;

$p_t$  - ứng suất thực trên bề mặt tiếp xúc;

$\beta$  - hệ số kể đến ảnh hưởng của hiệu ứng áp điện.

và

$$\mu_{b,dg} = k_a \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (4.10)$$

Trong đó:  $k_a = 0,55$  đối với biến dạng dẻo;

$k_a = 0,19 \alpha_H$  đối với biến dạng đàn hồi;

$\alpha_H$  - hệ số kể đến ảnh hưởng độ cứng vật liệu.

Theo Kragelski, giá trị  $h/r$  phụ thuộc vào biến dạng nếu biến dạng đàn hồi có:  $h/r < 0,01$  đối với kim loại đèn, và biến dạng dẻo  $h/r < 0,0001$  đối với kim loại hiếm và nhẹ.

Nếu chỉ chú ý đến biến dạng, người ta còn phân ra cho lí thuyết biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo cụ thể hơn và có mức độ chính xác cao hơn.

Đối với biến dạng đàn hồi, hệ số ma sát đàn hồi được viết như sau:

$$\begin{aligned} \mu_{dh} &= \left( \frac{\sqrt{\Pi}}{2^{1/2v} \cdot k_v} \right)^{\frac{2v}{2v+1}} \frac{\tau_o \left( \frac{1}{E_{td}} \right)^{\frac{2v}{2v+1}}}{p_{db}^{\frac{2v+1}{2v+1}} \cdot \Delta^{\frac{v}{2v+1}}} + \beta + \dots \\ &\quad + 0,19 k_{vdh} \left( \frac{2\sqrt{\Pi}}{k_v} \right)^{\frac{1}{2v+1}} \alpha_H \left( \frac{p_{db}}{E_{td}} \right)^{\frac{1}{2v+1}} \Delta^{\frac{\gamma}{2v+1}} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Khi  $v = 2$ , có:

$$\mu_{dh} = \frac{2,1 \tau_o \left( \frac{1}{E_{td}} \right)^{4/5}}{p_{db}^{1/5} \Delta^{2/5}} + \beta + 0,23 \alpha_H p_{db}^{1/5} \Delta^{2/5} \left( \frac{1}{E_{td}} \right)^{1/5} \quad (4.12)$$

Trong đó:

$$K_{vdh} = 1,5 \frac{\Gamma(v+3/2)}{\Gamma(v+2)} = \frac{8}{3\sqrt{\Pi}} \cdot \frac{\Gamma(v+3/2)}{\Gamma(v+2)} \quad (4.13)$$

và

$$K_v = \frac{\Gamma(v+1)}{\Gamma(v+3/2)} \quad (4.14)$$

$$\Delta = \frac{h_{max}}{r \cdot b^{1/v}} \quad (4.15)$$

Đối với biến dạng dẻo, có:

$$\mu_{deo} = \frac{\tau_o}{c[\sigma_c]} + \beta + 0,55 K_{vdh} \Delta^{1/2} \left( \frac{2p_{dh}}{c[\sigma_c]} \right)^{1/2v}$$

Trong đó:

$$K_{vdh} = 1,33 \frac{\Gamma(v+1)}{\Gamma(v+3/2)} = \frac{3}{4} \sqrt{\Pi} \cdot \frac{\Gamma(v+1)}{\Gamma(v+3/2)} \quad (4.16)$$

Trong đó: r - bán kính cong của độ nhám bề mặt ma sát;

b, v - các hệ số kể đến ảnh hưởng của các phương pháp công nghệ.

$E_{td}$  - hệ số mô đun đàn hồi tương đương của vật liệu:

$$\frac{1}{E_{td}} = \frac{1 - \nu_p^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_p^2}{E_2} \quad (4.17)$$

Trong đó:  $\nu_p$  - hệ số đàn hồi Poisson của vật liệu

và  $\Gamma(x)$  là hàm Gamma có:  $\Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right) = \frac{(2n)! \sqrt{\Pi}}{n! 2^{2n}}$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots$

$$\Gamma(x) = \frac{\Gamma(x+1)}{x} \quad \text{khi } x < 1 \quad (4.18)$$

$$\Gamma(x) = (x-1) \Gamma(x-1) \quad \text{khi } x > 2$$

Khi  $1 \leq x \leq 2$  giá trị  $\Gamma(x)$  được tra theo bảng sau.

Bảng 4.1. Giá trị của hàm  $\Gamma(x)$   $1 \leq x \leq 2$

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1	2	3	4	5	6	7	8
1,00	1,00000	1,25	0,90640	1,50	0,88623	1,75	0,91906
1,01	0,99433	1,26	0,90440	1,51	0,88659	1,76	0,92137
1,02	0,98884	1,27	0,90250	1,52	0,88704	1,77	0,92376
1,03	0,98355	1,28	0,90072	1,53	0,88757	1,78	0,92623
1,04	0,97844	1,29	0,89904	1,54	0,88818	1,79	0,92877

1	2	3	4	5	6	7	8
1,05	0,97350	1,30	0,89747	1,55	0,88887	1,80	0,93138
1,06	0,96873	1,31	0,89600	1,56	0,88964	1,81	0,93408
1,07	0,96415	1,32	0,89464	1,57	0,890,49	1,82	0,93685
1,08	0,95973	1,33	0,89338	1,58	0,89142	1,83	0,93969
1,09	0,95546	1,34	0,89222	1,59	0,89243	1,84	0,94261
1,10	0,95135	1,35	0,89115	1,60	0,89352	1,85	0,94561
1,11	0,94740	1,36	0,89018	1,61	0,89468	1,86	0,94869
1,12	0,94359	1,37	0,88931	1,62	0,89592	1,87	0,95184
1,13	0,93993	1,38	0,88854	1,63	0,89724	1,88	0,95507
1,14	0,93642	1,39	0,88785	1,64	0,89864	1,89	0,95838
1,15	0,93304	1,40	0,88726	1,65	0,90012	1,90	0,96177
1,16	0,92980	1,41	0,88676	1,66	0,90167	1,91	0,96523
1,17	0,92670	1,42	0,88636	1,67	0,90330	1,92	0,96877
1,18	0,92373	1,43	0,88604	1,68	0,90500	1,93	0,97240
1,19	0,92089	1,44	0,88581	1,69	0,90678	1,94	0,97610
1,20	0,91817	1,45	0,88566	1,70	0,90864	1,95	0,97988
1,21	0,91558	1,46	0,88560	1,71	0,91057	1,96	0,98374
1,22	0,91311	1,47	0,88563	1,72	0,91258	1,97	0,98768
1,23	0,91075	1,48	0,88575	1,73	0,91467	1,98	0,99171
1,24	0,90852	1,49	0,88595	1,74	0,91683	1,99	0,99581
						2,00	1,00000

Các hệ số  $\tau_o$ ,  $\beta$ ,  $\alpha_H$  được cho theo bảng (4.2), (4.3) và bảng (4.4) cho giá trị hàm  $\Gamma(x)$  để xác định các hệ số  $K_v$ ,  $K_{vdh}$ ,  $K_{Kvdéo}$ .

Bảng 4.2. Bảng tính các hệ số HB,  $\mu$ ,  $\tau_o$ ,  $\beta$

Vật liệu	HB(kG/mm <sup>2</sup> )	$\mu$	$\tau_o$	$\beta$
1	2	3	4	5
Blei	3,3	0,14	0,274	0,057
	2,8	0,155		
Bạc	55	0,096	0,77	0,081
Nhôm	23	0,124	-	-
Đồng	28,5	0,139	1,68	0,08
	40	0,125	1,8	
	52	0,115	1,82	
	85	0,1	1,7	

1	2	3	4	5
Niken	70	0,123	0,49	
	105	0,13	1,47	
	180	0,095	3,78	
Armcoeisen	70	0,139	-	-
	130	0,097	-	-
	65	0,16	-	-
Vanadium	140	0,103	-	-
Tantal	78	0,115	2,42	0,084
Molybdan	110	0,105	1,87	0,088
	18	0,095	2,99	0,08
	140	0,128	-	-
Wolfram	285	0,082	-	-
Niob	32	0,142	0,896	0,114
Rhenium	105	0,095	-	-
Crom	200	0,095	-	-
	100	0,135	1,5	0,12
Cadmi	23	0,096	0,0943	0,055
Kẽm	33	0,088	-	-
Manhê	44	0,082	-	-
Titan	128	0,1	2,82	0,078
	190	0,085	-	-
Rikoni	74	0,121	-	-
Kobal	130	0,092	-	-
	83,5	0,082	-	-
Antimon	27	0,127	0,73	0,1
Wismut	7,7	0,175	0,454	0,116
Zinn	4,4	0,17	0,449	0,068
Indium	0,8	0,2	0,107	0,066
	0,6	0,26	-	-
Polyetils	3,8	0,08	0,114	0,05
	2,0	0,08	0,044	0,058
	2,6	0,09	0,13	0,04
Kaprol	13	0,065	0,195	0,05
	7	0,063	0,161	0,04
Cao su	16	0,22	-	-
	-	-	0,25	0,01

Bảng 4.3

Vật liệu	$\alpha_H$
Đồng	0,04
Phốtpho	0,04 0,14
Dura	0,03 0,06
Thép tôi	0,01 0,02
Chất dẻo	0,08 0,12 0,2
Cao su	0,09 0,13 0,35
Gỗ	0,2 0,7
Da	0,06 0,1

Bảng 4.4

v	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$k_v$	0,76	0,67	0,6	0,55	0,51	0,48	0,46
$k_{vel}$	1	0,9	0,83	0,78	0,73	0,69	0,65
$k_{vpl}$	1	0,87	0,8	0,74	0,69	0,65	0,62

#### 4.1.4. Thí dụ tính hệ số ma sát

Xác định hệ số ma sát của cặp ma sát ở trạng thái biến dạng dẻo, cho các số liệu sau:

$$v = 2; b = 3; r_x = 2,5\text{mm}; r_y = 0,9\text{mm}$$

Áp lực đường bao:  $p_{db} = 11,32 \text{ N/mm}^2$ ;  $C = 3$

$$[\sigma_c] = 2 \tau_o = 2 \cdot 165 (\text{N/mm}^2); \beta = 0,05; h_{max} = R_t = 0,6\mu\text{m}$$

Giải:

$$\Delta = \frac{h_{max}}{\sqrt{r_x \cdot r_y} b^{1/2}}$$

$$\Delta = 2,31 \cdot 10^{-4}$$

Từ  $v = 2$ , tra bảng có:  $K_{vd\text{đeo}} = 0,8$

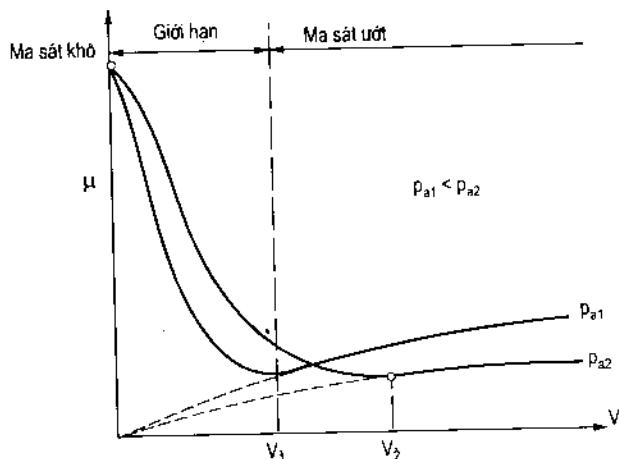
$$\mu_{\text{đeo}} = \frac{165}{2.3.165} + 0,05 + 0,05.0,8(2,31 \cdot 10^{-4})^{1/2} \cdot \left( \frac{2,11,32}{3,165} \right)^{1/4}$$

$$\mu_{\text{đeo}} = 0,22$$

## 4.2. MA SÁT GIỚI HẠN

Ma sát giới hạn là ma sát xảy ra giữa hai bề mặt có chuyển động tương đối, mà giữa hai bề mặt này có lớp vật liệu bôi trơn. Hình 4 chỉ ra sự phụ thuộc của hệ số ma sát vào áp lực và vận tốc, theo nguyên tắc của đường cong Stribeck.

Hình 4: Đường cong Stribeck  
đối với ma sát trượt



Đồ thị này được chia thành ba vùng:

Vùng I. Vùng ma sát khô, chưa có vật liệu bôi trơn tham gia vào quá trình ma sát.

Vùng II. Vùng ma sát giới hạn, vật liệu bôi trơn bắt đầu tham gia vào quá trình ma sát.

Vùng III. Vùng hoàn toàn ma sát ướt, ma sát chỉ của các lớp chất lỏng của vật liệu bôi trơn.

Theo Vogelpohl, hệ số ma sát giới hạn được viết như sau:

$$\mu_{gh} = \mu_{kh} \left( 1 - \frac{F_{td}}{F_N} \right) + \mu_{rot} \frac{F_{td}}{F_N} \quad (4.19)$$

Trong đó: \$\mu\_{kh}\$ - hệ số ma sát của bề mặt hai vật rắn tiếp xúc có chuyển động tương đối, giả thiết chưa có vật liệu bôi trơn.

\$F\_{td}\$ - lực thủy động tác động lên phương lực pháp tuyến \$F\_N\$, hình thành khi có chuyển động tương đối với vận tốc vượt qua giới hạn.

\$\mu\_{rot}\$ - hệ số ma sát ướt, khi đó trên bề mặt ngăn cách, tách hẳn hai vật rắn, chỉ còn các lớp chất lỏng của vật liệu bôi trơn trượt lên nhau, xuất hiện ma sát của các lớp chất lỏng này.

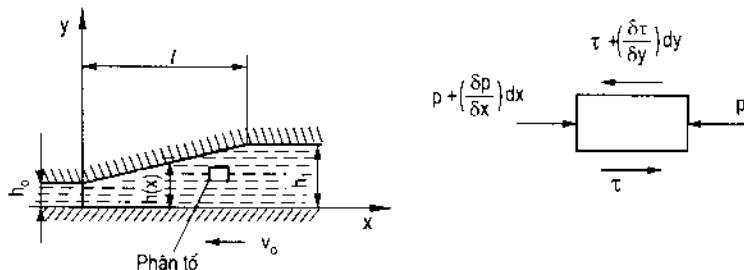
Như vậy ta có thể xác định ma sát giới hạn thông qua tính ma sát khô, ma sát ướt và lực thủy động \$F\_{td}\$ hình thành trong quá trình chuyển động, tuy nhiên các kết quả tính theo (4.19) để phải thực nghiệm chứng minh và hiệu chỉnh cụ thể cho từng trường hợp.

## Chương 5 MA SÁT UỐT

### 5.1. XÂY DỰNG CÔNG THỨC TÍNH MA SÁT UỐT

*Ma sát uốn là ma sát xảy ra giữa hai bề mặt chất lỏng chuyển động tương đối với nhau, các ứng suất tiếp tạo ra lực cản chuyển động. Cơ sở xây dựng công thức tính hệ số ma sát uốn là lí thuyết thủy động, để giảm bớt khó khăn và chấp nhận mức độ chính xác hợp lý, người ta đưa ra các giả thiết sau:*

- Dòng chảy là dòng chảy tầng giữa các lớp chất lỏng;
- Chất lỏng không nén được;
- Lớp chất lỏng có chiều rộng không giới hạn;
- Áp lực của lớp chất lỏng là hằng số theo phương vuông góc với lớp chất lỏng đó;
- Độ nhớt của chất lỏng không biến đổi cơ tính sau khi làm việc;
- Bỏ qua lực quán tính của chất lỏng vì rất nhỏ so với lực tiếp tuyến.



*Hình 5: Mô hình tính ma sát uốn*

Hình 5 mô tả quá trình chuyển động của lớp chất lỏng vào khe hẹp, áp lực  $p$  sẽ biến đổi theo phương  $x$  một lượng  $p \frac{\partial p}{\partial x} dx$  và áp lực tiếp tuyến là  $\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} dy$  theo phương  $y$ ; phân tử chất lỏng được cân bằng nhờ các ứng suất tác dụng lên bề mặt, khi đã sử dụng các giả thiết trên ta có:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (5.1)$$

Từ định luật Niton ứng suất tiếp trong chất lỏng được viết:

$$\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5.2)$$

Trong đó:  $v$  - vận tốc trượt của lớp chất lỏng tương đối với nhau.

$$\frac{dp}{dx} = \eta \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (5.3)$$

Tích phân 2 lần (5.3) ta có:

$$v = \frac{1}{2\eta} \left( \frac{dp}{dx} \right) y^2 + C_1 y + C_2 \quad (5.4)$$

Để xác định  $C_1$  và  $C_2$  ta có điều kiện biên sau:

Tại  $y = 0$  có  $v = -v_o$

$$C_2 = -v_o$$

Tại  $y = h$  có  $v = 0$

$$C_1 = \frac{v_o}{h} - \frac{1}{2\eta} \left( \frac{dp}{dx} \right) h$$

Lưu lượng dầu là:

$$Q = - \int_0^h v \cdot b \cdot dy \quad (5.5)$$

$$Q = b \left[ \frac{1}{12\eta} \left( \frac{dp}{dx} \right) h^3 + \frac{v_o h}{2} \right] \quad (5.6)$$

Giả thiết rằng, tại vị trí có áp lực lớn nhất thì  $dp/dx = 0$ , đặt vị trí đó là  $h^+$

Lưu lượng dầu đi qua tiết diện  $h^+$  là  $Q^+$  và ta có:

$$Q^+ = b \frac{v_o h^+}{2} \quad (5.7)$$

Từ điều kiện liên tục, ta có:

$$Q^+ = Q \quad (5.8)$$

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta v_o \left( \frac{h^+ - h}{h^3} \right) \quad (5.9)$$

Chiều dài  $h$  có thể viết thông qua giá trị  $h_o$  và ta có:

$$h = h_o \left( 1 + m \frac{x}{l} \right) \quad (5.10)$$

với  $m = \frac{h^+}{h_o} - 1$  (5.11)

Đặt  $h^+ = C^+ h_o$  (5.12)

$$dp = \frac{6\eta v_o}{h_o^2} \left[ C^+ \left( 1 + m \frac{x}{l} \right)^{-2} dx - \left( 1 + m \frac{x}{l} \right)^{-2} dx \right] \quad (5.13a)$$

Sau khi tích phân (13a)

$$p = \frac{6\eta v_o l}{h_o^2} k_p(x) \quad (5.13b)$$

Lấy giá trị trung bình có:

$$p_{tb} = \frac{6\eta v_o l}{h_o^2} k_{p_{tb}} \quad (5.14)$$

Trong đó:

$$k_{p_{tb}} = \frac{\ln(1+m)}{m^2} - \frac{2}{m(2+m)} \quad (5.15)$$

Trên vi phân diện tích bề mặt tiếp xúc  $dA = b \cdot dx$ , có:

$$dF_{ms} = \eta \cdot b \cdot dx \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5.16)$$

Kết hợp (5.4) có:

$$dF_{ms} = \frac{b}{2} \frac{dp}{dx} \left[ (2y - h) + \frac{2\eta v_o}{h} \right] dx \quad (5.17)$$

Tại  $y = 0$ , có:

$$F_{ms0} = \eta bl \frac{v_o}{h_o} k_{F_0} \quad (5.18)$$

Trong đó:

$$k_{F_0} = \frac{4}{m} \ln(1+m) - \frac{6}{2+m} \quad (5.19)$$

Tại  $y = h$ , có:

$$F_{msh} = \eta bl \frac{v_o}{h_o} k_{F_h} \quad (5.20)$$

Trong đó:

$$k_{F_h} = \frac{6}{2+m} - \frac{2}{m} \ln(1+m) \quad (5.21)$$

Từ phương trình cân bằng sau:

$$F_{ms0} = F_{msh} + F_N \operatorname{tg}\beta \quad (5.22)$$

Trong đó:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{h_l - h_o}{l} = m \frac{h_o}{l} \quad (5.23)$$

Từ (5.14) ta có:

$$F_N = \frac{6\eta v_o b \cdot l^2}{h_o^2} k_{p_{tb}} \quad (5.24)$$

Hệ số ma sát ướt là:

$$\mu_{ướt} = \frac{h_o k_{F_0}}{6 k_{p_{tb}}} \quad (5.25)$$

Vì thông số  $h_o$  khó xác định, nên có thể tính theo lực  $F_N$ :

$$\mu_{\text{ướt}} = 0,4 \sqrt{\frac{\eta v_o \cdot b}{F_N}} \cdot \frac{k_{Fo}}{\sqrt{k_{ptb}}} \quad (5.26)$$

Trong đó giá trị  $k_{Fo}/k_{ptb}$  và  $k_{Fo}/\sqrt{k_{ptb}}$  được cho theo bảng sau và phụ thuộc vào m.

m	$k_{Fo}/k_{ptb}$	$k_{Fo}/\sqrt{k_{ptb}}$
0,6	35,15	5,39
0,7	32,79	5,15
0,8	31,22	4,98
0,9	30,04	4,85
1,0	29,17	4,75
1,2	28,20	4,60
1,4	27,77	4,52
1,5	27,72	4,50
2,0	28,33	4,44

## 5.2. THÍ ĐU

Hãy tính hệ số ma sát ướt, cho số liệu sau:

$$v_o = 0,5 \text{m/s} ; \quad m = 0,7 ; \quad \eta = 19,4 \text{ P}_a \cdot \text{s}$$

$$b = 150 \text{mm} ; \quad F_N = 50 \cdot 10^3 \text{N}$$

*Giải:* Từ  $m = 0,7$  tra bảng trên có:  $\frac{k_{Fo}}{\sqrt{k_{ptb}}} = 5,15$

$$\mu_{\text{ướt}} = 0,4 \sqrt{\frac{19,4 \cdot 0,5 \cdot 0,15}{50 \cdot 10^3}} \cdot 5,15$$

$$\mu_{\text{ướt}} = 0,011$$

## *PHẦN III*

# **MÒN**

### **Chương 6**

## **MÒN CẶP MA SÁT VÀ CHI TIẾT MÁY**

### **6.1. ĐỊNH NGHĨA VÀ PHƯƠNG PHÁP TÍNH MÒN CỔ ĐIỂN**

#### **6.1.1. Định nghĩa**

*Mòn là một quá trình thay đổi hình dáng, khối lượng, kích thước của bề mặt vật thể, làm mất mát hoặc thay đổi vị trí tương đối trên bề mặt do biến dạng, mất liên kết, bong tách, chảy dẻo, ion hóa tạo ra vùng vật liệu mới.*

*Mòn còn là một quá trình thay đổi bản chất vật liệu trên bề mặt tiếp xúc do hiện tượng khuếch tán, hấp phụ, hợp kim hoá, ăn mòn, xâm thực.*

#### **6.1.2. Một số công thức tính mòn cổ điển - theo kinh nghiệm**

Trong một thời gian dài, cường độ mòn được tính theo một số công thức kinh nghiệm sau:

$$I_h = \frac{(p_{dn})^m}{H} \quad (6.1)$$

Trong đó:  $p_{dn}$  - áp lực danh nghĩa trên bề mặt tiếp xúc;

$H$  - độ cứng của vật liệu tiếp xúc;

$m$  - chỉ số mòn phụ thuộc vào bản chất vật liệu.

Công thức này thường được sử dụng khi biến dạng đàn hồi,  $p_{dn}$  nhỏ gần bằng 0,14MPa, độ cứng lớn:

$$HB \approx 8500 \text{ MPa}$$

Theo một số tác giả khác, cường độ mòn được tính theo công thức sau:

$$I_h = 209E^{-1.31} \quad (6.2)$$

Trong đó:  $E$  - mô đun đàn hồi của vật liệu.

Đối với một số vật liệu phi kim loại, cường độ mòn được tính như sau:

$$I_h = 8,4 \cdot 10^{-3} HV^{-0,27} \quad (6.3)$$

$$I_h = e_{bh}^{-1,72}$$

Đối với polyme:

$$I_h = 1,42 \cdot 10^{-3} HV^{-0,27} \quad (6.4)$$

$$I_h = 8,6 \cdot 10^{-4} e_{bh}^{-1/2}$$

Trong đó: HV - độ cứng Vich-ke;

$e_{bh}$  - năng lượng bốc hơi của vật liệu.

## 6.2. TỔNG QUAN VỀ MÒN

### 6.2.1. Khái niệm chính

- *Cặp ma sát*: là tập hợp hai chi tiết lắp ghép có chuyển động tương đối.
- *Kết cấu ma sát*: là kết cấu máy gồm nhiều cặp ma sát.
- *Cường độ mòn*: là tỉ số giữa lượng mòn của chi tiết với quãng đường ma sát thực hiện được, hay một khối lượng công việc thực hiện được.
  - *Tốc độ mòn*: là tỉ số giữa lượng mòn với thời gian gây ra lượng mòn đó.
  - *Lượng mòn giới hạn*: là lượng mòn cho phép khi sử dụng cặp ma sát đó.

### 6.2.2. Cơ chế mòn các bề mặt kim loại

Mòn là một quá trình, các lớp bề mặt trượt tương đối dẫn đến sự cắt, bẻ gãy chẽ nhấp nhô, tạo thành miền có nhấp nhô mới, làm nhẵn dần bề mặt ma sát, mòn còn do nén ép các bề mặt nhấp nhô do biến dạng đàn hồi, dẻo, tăng nhiệt, va đập, do môi trường không khí, ôxy hoá..

### 6.2.3. Sự phá hỏng bề mặt ma sát

Do cắt tế vi, tạo vết xước, bong tách, tróc, nứt sâu.

### 6.2.4. Sự vận chuyển vật liệu giữa các bề mặt ma sát

Trong quá trình ma sát, do mỏi, do nhiệt, các bề mặt có sự dịch chuyển vật liệu, làm mất vật liệu, có khi lại làm tăng khối lượng tại vùng tiếp xúc, do có lún hoặc bám dính, các lớp vật liệu mất đi và hình thành không ngừng,

### 6.2.5. Các dạng mòn

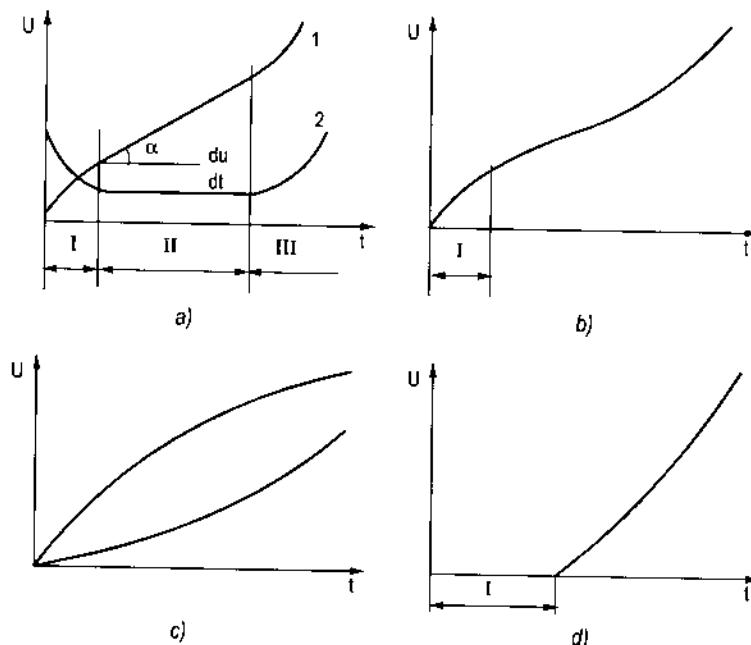
Các dạng mòn thường xảy ra trên bề mặt ma sát như sau:

- Mòn ôxy hoá.
- Mòn cơ hoá xảy ra khi:

$$K_T = \frac{H_k}{H_m} > 0,6 \quad (6.5)$$

Trong đó:  $H_k$  - độ cứng của vật liệu ma sát kim loại;

$H_m$  - độ cứng của hạt mài.

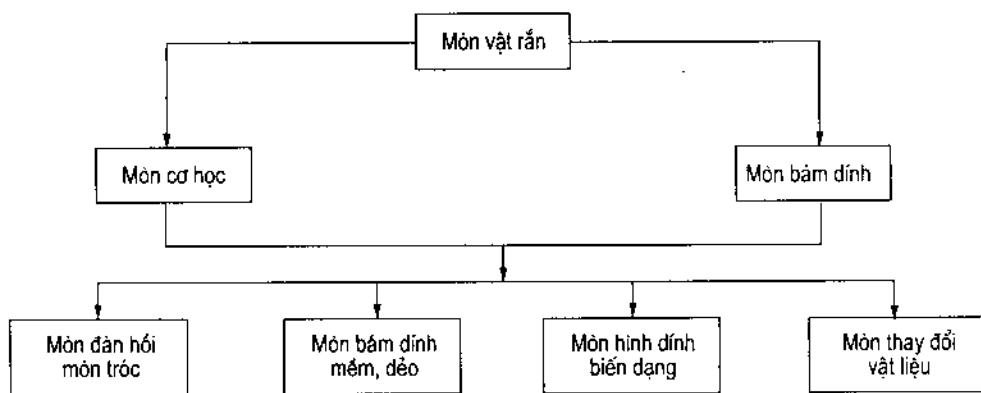


**Hình 6.1: Đường cong mài mòn**

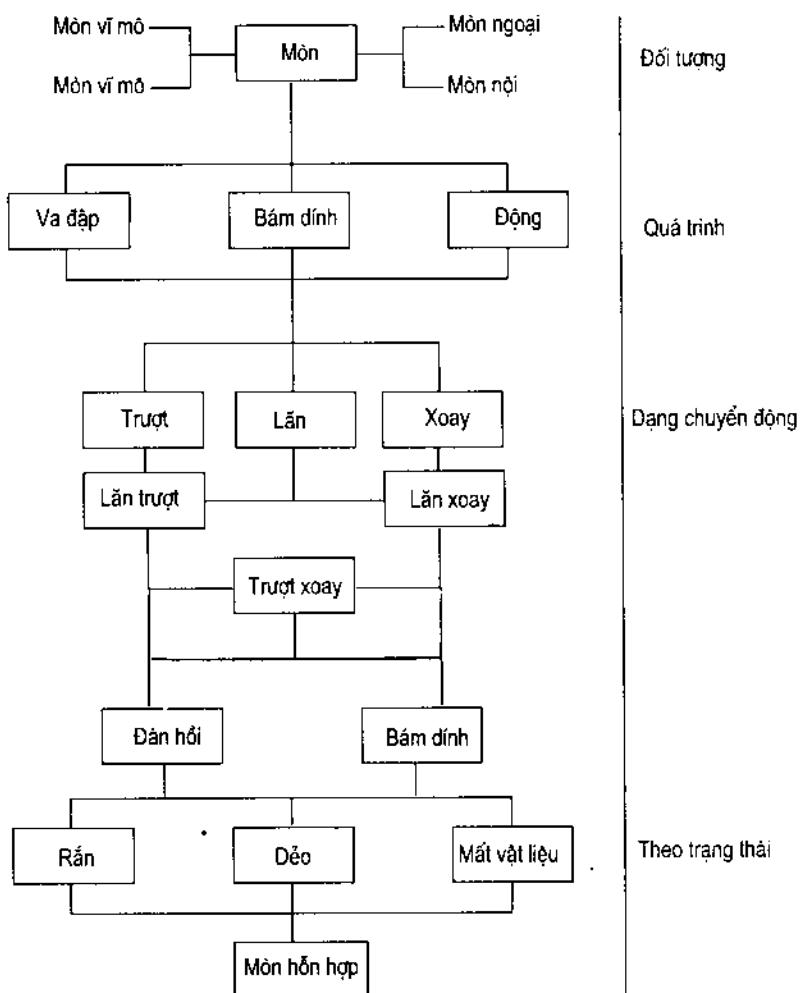
- a) Đường 1: biểu thị lượng mòn; Đường 2: biểu thị tốc độ mòn;
- b) Không có thời kì ổn định; c) Không có thời kì chạy rà; d) Ứng với các chi tiết chịu ứng suất tiếp xúc, thực tế không bị mòn trong giai đoạn I.

- Mòn cơ học xảy ra khi  $K_T < 0,6$  (6.6)
- Mòn tróc xảy ra khi vận tốc trượt nhỏ, áp lực cao.
- Mòn tróc nhiệt xảy ra khi bề mặt bị biến dạng nhiệt.
- Mòn mỏi do biến dạng biến đổi lặp đi, lặp lại nhiều lần.
- Mòn fretting là mòn do chuyển động tịnh tiến khứ hồi nhiều lần làm dịch chuyển vật liệu các bề mặt tiếp xúc khi tải trọng động sinh ra lớp ôxy hoá động.
- Mòn còn do co lún, ăn mòn, xói mòn và nứt tê vi.

**Bảng 6.1. Cơ chế mòn**



**Bảng 6.2. Phân loại mòn**



### 6.3. MỘT SỐ THÔNG SỐ TÍNH MÒN

#### 6.3.1 Chiều cao mòn

$$h_m = \frac{V_m}{a_m \cdot b_m} \quad (6.7)$$

Trong đó:  $V_m$  - thể tích mòn;

$a_m$  - chiều rộng mòn;

$b_m$  - chiều dài mòn.

#### 6.3.2. Tốc độ mòn

- Dạng đường:  $\dot{h}_m = \frac{h_m}{t_{ms}}$
- Dạng thể tích:  $\dot{V}_m = \frac{V_m}{t_{ms}}$

(6.8)

#### 6.3.3. Cường độ mòn

- Dạng đường:  $I_h = \frac{h_m}{S_{ms}}$
- Dạng thể tích:  $I_v = \frac{V_m}{S_{ms}}$

(6.9)

#### 6.3.4. Cường độ mòn riêng

$$i_h = I_h \frac{A_{dn}}{A_t} = I_h \frac{P_t}{P_{dn}} \quad (6.10)$$

Trong đó:  $A_{dn}$  và  $P_{dn}$  - diện tích tiếp xúc danh nghĩa và áp lực danh nghĩa;

$A_t$  và  $P_t$  - diện tích tiếp xúc thực và áp lực thực.

#### 6.3.5. Năng lượng ma sát đơn vị

$$e_{ms}^* = \frac{W_{ms}}{V_m} = \frac{P_{ms} \cdot t_{ms}}{V_m} \quad (6.11)$$

#### 6.3.6. Mòn tương đối

$$\varepsilon_v = \frac{V_m}{V_{m\text{mẫu}}} = \frac{h_m}{h_{m\text{mẫu}}} \quad (6.12)$$

#### 6.3.7. Mòn riêng

$$a_m = \frac{V_{m\text{mẫu}}}{V_{m\text{stn}}} = \frac{h_{m\text{mẫu}}}{h_{m\text{stn}}} \quad (6.13)$$

Trong đó:  $V_{m\text{stn}}$ ;  $h_{m\text{stn}}$  - thể tích và chiều cao mòn của mẫu sau thử nghiệm.

#### 6.4. CÁC THÔNG SỐ TÍNH ĐƯỜNG BIÊN BỀ MẶT TIẾP XÚC

Trong vùng tiếp xúc, xuất hiện những điểm tiếp xúc tổng các diện tích này gọi là *diện tích tiếp xúc thực*  $A$ , tương ứng các vùng nhỏ gồm tổng hợp diện tích điểm tiếp xúc ta gọi là *tiếp xúc theo đường bao*  $A_{db}$ , và diện tích tiếp xúc tính theo các kích thước danh nghĩa được gọi là *diện tích tiếp xúc danh nghĩa*  $A_{dn}$ . Tương ứng với các loại diện tích tiếp xúc này ta có các áp lực thực  $p$ , *đường bao*  $p_{db}$ , *danh nghĩa*  $p_{dn}$ .

Các tỉ số tương ứng là:

$$\eta_{t/db} = \frac{A_t}{A_{db}} ; \quad \eta_{db/dn} = \frac{A_{db}}{A_{dn}} ; \quad \eta_{t/dn} = \frac{A_t}{A_{dn}} \quad (6.14)$$

Từ quy luật tiếp xúc Hertz, các diện tích tiếp xúc của một số dạng điển hình như sau:

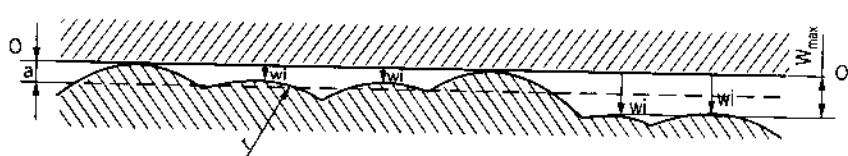
Hình dạng bề mặt được biểu thị trên hình (6.2).



**Hình 6.2: Dạng bề mặt của chi tiết**

1. Độ sóng; 2. Độ bóng;  $R_a$ ,  $R_t$  độ nhám trung bình và lớn nhất

Tiếp xúc cầu - mặt phẳng



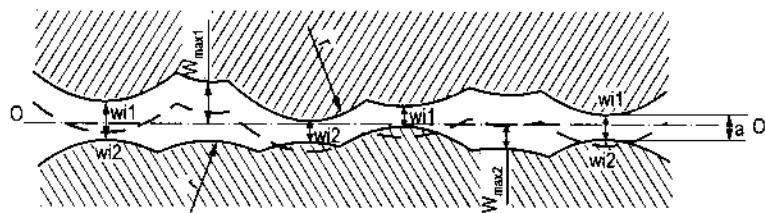
**Hình 6.3: Tiếp xúc cầu - mặt phẳng**

$$A_{db} = 2,44 \frac{F_N^{2/3} r_s^{2/3} j_s^{1/3}}{E_{td}^{2/3}} \quad (6.15)$$

Tiếp xúc trụ - phẳng:

$$A_{db} = 2,15 \frac{F_N^{1/2} r_s^{1/2} b^{1/2} j_s}{E_{td}^{1/2}} \quad (6.16)$$

## Tiếp xúc cầu - cầu



**Hình 6.4: Tiếp xúc cầu - cầu**

Trong đó:  $F_N$  - lực pháp tuyến;

$r_s$  - bán kính sóng của cầu hoặc trụ;

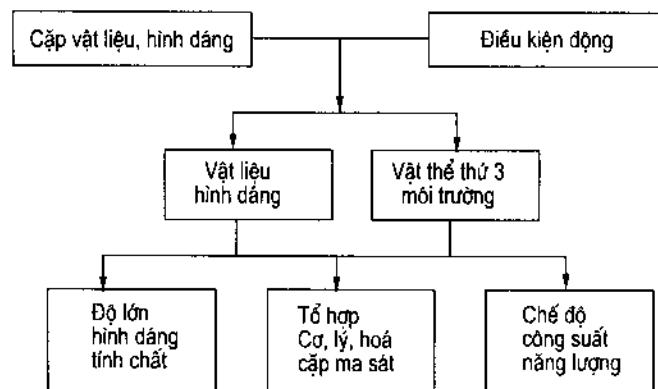
$j_s$  - số lượng bi, hoặc trụ lăn;

$b$  - chiều dài trụ.

**Bảng 6.3. Biểu thị các thông số bề mặt khi mài tinh**

Phương pháp gia công	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	$W_{\max}$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_x$	$r_y$	$s$	Vật liệu thứ 2	$m$
Mài tinh	0,7	0,9	0,5	3,53	0,02	0,16	Thép 45	4,89
	2,1	2,4	2			0,17	Thép 38	3,9

**Bảng 6.4. Tóm tắt cơ sở tính ma sát và mòn**



## Chương 7

# TÍNH MÒN TRÊN CƠ SỞ CƠ HÌNH VÀ NĂNG LƯỢNG

### 7.1. TÍNH MÒN TRÊN CƠ SỞ CƠ HÌNH

Dựa trên lí thuyết cơ phân tử, các thông số mòn được tính như sau:

- Cường độ mòn dạng đường:

$$I_h = \frac{V_{ms}}{A_{dn} \cdot S_{ms}} \quad (7.1)$$

$$I_h = i_h \frac{P_{dn}}{P_t} \quad (7.2)$$

Thể tích ma sát là:

$$V_{ms} = \frac{\alpha \cdot b \cdot \varepsilon^{v+1}}{v+1} h_{max} \cdot A_{tb} = \frac{\varepsilon h_{max} A_t}{v+1} \quad (7.3)$$

- Cường độ mòn riêng:

$$i_h = \frac{\varepsilon h_{max}}{(v+1)n_m d_e} = \frac{\alpha \cdot b \cdot \varepsilon^{v+1} h_{max} A_{db}}{(v+1) n_m d_e A_{dn}} \quad (7.4)$$

Trong đó:  $\varepsilon = \frac{a}{h_{max}}$  ;

$d_e$  - đường kính trung bình của vị trí mòn;

$n_m$  - hệ số mòn kể đến sự tiếp xúc do mỏi.

Từ (7.4) người ta chia ra các dạng mòn cụ thể sau, để có công thức tính chính xác cao hơn.

- Mòn bậc một - mòn do tiếp xúc đàn hồi;
- Mòn bậc hai - mòn do tiếp xúc dẻo;
- Mòn bậc ba - mòn do cắt tế vi.

#### 7.1.1. Tính mòn bậc 1

Cường độ mòn  $I_h$  được tính như sau:

$$I_h = C \left( \frac{P_{dn}}{E_{td} k'_v} \right)^{1+\beta't} \Delta^{t/2(1-\beta')} \left( \frac{K_{dh} E_{td}}{\sigma_B} \right)^t \left( \frac{A_{db}}{A_{dn}} \right)^{-\beta't} \quad (7.6)$$

$$\Delta = \frac{h_{max}}{r b^{1/v}} \quad (7.7)$$

$$C = \frac{v^{1/2} \Gamma(v) \Gamma(1 + \frac{t}{2})}{4(v+1) \Gamma(v + \frac{t}{2})} \quad (7.8)$$

$$K'_v = \frac{\Gamma(v+1)}{2\sqrt{\pi} \Gamma(v+3/2)} \quad (7.9)$$

$$\beta' = \frac{1}{2v+1} \quad (7.10)$$

$$K_{dh} = \frac{4 \cdot K \cdot \mu}{3\pi} \quad (7.11)$$

Trong đó: K - hệ số kể đến sự phân bố áp lực:

$$K = 1,5 \sqrt{4(1 - v_p - v_p^2) + \frac{(1 - 2v_p)^2}{\mu^2}} \quad (7.12)$$

$$n_m = \left( \frac{\sigma_B}{k_t} \right)^t = \left( \frac{\sigma_B}{K_{dh} E_{td}} \sqrt{\frac{t}{h}} \right)^t \quad (7.13)$$

Trong đó:  $\sigma_B$  - ứng suất mỏi tương ứng khi  $n = 1$ .

### 7.1.2. Tính mòn bậc 2

$$I_h = \sqrt{2} C \left( \frac{p_{dn}}{HB} \right)^{\frac{1+\beta't}{1-\beta'}} \Delta^{\frac{1+t}{2}} \left( \frac{K_{de}}{\varepsilon_B} \right)^t \left( \frac{A_{db}}{A_{dn}} \right)^{-\frac{1+\beta'}{1-\beta'}} \quad (7.14)$$

$$K_{deo} = \sqrt{\frac{100 [\sigma_b] + 2\mu \cdot HB}{100 [\sigma_b] - 2\mu \cdot HB}} \quad (7.15)$$

Trong đó các giá trị  $\beta'$ ,  $\Delta$ , C giống như tiếp xúc đàn hồi  $\varepsilon_B$ ,  $\sigma_B$  cho theo bảng (7.1).

Bảng 7.1. Biến dạng đàn hồi biến dạng dẻo

Vật liệu	Biến dạng đàn hồi		Biến dạng dẻo	
	$\sigma_B$	$t$	$\varepsilon_B$	$t$
1	2	3	4	5
Đồng			0,39	2,0
Nhôm			0,34	2,0
Thép thường			0,32	2,0
Kẽm			0,17	2,0
Thép 45	700	7,90	0,095	1,3
Thép 55			0,095	1,3

1	2	3	4	5
Thép 40X			0,14	1,3
Thép 50G			0,095	1,3
FMKII			0,26	2,0
Gang	647	4,15		
Các bon	245	6,85		
Cao su E = 2,16N/mm <sup>2</sup>	207	3,00		
Cao su E = 2,75	143	3,40		
Cao su E = 3,19	834	3,60		
Lốp xe	157	3,40		
Cao su mật độ cao	21	4,85		
Polyformaldehyd	144	1,30		
Egrodic cứng	177	4,65		
K82	1393	3,10		
Chất dẻo 4	67	5,00	0,80	5,0
FK 240	1158	2,40	1,34	1,87
AF - SAM	2687	2,9	1,02	2,1
Caprol	618	2,60	2,07	2,34
Polyamid	177	2,00	2,07	2,34

### 7.1.3. Tính mòn bậc 3

$$I_h = \frac{\operatorname{tg}\theta \cdot p_{dn}}{2(v+1)HB}; \quad \operatorname{tg}\theta = \frac{\epsilon h_{max}}{de/2} \quad (7.16)$$

Tổng quát:

$$I_h = \frac{\operatorname{tg}\theta \cdot p_{dn}}{2(v+1)n_m \cdot HB} \quad (7.17)$$

Công thức gần đúng như sau:

$$I_h = \frac{\alpha \cdot b \cdot h_{max} \cdot \epsilon^{v+1}}{n_m d_e (v+1)} \eta_{db/dn} \quad (7.18)$$

Tương ứng với  $n_m$  cho từng trường hợp như sau:

$$n_{m_{deo}} = \left( \frac{2r\epsilon_B}{d_{edeo}} \sqrt{\frac{100[\sigma] - 2\mu \cdot HB}{100[\sigma] + 2\mu \cdot HB}} \right)^t K_{tv} \quad (7.19)$$

$$n_{m_{dh}} = \left( \frac{\Pi r \sigma_B}{d_{edh} \cdot E_{td} \sqrt{[4\mu^2(1-v_p - v_p^2) + (1-2v_p)^2]v}} \right)^t K_{tv} \quad (7.20)$$

hoặc:

$$n_{m_{dh}} = \left( \frac{\Pi \cdot r \sigma_B}{2d_{edh} \mu (1+v_p) E_{td}} \right)^t K_{tv} \quad (7.21)$$

Trong đó:

$$K_{tv} = \frac{\Gamma(v + t/2)}{\Gamma(v) \Gamma(1 + t/2)} \quad (7.22)$$

$$d_{e_{dh}} = 2 \sqrt{\frac{h_{max} \cdot r}{v}} \cdot \epsilon_{dh} \quad (7.23)$$

$$d_{e_{deo}} = 2,828 \sqrt{\frac{h_{max} \cdot r \cdot \epsilon_{deo}}{v}} \quad (7.24)$$

$$\epsilon_{dh} = \left( \frac{2p_{dn} \Gamma(v + 2/3)}{E_{td} \cdot \eta_{db/dn} \Gamma(v + 1) b} \sqrt{\frac{\Pi \cdot r}{h_{max}}} \right)^{2/v+1} \quad (7.25)$$

$$\epsilon_{deo} = \left( \frac{p_{dn}}{HB \cdot \eta_{db/dn} \cdot b} \right)^{1/v} \quad (7.26)$$

và  $\alpha = 1$  đối với biến dạng dẻo;

$\alpha = 0,5$  đối với biến dạng đàn hồi.

### Thí dụ 7.1

Hãy tính cường độ mòn  $I_h$  ứng với mòn bậc 3:

Cho:  $\alpha = 0,75$ ;  $b = 3$ ;  $h_{max} = 0,6\mu m$

$$v = 2; \epsilon = 6,205 \cdot 10^{-2}$$

$$n_m = 16,62 \cdot 10^2$$

$$d_e = 1,494 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

$$\eta_{db/dn} = 7,42 \cdot 10^{-3}$$

Sử dụng công thức (7.18) có:

$$I_h = \frac{0,75 \cdot 3 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} (6,205 \cdot 10^{-2})^3 \cdot 7,42 \cdot 10^3}{16,62 \cdot 10^2 \cdot 1,494 \cdot 10^{-2} \cdot 3} = 3 \cdot 10^{-(3+8)}$$

$$I_h = 3,2 \cdot 10^{-11}$$

## 7.2. TÍNH MÒN TRÊN CƠ SỞ NĂNG LƯỢNG

Dựa vào mối liên hệ giữa năng lượng ma sát và mòn ta có thể tính mòn dựa trên cơ sở năng lượng mất mát do ma sát. Mối liên hệ giữa công ma sát và khối lượng mòn được viết như sau:

$$V_m = \frac{W_{ms}}{e_{ms}^*} \quad (7.27)$$

Trong đó:  $e_{ms}^*$  - năng lượng ma sát trên một đơn vị khối lượng mòn, gọi là mật độ năng lượng mòn. Từ quan hệ

$$\tau_{dn} = \mu p_{dn} \quad (7.28)$$

Trong đó:  $\mu$  - hệ số ma sát.

Cường độ mòn dạng đường tính theo phương pháp năng lượng là:

$$I_h = \frac{\tau_{dn}}{e_{ms}^*} \quad (7.29)$$

Thể tích mòn tổng cộng là:

$$V_m = V_{m1} + V_{m2} \quad (7.30)$$

Trong đó:  $V_{m1} + V_{m2}$  - khối lượng mòn của chi tiết 1 và 2.

Mật độ năng lượng mòn là:

$$\frac{1}{e_{ms}^*} = \frac{\alpha_1}{e_{ms1}^*} + \frac{\alpha_2}{e_{ms2}^*} \quad (7.31)$$

Cường độ mòn viết cho từng chi tiết là:

$$I_{h1} = \frac{\alpha_1 \tau_{dn}}{e_{ms1}^*} \quad (7.32)$$

$$I_{h2} = \frac{\alpha_2 \tau_{dn}}{e_{ms2}^*} \quad (7.33)$$

Cường độ mòn dạng đường của hệ ma sát là:

$$I_h = I_{h1} + I_{h2} \quad (7.34)$$

Trong đó:  $\alpha_1, \alpha_2$  - hệ số tương quan phủ kín của vật thể 1 và 2, phụ thuộc vào dạng hình học tiếp xúc của chúng.

## Thí dụ 7.2

Tính cường độ mòn của cặp ma sát trên cơ sở năng lượng cho:

$$e_{ms1}^* = 2,3 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2$$

$$e_{ms2}^* = 5 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2$$

$$\mu = 0,21; p_{dn} = 0,084 \text{ N/m}^2$$

*Giai:*

$$I_{h1} = \frac{1,0 \cdot 0,084 \cdot 0,21}{2,3 \cdot 10^6} = 7,67 \cdot 10^{-9}$$

$$I_{h2} = \frac{1,0 \cdot 0,084 \cdot 0,21}{5 \cdot 10^6} = 3,53 \cdot 10^{-8}$$

$$I_h = 4,297 \cdot 10^{-8}$$

## Chương 8

# MÒN CẶP CHUYỂN ĐỘNG TỊNH TIẾN ĐẢO CHIỀU

### 8.1. MỘT SỐ GIẢ THIẾT CHÍNH

a) Lượng mòn  $U$  của cặp ma sát chuyển động tịnh tiến đảo chiều phụ thuộc vào trị số áp suất  $p$  theo lũy thừa bậc  $m$  và được viết như sau:

$$U = Kp^m S_{ms} \quad (8.1)$$

Trong đó:  $K$  - hệ số mài mòn, theo Kragelski có:

$m = 1$  ứng với áp lực trung bình.

$m = 1 + \beta t$  ứng với áp lực nhỏ.

b) Áp suất phụ thuộc vào vị trí tiếp xúc:

$$p = f(x, y) \text{ tức là } U = U(x, y)$$

c) Bỏ qua sự phân phối lại của biểu đồ áp suất, do xuất hiện của hiện tượng mòn không đều.

d) Biết hàm mật độ phân phối đường ma sát.

### 8.2. XÂY DỰNG ĐỒ THỊ MÒN

Gọi  $U_1(x_1, y)$  và  $U_2(x_2, y)$  là lượng mòn chi tiết 1, 2 trong đó  $x_1$  là tọa độ cho chi tiết 1, và  $x_2$  là tọa độ cho chi tiết 2; Tọa độ  $y$  được lấy gốc chung cho cả chi tiết 1 và 2.

$L$  - khoảng lớn nhất để chi tiết (1) có thể chuyển động trên chi tiết (2).

$L_o$  - chiều dài của chi tiết (1).

$p = f(x_1, y)$  - biểu đồ phân phối áp suất của chi tiết (1) trên chi tiết (2).

$K_1, K_2$  - hệ số mòn của vật liệu chi tiết (1) và (2) giả sử trên chi tiết (1) luôn chịu áp suất phân bố  $p = f(x_1, y)$ .

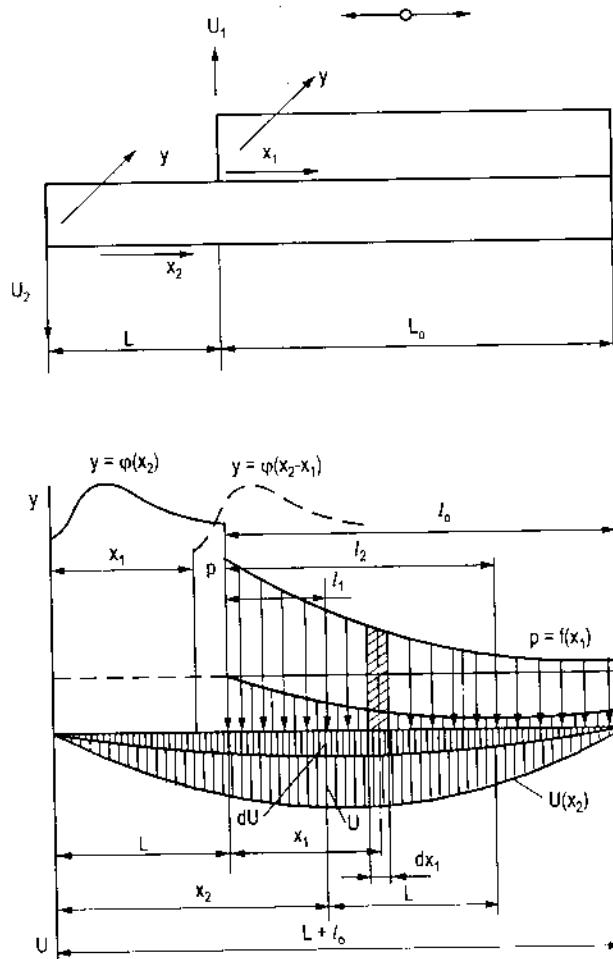
Lượng mòn sẽ là:

$$U_1(x_1, y) = K_1 S_{ms1} f^m(x_1, y) \quad (8.2)$$

Tại  $y_o$  ta có:  $p = f(x_1, y_o)$

$$U_1 = U_1(x_1, y_o) \quad (8.3)$$

$$U_2 = U_2(x_2, y_o)$$



**Hình 8.1: Đồ thị phân bố mòn cặp chuyển động tịnh tiến đảo chiều**

Để xác định lượng mòn  $dU$  dưới tác dụng của áp lực  $pdx_1$ , cần phải xác định quãng đường ma sát đi qua nó, khi làm mòn chi tiết (2) có hoành độ  $x_2$ . Gọi  $Y = \phi(x_2)$  ứng với điểm cận trái của chi tiết (1),  $x_1 = 0$  khi chuyển đến điểm  $x_1$ , hàm mật độ có dạng:

$$Y = \phi(x_2 - x_1) \quad (8.4)$$

Vì phân của lượng mòn tại  $x_2$  dưới tác dụng của phân bố áp lực  $pdx_1$  là:

$$dU = K_2 S_{ms} \phi(x_2 - x_1) f^m(x_1, y) dx_1 \quad (8.5)$$

Khi  $y$  biến đổi trong khoảng xác định ứng với chiều rộng ma sát, có:

$$U_2(x_2, y) = K_2 S_{ms} \int_{l_1(x_2)}^{l_2(x_2)} \phi(x_2 - x_1) f^m(x_1, y) dx_1 \quad (8.6)$$

Trong đó:  $S_{ms} \phi(x_2 - x_1)$  là quãng đường ma sát đi qua điểm có tọa độ  $x_2$ .

Trong trường hợp diện tích tiếp xúc thay đổi.

Áp lực phân phoi trên bề mặt tiếp xúc còn phụ thuộc vào  $x_2$ , có:

$$U_2 = U_2(x_2, y) = K_2 S_{ms} \int_{l_1(x_2)}^{l_2(x_2)} \varphi(x_2 - x_1) f^m(x_2, y, x_1) dx_1 \quad (8.7)$$

Trong đó cận tích phân  $l_1(x_2)$  và  $l_2(x_2)$  được xác định theo từng trường hợp cụ thể. Nếu diện tích tiếp xúc không đổi chúng phụ thuộc vào tỉ lệ tiếp xúc  $L/L_o$  và đoạn khảo sát. Trong trường hợp này, được cho theo bảng (8.1).

**Bảng 8.1. Cận tích phân**

$L/l_o$	Khoảng	Giới hạn	$l_1$	$l_2$
$> 1$	I	$0 \leq x_2 \leq l_o$	0	$x_2$
	II	$l_o \leq x_2 \leq L$	0	$l_o$
	III	$L \leq x_2 \leq l_o + L$	$x_2 - L$	$l_o$
$< 1$	I	$0 \leq x_2 \leq L$	0	$x_2$
	II	$L \leq x_2 \leq l_o$	$x_2 - L$	$x_2$
	III	$l_o \leq x_2 \leq l_o + L$	$x_2 - L$	$l_o$

Kí hiệu hàm dưới dấu tích phân:

$$F(x_2, y, x_1) = \varphi(x_2 - x_1) f^m(x_2, y, x_1) \quad (8.8)$$

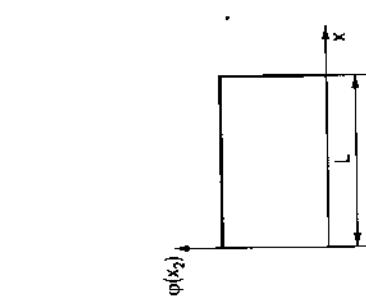
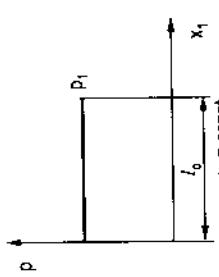
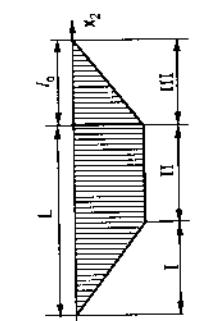
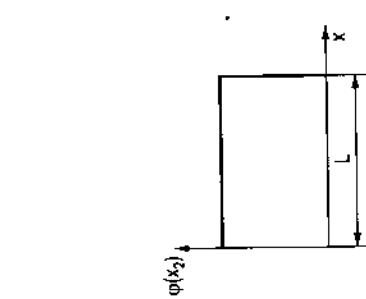
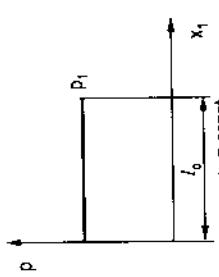
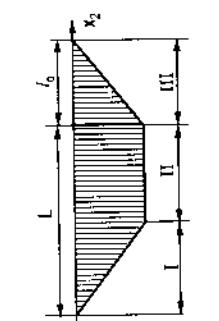
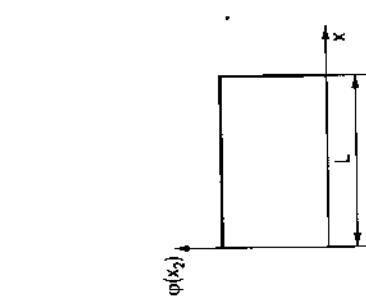
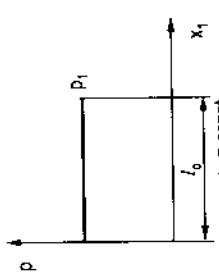
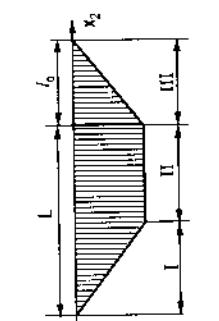
hàm  $F(x_2, y, x_1)$  là một hàm liên tục, trong miền kín, có đạo hàm riêng:

$$\frac{\partial F}{\partial x_2}; \quad \frac{\partial F}{\partial y}; \quad \frac{\partial F}{\partial x_1} \quad (8.9)$$

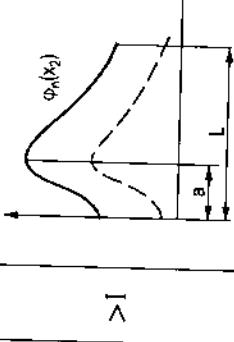
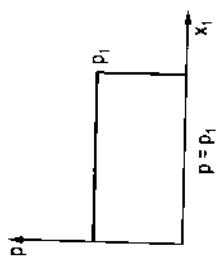
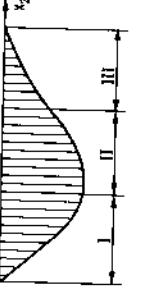
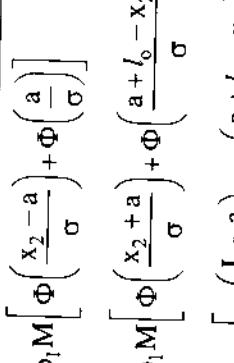
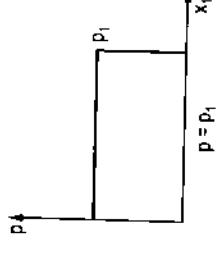
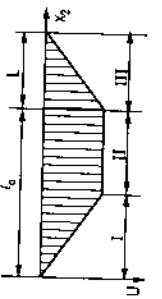
Lượng mòn đối với chi tiết (2) là:

$$U_2 = K_2 S_{ms} \int_{l_1(x_2)}^{l_2(x_2)} \varphi(x_2 - x_1) f^m(x_1, y) dx_1 \quad (8.10)$$

Bảng 8.2. Trình bày một số ví dụ về mòn của chi tiết

$\frac{L}{l_o}$	Hàm phân phối mật độ quang đường ma sát	Hàm phân phối áp lực $p_1$	Biểu đồ mòn	Khoảng	Phương trình tính
$\frac{L}{l_o} < 1$				I II III	$ksp_1 \frac{x_2}{L}$ $ksp_1 \frac{l_2}{L}$ $ksp_1 \frac{1}{L} (L + l_o - x_2)$
$\frac{L}{l_o} = 1$				I II III	$ksp_1 \frac{x_2^2}{2Ll_o}$ $ksp_1 \frac{l_o}{2L}$ $ksp_1 \frac{1}{2Ll_o} [l_o^2 - (x_2 - L)^2]$
$\frac{L}{l_o} > 1$				I II III	$ksp_1 \frac{1}{L^2} (2Lx_2 - x_2^2)$ $ksp_1 \frac{l_o}{L^2} (2L + l_o - 2x_2)$ $ksp_1 \frac{1}{L^2} (L + l_o - x_2)^2$

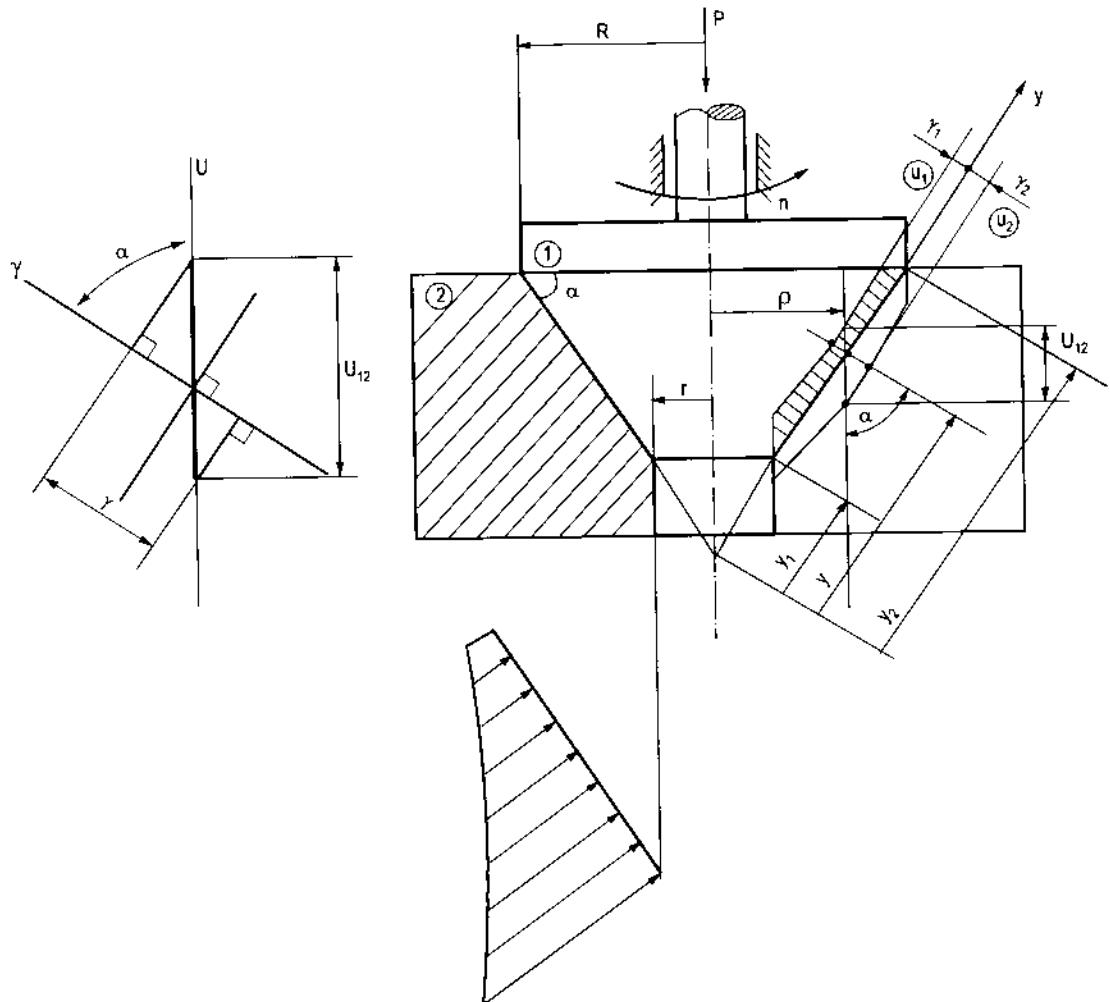
Bảng 8.2. (tiếp theo)

$\frac{L}{l_o}$	Hàm phân phối mặt độ quang đường ma sát	Hàm phản phối áp lực $p_1$	Biểu đồ mòn	Khoảng	Phương trình tính
$>1$				I II III	$U(x) = k \int_{l_1}^{l_2} \phi(x_2 - x_1) f(x_1) dx_1$ $ksp_1 M \left[ \Phi\left(\frac{x_2 - a}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right) \right]$ $ksp_1 M \left[ \Phi\left(\frac{x_2 + a}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{a + l_o - x_2}{\sigma}\right) \right]$ $ksp_1 M \left[ \Phi\left(\frac{L - a}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{a + l_o - x_2}{\sigma}\right) \right]$
$< 1$				I II III	$\frac{ksp_1}{2L} x_2$ $ksp_1$ $\frac{ksp_1}{L} (l_o + L - x_2)$ $\frac{ksp_2}{2Ll_o} x_2^2$ $\frac{ksp_2}{2l_o} (2x_2 - L)$ $\frac{ksp_2}{2l_o} [(l_o^2 - (x_2 - L)^2)]$

Bảng 8.2. (tiếp theo)

$\frac{L}{l_o}$	Hàm phân phối quang đường ma sát	Hàm phân phối áp lực $p_1$	Biểu đồ mòn	Khoảng	Phương trình tính
$< 1$			$\varphi(x) = \frac{2}{L}x_2$	I II III	$U(x) = k \int_{l_i}^{l_2} \varphi(x_2 - x_i) f(x) x_i$ $\frac{ksp_1}{l^2} x_2^2$ $\frac{ksp_1}{L^2} [L^2 - (x_2 - l_o)^2]$
		$p = p_1$	$\varphi(x) = \sqrt{l_o^2 - (x_2 - l_o)^2}$	I II III	$\frac{ksp_1}{l_o^2} x_2^3$ $\frac{ksp_1}{l_o} (x_2 - \frac{2}{3}L)$ $\frac{ksp_1}{3L l_o} [3(L^2 + l_o^2)x_2 - x_2^3 - 2l_o^3 - 2L^3]$

### 8.3. THÍ DỤ TÍNH MÒN CẶP CHI TIẾT CÓ $k_{pk} = 1$



Hình 8.2

Cho: R, r, P,  $\alpha$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ , n. Hãy xác định lượng mòn theo phương đặt lực P,  $U_p$ .

*Giải:* Giả sử quy luật mòn tuân theo quy luật Krutsöp:

Có:  $\dot{U} \rightarrow \dot{\gamma} = k \cdot p \cdot v$

$$p \rightarrow v = 2\pi\rho \cdot n = 2\pi n y \cos \alpha \quad (1)$$

$$\rho \rightarrow \rho = y \cos \alpha \quad (2)$$

$$\dot{\gamma}_1 = k_1 p \cdot 2\pi n y \cos \alpha \quad (3)$$

$$\dot{\gamma}_2 = k_2 p \cdot 2\pi n y \cos \alpha \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}_{1,2} = \dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2 = (k_1 + k_2) p \cdot 2\pi n y \cos \alpha$$

$$U_{1,2} = \frac{\dot{\gamma}_{1,2}}{\cos \alpha} = (k_1 + k_2) p \cdot 2\pi n \cdot y \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha} \quad (5)$$

$$\dot{U}_{1,2} = (k_1 + k_2) \cdot p \cdot 2\pi \cdot ny$$

$$p = \frac{\dot{U}_{1,2}}{2\pi n(k_1 + k_2)} \cdot \frac{1}{y} \quad (6)$$

Giả sử rằng  $\dot{U}_{1,2}$  bằng hằng số tại mọi tiết diện p sẽ phân bố theo luật hyperbolic.

Xác định p:

$$p = \int_s p \cos \alpha dS = 2\pi \int_{y_1}^{y_2} p \cos \alpha \rho dy$$

$$p = 2\pi \cos^2 \alpha \int_{y_1}^{y_2} p dy \quad (7)$$

$$y_1 = \frac{r}{\cos \alpha}; \quad y_2 = \frac{R}{\cos \alpha}; \quad \rho = y \cos \alpha \quad (8)$$

Thay p từ (6) vào (7) và tích phân:

$$\dot{U}_{1,2} = \frac{p \cdot n(k_1 + k_2)}{(R - r) \cos \alpha} \quad (9)$$

Thay (9) vào (6):

$$p = \frac{P \cdot n(k_1 + k_2)}{(R - r) \cos \alpha (k_1 + k_2) 2\pi n} \cdot \frac{1}{y}$$

$$p = \frac{p}{2\pi(R - r) \cos \alpha} \cdot \frac{1}{y} \quad (10)$$

Thay (10) vào (3):

$$\gamma_1 = \dot{\gamma}_1 \cdot t = k_1 \frac{p \cdot n}{R - n} t \quad (11_1)$$

$$\gamma_2 = \dot{\gamma}_2 \cdot t = k_2 \frac{p \cdot n}{R - n} t \quad (11_2)$$

$$U_{1,2} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\cos \alpha} = \frac{p \cdot n(k_1 + k_2)}{(R - r) \cos \alpha} \cdot t \quad (12)$$

## Chương 9

# **ĐẶC TRUNG ĐỘ TIN CẬY VÀ TUỔI THỌ CỦA CẶP MA SÁT**

Trong quá trình sử dụng, do thay đổi chế độ mòn và ma sát dẫn tới thay đổi đặc trưng hình học vĩ mô và vi mô cũng như tính chất của vật liệu.

Quá trình này được mô tả bằng nhiều đặc trưng trong thời gian làm việc, đặc trưng gây ra hỏng và giảm tuổi thọ của sản phẩm, mà nguyên nhân chủ yếu là mòn cùp ma sát.

### **9.1. ĐẶC TRUNG ĐỘ TIN CẬY (ĐTC) CỦA CẶP MA SÁT**

ĐTC trong cùp ma sát nói riêng, trong kỹ thuật nói chung bao gồm:

Đối tượng đặc trưng quan trắc

Trạng thái và sự xuất hiện ngẫu nhiên.

Tính chất và độ lớn của độ tin cậy.

**Bảng 9.1**

Quan trắc	Sự xuất hiện	Tính chất	Độ tin cậy
Chi tiết	Trạng thái	Độ tin cậy	Xác suất hỏng
Cụm chi tiết	Khả năng hoạt động	Hỏng	Xác suất không hỏng
Hệ thống	Khả năng làm việc	Vận tải	Cường độ hỏng
Sửa chữa được	Sai sót	Sửa chữa	Tuổi thọ %
Không sửa được	Sự cố, hỏng	Bảo dưỡng	Khả năng thay thế, bảo dưỡng

Dự báo cần phải chỉ ra được đặc trưng hỏng của cùp ma sát từ lần hỏng đầu tiên, hay trạng thái giới hạn khẳng định, từ đó xác định, đánh giá khả năng sửa chữa hay thay thế (không phục hồi).

Độ tin cậy và tuổi thọ của sản phẩm là một đặc trưng quan trọng chưa đựng:

- Khả năng có sự cố hỏng hóc, sai sót;
- Kéo dài tuổi thọ;
- Khả năng sửa chữa;
- Khả năng vận tải, thay thế, bảo dưỡng.

## 9.2. ĐỊNH NGHĨA ĐỘ TIN CẬY CỦA CẶP MA SÁT

- + Độ tin cậy được định nghĩa như sau:
- Ở điều kiện làm việc và môi trường xác định;
- Thời gian làm việc xác định.
- Giới hạn xác định của chỉ tiêu vật lí kỹ thuật (thí dụ như lượng mòn là nguyên nhân gây ra hỏng) thì độ tin cậy được xác định bằng 4 chỉ tiêu chính sau:

1.  $R(t)$  xác suất không hỏng trong thời gian hoạt động ( $t$ ).

2.  $F(t)$  xác suất hỏng trong thời gian hoạt động ( $t$ ).

$$\text{Tổng cộng: } R(t) + F(t) = 1 \quad (9.1)$$

$$3. \text{Cường độ hỏng: } \lambda(t) \quad (9.2)$$

là xác xuất hỏng của đối tượng quan trắc, chi tiết trong thời gian  $\Delta t$ .

$$4. \text{Thời gian trung bình: } E(t) = \bar{t} \quad (9.3)$$

Thời gian trung bình làm việc của các chi tiết trong thời gian hay trong tổng thể làm việc như nhau, từ lần hỏng đầu tiên của mọi quan trắc.

Bảng 9.2

	Độ tin cậy	
	Lý thuyết	Thực nghiệm
Mật độ phân phối hỏng	$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$	$f(t) \approx \frac{\Delta_n(t)}{N_o^* \Delta t}$
Xác suất không hỏng	$R(t) = \int_t^\infty f(t)dt$	$R(t) = \frac{N(t)}{N_o}$
Xác suất hỏng	$F(t) = 1 - R(t)$	$F(t) = 1 - \frac{N(t)}{N_o} \approx \frac{n(t)}{N_o}$
Cường độ hỏng	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	$\lambda(t) = \frac{\Delta_n(t)}{\Delta t^* N(t)}$
Thời gian trung bình đến lần hỏng đầu tiên	$t_1 = \theta_1 = \int_0^\infty R(t)dt$	$t_1 = \theta_1 = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} t_i$

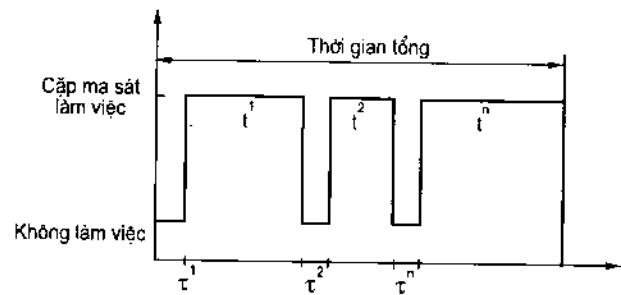
trong đó:  $N_o$  - tổng số chi tiết thí nghiệm;

$N(t)$  - số lượng chi tiết không hỏng;

$\Delta_n(t)$  - số lượng chi tiết hỏng trong thời gian  $\Delta t$ ;

$n(t)$  - số lượng chi tiết hỏng.

**Hình 9.1:** Tổng hợp sự phân phối thời gian



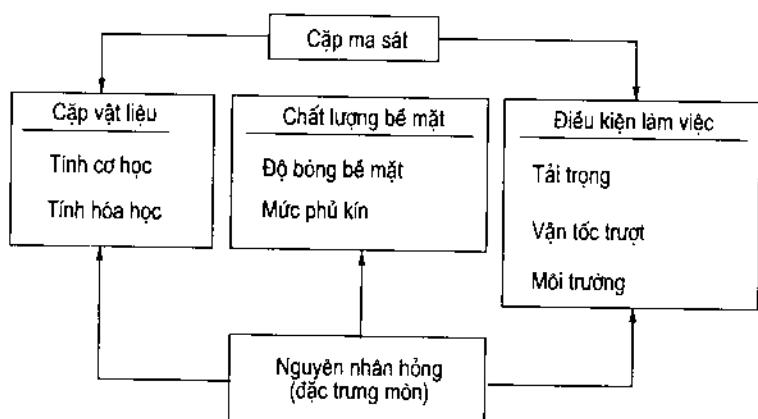
t<sub>1</sub>... t<sub>n</sub> thời gian sử dụng.

τ<sub>1</sub>... τ<sub>n</sub> thời gian tĩnh (không sử dụng).

$$t_{\text{tt}} = \sum_{i=1}^n (\tau_i + t_i) \quad (\text{thời gian tồn tại}). \quad (9.4)$$

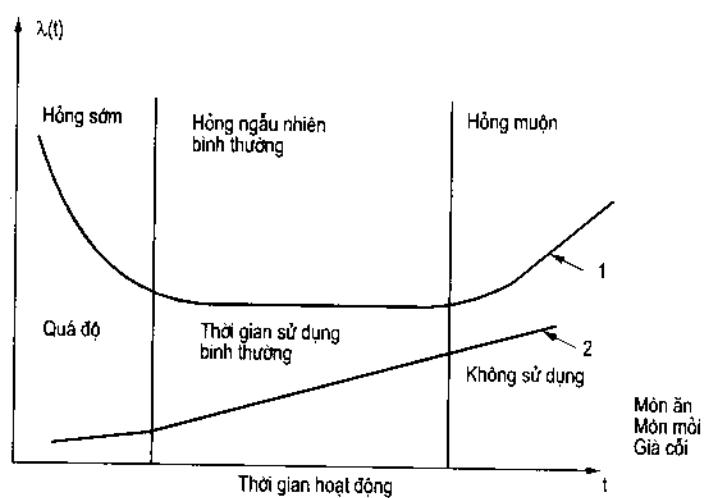
$$t_{\text{hq}} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (\text{thời gian hiệu quả (làm việc)}). \quad (9.5)$$

### 9.3. NGUYÊN NHÂN GÂY HỒNG CẶP MA SÁT



**Hình 9.2:** Cường độ λ(t)

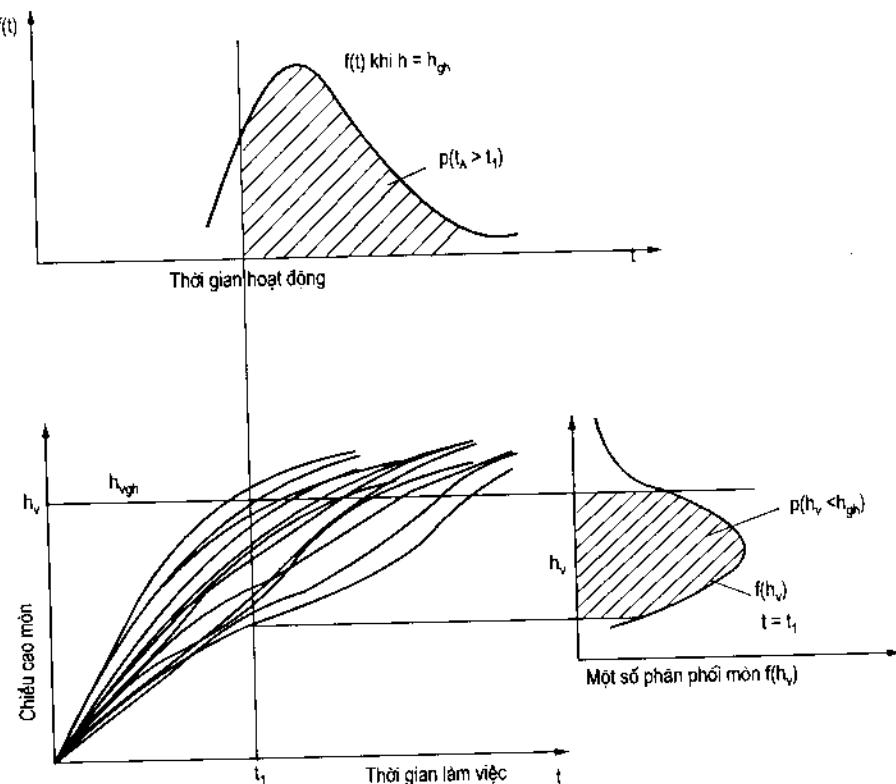
1. Quá trình lí tưởng;
2. Quá trình nhóm chi tiết không hổng sóm.



## 9.4. HIỆN TƯỢNG MÒN

### 9.4.1. Phân phối hỏng

Độ cao mòn  $h_v(t)$  được đặc trưng bằng họ đường cong, trong đó mỗi một đường cong có một xác suất nhất định ứng với điều kiện đã cho. Điều cần quan tâm là những giá trị vượt qua mức giới hạn định trước (hình 9.3).



**Hình 9.3: Phân phối hỏng của cắp ma sát**

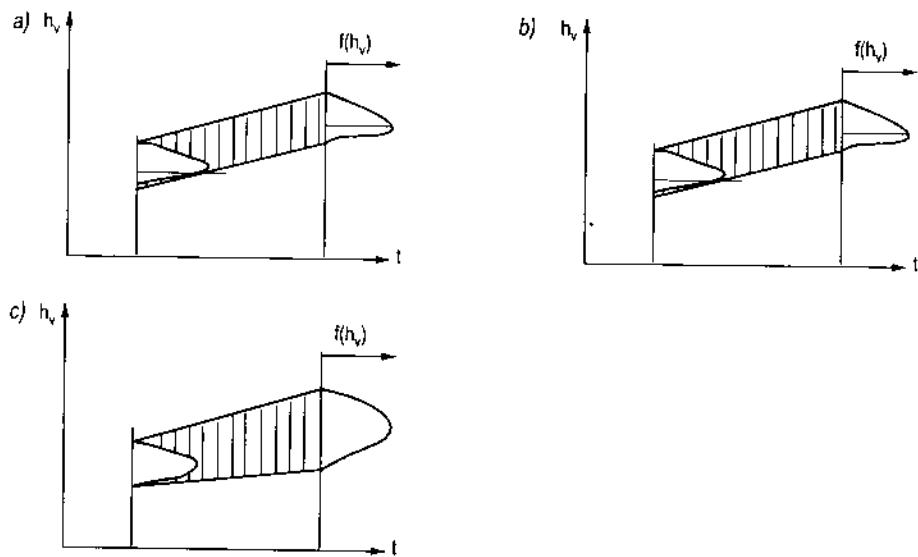
Hình 9.3 biểu thị quá trình mòn ngẫu nhiên, đại lượng này có mật độ phân phối là  $f(h_v)$  tại mỗi thời điểm  $t = \text{const}$ . Và  $h_{gh} = \text{const}$ , ta có hàm mật độ của đại lượng ngẫu nhiên là  $f(t)$ .

Diện tích phân gạch chéo dưới hình 9.3,  $f(h_v)$  chính là xác suất không hỏng tại thời điểm  $t$ , còn phần diện tích gạch chéo  $f(t)$  là khi  $T > t_1$  chính là xác suất hỏng do mòn  $t$ .

$$\text{Và xác suất không hỏng: } P(h_v < h_{gh}) \text{ hay } P(T > t_1) \quad (9.6)$$

### 9.4.2. Các dạng phân phối của $f(h_v)$

Khả năng phân phối của  $f(h_v)$  có ba dạng chính sau:



**Hình 9.4:** Các dạng phân phối của  $f(h_v)$

$$\text{Phương sai: } D^2(h_v(t)) = D^2(h_{vE}) + D^2(\dot{h}_v)^* t^2 \quad (9.7)$$

$$D^2(h_v(t)) = B + At \text{ (coi như tuyến tính)} \quad (9.8)$$

$$\sigma_{hv} = \sqrt{D^2(h_v)} \quad (9.9)$$

coi  $\sigma_{hv}$  như là độ lệch chuẩn của  $h_v(s)$ .

#### 9.4.3. Hệ số biến đổi 9

Hệ số biến đổi 9 xác định qua thực nghiệm, và được viết như sau:

$$9(h_v) = \frac{S(h_v)}{h_v} \quad (9.10)$$

**Bảng 9.3** Hệ số 9 ( $h_v$ ) - trị số kinh nghiệm

Cặp mòn	Điều kiện làm việc	Hệ số $v(h_v)$
Giấy mài/thép		0,023...0,045
Thép/thép + cát		0,01...0,05
Thép/Vật liệu ma sát		0,11...0,19
AlSi - /GGL		
AlSi-/HB 77		
HB 92	Máy thử nghiệm	
HB 129		
Đồng/thép		
Xy lanh	Máy làm việc	0,31...0,63
Vòng găng		0,16...0,44

Và hệ số v đổi với tốc độ mòn  $\vartheta(\dot{h}_v)$  trong khoảng 0,45 ... 0,9;

Đối với vòng găng  $\vartheta(\dot{h}_v) \approx 0,38 \dots 0,44$

Thông thường khoảng  $\vartheta(\dot{h}_v) = 0,2 \dots 0,4$

$$P(t \leq t) = F(t) \quad (9.11)$$

$$t_{tb} \frac{\dot{h}_{vh}}{\dot{h}_v} \quad (9.12)$$

$$\dot{h}_v = E(\dot{h}_v) \quad (9.13)$$

$V(t) = 0,12 \dots 0,4$

**Thí dụ 9.1** Cho  $t_{tb} = 10000$  (h);  $\sigma(t) = 1340$  (h)

$$\text{Ta có: } \vartheta(t) = \frac{\sigma(t)}{t_{tb}} = 0,13$$

#### 9.4.4. Tiêu chuẩn đánh giá hỏng

Tiêu chuẩn đánh giá sự cố hỏng - có thể được mô tả qua giá trị giới hạn của tiêu chuẩn, cơ điện, nhiệt...

Từ đó xác suất xảy ra sự cố hỏng là:

$$F(t) = \int_0^t \frac{\partial q}{\partial t} dt = \int_0^t \frac{\partial q}{\partial (\Delta x)} \frac{\partial (\Delta x)}{\partial t} dt \quad (9.14)$$

trong đó:  $\Delta x$  - tính chất đặc trưng của cơ nhiệt điện;

$\frac{\partial q}{\partial (\Delta x)}$  - phụ thuộc vào hình dáng, vật liệu cắp ma sát;

$\frac{\partial (\Delta x)}{\partial t}$  - tốc độ thay đổi, phụ thuộc quá trình hỏng, sự cố nếu biến đổi thành năng lượng.

$$\Delta x = \sum_i^K \Delta x_i = \Delta x_{co} + \Delta x_{nhiệt} + \Delta x_{hóa} \quad (9.15)$$

xác suất hỏng sẽ là:

$$\begin{aligned} F(t) &= \int_0^t \frac{\partial q}{\partial (\Delta x_{co})} \left[ \sum_1^{K_{co}} \frac{\partial (\Delta x_{co})}{\partial t} \right] dt + \\ &+ \int_0^t \frac{\partial q}{\partial (\Delta x_{nhiệt})} \left[ \sum_1^{K_{nhiệt}} \frac{\partial (\Delta x_{nhiệt})}{\partial t} \right] dt + \\ &+ \int_0^t \frac{\partial q}{\partial (\Delta x_{hóa})} \left[ \sum_1^{K_{hóa}} \frac{\partial (\Delta x_{hóa})}{\partial t} \right] dt + \dots \end{aligned} \quad (9.16)$$

và

$$\lambda(t) \approx \frac{\partial F(t)}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial(\Delta x)} \frac{\partial(\Delta x)}{\partial t} \lambda(t) = \frac{\partial q}{\partial(\Delta x_{co})} \left[ \sum_1^{K_{co}} \frac{\partial(\Delta x_{co})}{\partial t} \right] + \\ + \lambda \frac{\partial q}{\partial(\Delta x_{nhiet})} \left[ \sum_1^{K_{nhiet}} \frac{\partial(\Delta x_{nhiet})}{\partial t} \right] + \lambda \frac{\partial q}{\partial(\Delta x_{hoa})} \left[ \sum_1^{K_{hoa}} \frac{\partial(\Delta x_{hoa})}{\partial t} \right] + \dots$$

Chính là hàm dưới dấu tích phân của  $F(t)$ .

#### Bảng 9.4. Xác định độ tin cậy theo hỏng, sự cố do mòn.

#### Các thông số chính độ tin cậy theo phân phối xác suất

Phân phối	Chuẩn	Weibull
Mật độ phân bố thời điểm hỏng		
$f(t)$	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_{tb})^2}{2\sigma^2}}$	$f(t) = \alpha * \lambda * t^{\alpha-1} e^{-\lambda t^\alpha}$
$R(t)$	$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{(t-t_{tb})^2}{2\sigma^2}} dt$	$R(t) = e^{-\lambda t^\alpha}$
$F(t)$	$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^\infty e^{-\frac{(t-t_{tb})^2}{2\sigma^2}} dt$	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t^\alpha}$
$\lambda(t)$	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	$\lambda(t) = \alpha * \lambda * t^{\alpha-1}$
$t_{tb}$	$t_{tb}$ tại $R = 50\%$	$t_{tb} = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)}{\lambda^{1/\alpha}}$

Với phân phối mũ:

$$f(t) = \lambda * e^{-\lambda t}; R(t) = e^{-\lambda t}; F(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \lambda = \text{hằng số}; t_{tb} = \frac{1}{\lambda};$$

Tương quan độ tin cậy của chi tiết máy, máy do mòn, hầu hết tuân theo phân phối chuẩn và phân phối Weibull.

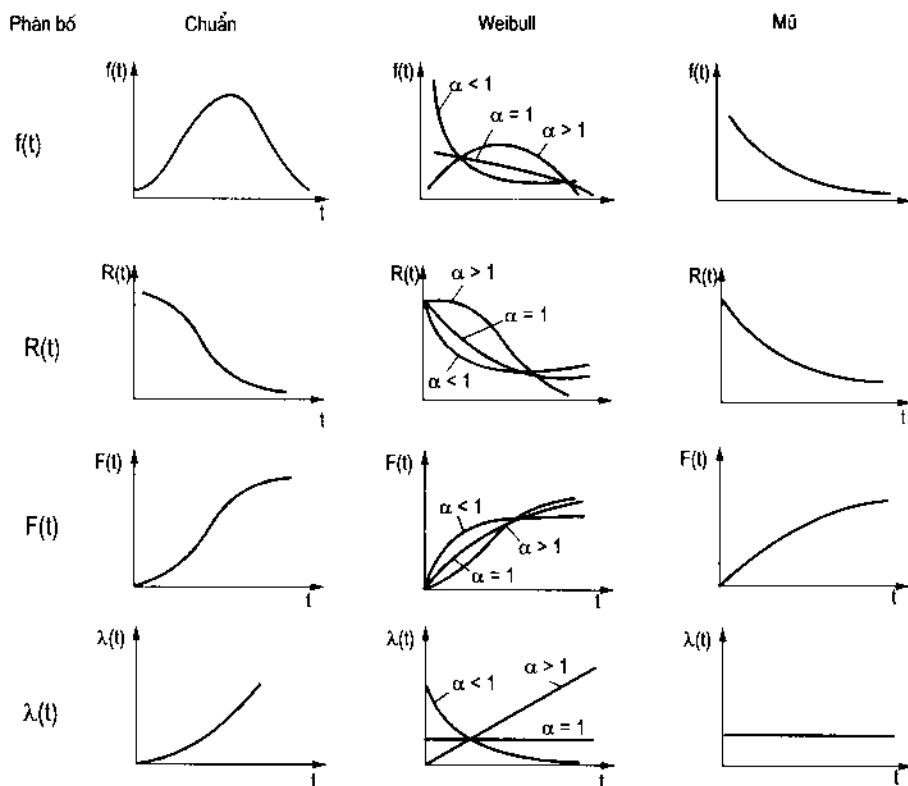
Khi  $\alpha = 1 \rightarrow$  các thông số sẽ chuyển từ phân phối Weibull sang phân phối mũ.

Phân phối Weibull thường được để nghiên cứu, tính toán, thiết kế độ tin cậy, tuổi thọ của ổ lăn.

Khi đó:

$$t_{tb} = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)}{\lambda^{1/\alpha}} ; \sigma = \frac{1}{\lambda^{1/\alpha}} \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \quad (9.17)$$

$$v = \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \quad (9.18)$$



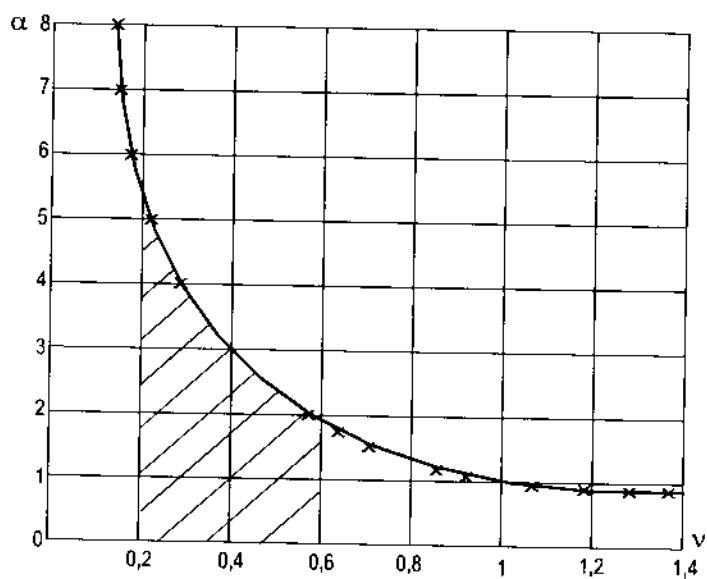
**Hình 9.5:** Sự phụ thuộc các thông số độ tin cậy vào các thời gian làm việc

$$\Gamma(x) = \frac{\Gamma(x+1)}{x} \quad \text{khi } x < 1$$

$$\Gamma(x) = (x-1)\Gamma(x-1) \quad \text{khi } x > 2$$

Chú ý:  $\Gamma(1) = 1$ ,  $\Gamma(2) = 1$ ;  $\Gamma(1,46) = 0,88560 \rightarrow$  nhỏ nhất trong  $\Gamma(1)$  và  $\Gamma(2)$

$$v = \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}$$



**Hình 9.6:** Phụ thuộc của  $\alpha$  trong phân bố Weibull vào hệ số  $\vartheta$

#### 9.4.5. Trình tự xác định tham số $\alpha$

Từ số liệu ban đầu:

- Xác định thời gian hỏng  $t_i$ ,  $N_o$ ,  $F(t)$  bằng số liệu thực nghiệm.
- Đặt  $F(t)$  vào giấy phân phối Weibull.
- Xem các điểm gần đường thẳng.
- Xác định thông số  $\alpha$  và  $\lambda$ .
- Đánh giá phân phối theo thông số  $\alpha$ .

**Bảng 9.5**

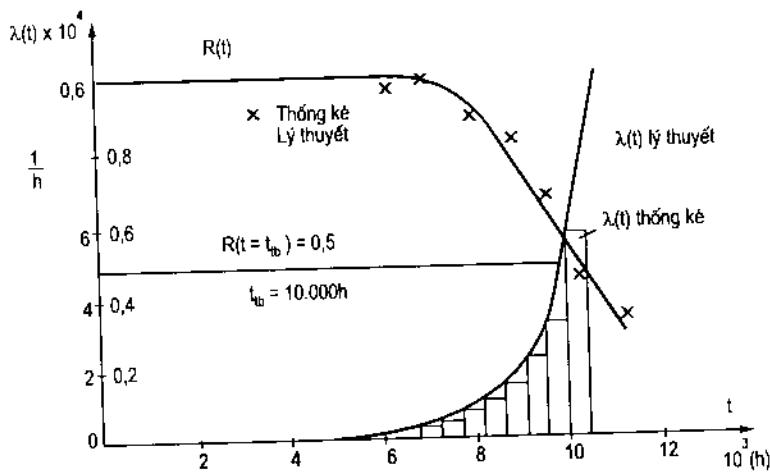
$0 < \alpha \leq 0,95$	$0,95 < \alpha \leq 1,1$	$1,1 < \alpha \leq 2,9$	$2,9 < \alpha \leq 4$	$4 < \alpha$
Hỏng sớm	HỎNG NGẪU NHIÊN	HỎNG MUỘN	HỎNG MUỘN	HỎNG MUỘN
Phân phối Weibull	Phân phối mũ	Phân phối Weibull	Phân phối chuẩn	Phân phối Weibull

#### 9.4.6. Ứng dụng khi mòn tuân theo phân phối chuẩn

$$\varphi(x) = \varphi(x) \triangleq f(t)$$

$$\phi(-x) = 1 - \phi(x) \text{ tương ứng } \phi(x) \triangleq F(t)$$

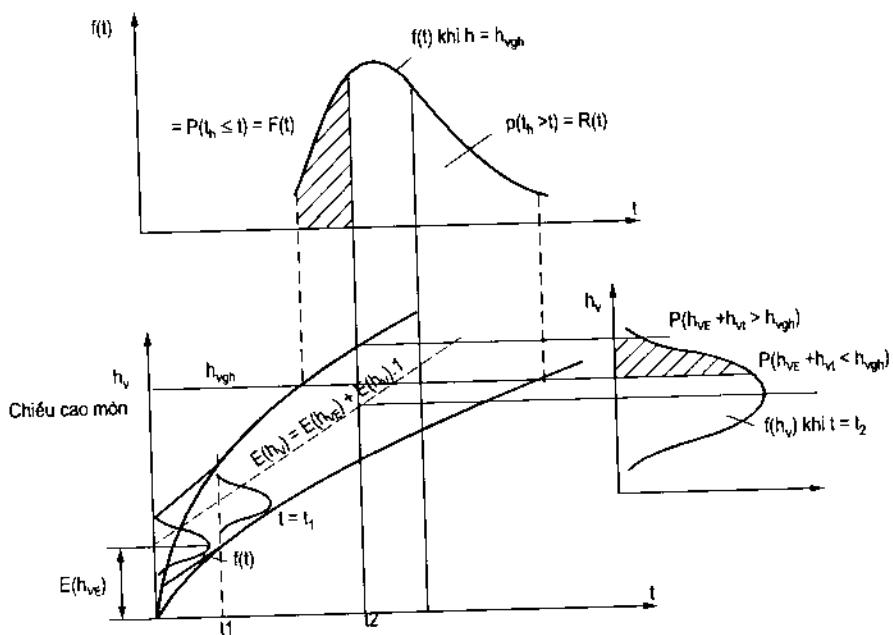
$$\phi(-x) \triangleq R(t)$$



Hình 9.7:  $R(t)$ ,  $\lambda(t)$  của vòng gãng động cơ diesel

#### 9.4.7. Xác định độ tin cậy theo mòn

Bao gồm: chiều cao mòn, khối lượng mòn, tốc độ và cường độ mòn



Hình 9.8

$$h_v(t) = h_{vE} + \dot{h}_v t \quad (9.19)$$

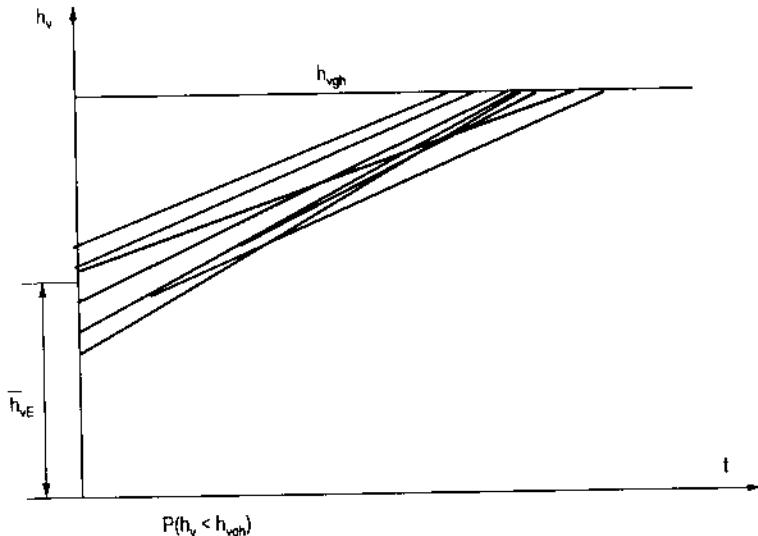
nếu không có mòn ban đầu:  $h_{vE} = 0$

$$h_v(t) = \dot{h}_v t$$

Đối với tốc độ mòn: ví dụ khi  $h_{VE} = 0$  có:

$$f(h_v) = \frac{1}{\sqrt{D^2(h_v)2\pi}} \exp\left[-\frac{[h_v - E(h_v)]^2}{2D^2(h_v)}\right] \quad (9.20)$$

$$f(\dot{h}_v) = \frac{1}{\sqrt{D^2(\dot{h}_v)2\pi}} \exp\left[-\frac{[\dot{h}_v - E(\dot{h}_v)]^2}{2D^2(\dot{h}_v)}\right] \quad (9.21)$$



**Hình 9.9**

$$\phi(h_v; E(h_v); D^2(h_v)) = \int_{-\infty}^{h_{gh}} \frac{1}{D^2(h_v)2\pi} \exp\left[-\frac{[h_v - E(h_v)]^2}{2D^2(h_v)}\right] dh_v \quad (9.22)$$

Kì vọng toán học:

$$E(h_v(t)) = E(h_{VE}) + E(\dot{h}_v)t \quad (9.23)$$

Phương sai:

$$D^2(h_v(t)) = D^2(h_{VE}) + D^2(\dot{h}_v)t^2 \quad (9.24)$$

Xác suất không hỏng:

$$p(t_h \leq t) = P(h_{VE} + \dot{h}_{VE}t \geq h_{gh}) \quad (9.25)$$

$$\text{nếu } \dot{h}_v > 0; \quad h_{gh} > h_{VE} > 0 \quad (9.26)$$

Hàm mật độ phân bố thời gian hỏng:

$$f(t) = \frac{h_{gh} - E(h_{VE})D^2(\dot{h}_v)t + E(\dot{h}_v)D^2(h_{VE})}{\sqrt{2\pi} (D^2(h_{VE}) + D^2(\dot{h}_v)t^2)^{3/2}} e^{-\frac{1}{2} \frac{[E(h_{VE}) + E(\dot{h}_v)t - h_{gh}]^2}{D^2(h_{VE}) + D^2(\dot{h}_v)t^2}} \quad (9.27)$$

$$F(t) = \phi \left[ \frac{E(h_{VE}) + E(\dot{h}_V)t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(h_{VE}) + D^2(\dot{h}_V)t^2}} \right] \quad (9.28)$$

$$R(t) = 1 - F(t)$$

$$R(t) = \phi \left[ \frac{-E(h_{VE}) - E(\dot{h}_V)t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(h_{VE}) + D^2(\dot{h}_V)t^2}} \right] \quad (9.29)$$

Tính theo thể tích có:

$$F(t) = \phi \left[ \frac{E(V_{VE}) + E(\dot{V}_V)t - V_{Vgh}}{\sqrt{D^2(V_{VE}) + D^2(\dot{V}_V)t^2}} \right] \quad (9.30)$$

$$R(t) = \phi \left[ \frac{-E(V_{VE}) - E(\dot{V}_V)t - V_{Vgh}}{\sqrt{D^2(V_{VE}) + D^2(\dot{V}_V)t^2}} \right] \quad (9.31)$$

Thử phân bố chuẩn - trên lưới xác suất giấy số 500.

Xác định giá trị:  $\bar{h}_{VE}$  là kỳ vọng  $E(h_{VE})$  (9.32)

$\dot{h}_V$  là kỳ vọng  $E(\dot{h}_{VE})$

$S_{h_{VE}}^2$  là phương sai  $D^2(h_{VE})$

$S_{\dot{h}_{VE}}^2$  là phương sai  $D^2(\dot{h}_{VE})$

trong đó:  $\bar{h}_{VE} = \frac{\sum_{i=1}^{N_o} h_{VEi}}{N_o}$  (9.33)

$$S_{h_{VE}}^2 = \frac{1}{N_o - 1} \sum_{i=1}^{N_o} (h_{VEi} - \bar{h}_{VE})^2 \quad (9.34)$$

#### 9.4.8. Thông số hỏng của các dạng mòn tuyến tính khác nhau

$$(1) \begin{cases} E(h_V(t)) = E(h_{VE}) + E(\dot{h}_V)t \\ D^2(h_V(t)) = D^2(h_{VE}) + D^2(\dot{h}_V)t^2 \\ F(t) = \phi \left[ \frac{E(h_{VE}) + E(\dot{h}_V)t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(h_{VE}) + D^2(\dot{h}_V)t^2}} \right] \end{cases}$$

$$(2) \begin{cases} E(h_V(t)) = (h_{VE}) + E(\dot{h}_V)t; E(h_{VE}) = h_{VE} = \text{hằng số} \\ D^2(h_V(t)) = D^2(\dot{h}_V)t^2; D^2(h_{VE}) = 0 \\ F(t) = \phi \left[ \frac{E(h_{VE}) + E(\dot{h}_V)t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(\dot{h}_V)t^2}} \right] \end{cases}$$

$$(3) \begin{cases} E(h_v(t)) = E(\dot{h}_v)t ; \quad E(h_{vE}) = 0 \\ D^2(h_v(t)) = D^2(\dot{h}_v)t^2 + D^2(h_{vE}) = 0 \\ F(t) = \phi \left[ \frac{E(h_v)t - h_{vh}}{\sqrt{D^2(h_v)t^2}} \right] \end{cases}$$

$$(4) \begin{cases} E(h_v(t)) = E(h_{vE}) + (\dot{h}_v)t ; \quad E(\dot{h}_v) = \text{hằng số} \\ D^2(h_v(t)) = D^2(h_{vE}) \\ F(t) = \phi \left[ \frac{E(h_{vE}) + (\dot{h}_v)t - h_{vh}}{\sqrt{D^2(h_{vE})}} \right] \end{cases}$$

trong đó:  $\dot{h}_v = \frac{\sum_{i=1}^{N_o} h_{vi}}{N_o}$  (9.35)

$$S_{\dot{h}_v}^2 = \frac{1}{N_o - 1} \sum_{i=1}^{N_o} (\dot{h}_{vi} - \bar{\dot{h}}_v)^2 \quad (9.36)$$

từ hàm  $\phi(x)$  ta có:

$$x \sqrt{D^2(h_{vE}) + D^2(\dot{h}_v)t^2} = E(h_{vE}) + E(\dot{h}_v)t - h_{vh} \quad (9.37)$$

Khi  $F(t) = \phi(x) = 0,5$ , tức là tại  $x = 0 \rightarrow t_{50} \rightarrow$  có

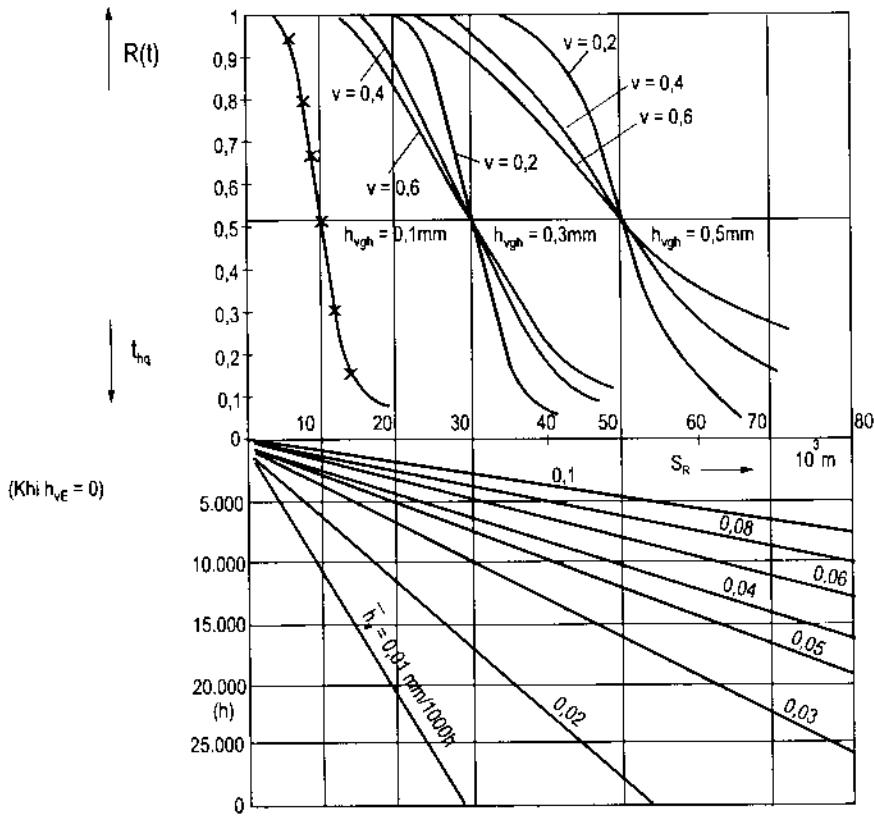
$$E(h_{vE}) + E(\dot{h}_v)t_{50} - h_{vh} = 0$$

$$t_{ib} \approx \frac{h_{vh} - E(h_{vE})}{E(\dot{h}_v)} \left[ 1 + \frac{D^2(\dot{h}_v)}{E^2(\dot{h}_v)} \right] \quad (9.38)$$

$$\text{hoặc } t_{ib} = t_{50} (1 + v^2(\dot{h}_v)) \quad (9.39)$$

**Thí dụ 9.2.** Tốc độ mòn một số chi tiết động cơ diesel tàu thuỷ

Xi lanh	0,01... 0,025	mm/1000 (h)
Vòng găng số 1	0,02 ... 0,03	
Vòng găng số	0,03 ... 0,05	
Van xả	0,04 ... 0,06	
Van nạp	0,02... 0,04	
Bạc đõ và bạc biên	0,005 ... 0,01	
Vòng bi	0,001... 0,008	



**Hình 9.10:** Quan hệ vận tốc mòn và tuổi thọ % gamma

#### 9.4.9. Ứng dụng với cường độ mòn

Cường độ mòn có thể viết:

$$I_h = \frac{h_V}{v_R} = \frac{h_V}{v_{ms}} \quad (9.40)$$

trong đó  $v_{ms} \rightarrow$  tốc độ trượt tương đối của cặp ma sát có:

$$F(t) = \phi \left[ \frac{E(h_{vE}) + E(I_h v_{ms})t - h_{vgh}}{\sqrt{D^2(h_{vE}) + D^2(I_h v_{ms})t^2}} \right] \quad (9.41)$$

$$R(t) = \phi \left[ \frac{-E(h_{vE}) - E(I_h v_{ms})t - h_{vgh}}{\sqrt{D^2(h_{vE}) + D^2(I_h v_{ms})t^2}} \right] \quad (9.42)$$

Khi

$$E(h_{vE}) = 0$$

$$F(t) = \phi \left[ \frac{E(I_h v_{ms})t - h_{vgh}}{\sqrt{D^2(I_h v_{ms})t^2}} \right] \quad (9.43)$$

$$R(t) = \phi \left[ \frac{-E(I_h v_{ms})t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(I_h v_{ms})t^2}} \right] \quad (9.44)$$

khi  $v_{ms}$  = hằng số:

$$t_{hq} = \frac{h_{Vgh}}{v_{ms} [E(I_h) - x \sqrt{D^2(I_h)}]} \quad (9.45)$$

$$\sqrt{D^2(I_h)} = v(I_h)E(I_h) \quad (9.46)$$

$$t_{hd} \text{ (thời gian hoạt động)} = t_{hq} = \frac{h_{Vgh}}{v_{ms} [E(I_h) - x \sqrt{D^2(I_h)}]} = t_{s0} \frac{1}{(1 - xv(I_h))}$$

$$t_{hd} = t_{hq} = 2.777 * 10^{-7} \frac{h_{Vgh}}{v_{ms} E(I_h) (1 - xv(I_h))} \quad (9.47)$$

$$E(I_h) = \frac{h_{Vgh}}{tv_{ms} (1 - xv(I_h))}$$

Bảng 9.6. Giá trị x và  $1/(1-x\vartheta)$  với xác suất R(t) cho bảng với  $\vartheta(I_h)$

R(t)	x	1/(1-x\vartheta)				
		$\vartheta = 0,2$	$\vartheta = 0,3$	$\vartheta = 0,4$	$\vartheta = 0,5$	$\vartheta = 0,6$
0,1	1,28	1,344	1,623	2,049	2,778	4,310
0,2	0,84	1,202	1,337	1,506	1,724	2,016
0,3	0,525	1,117	1,187	1,266	1,356	1,459
0,4	0,25	1,053	1,081	1,111	1,143	1,176
0,5	0	1	1	1	1	1
0,6	-0,25	0,952	0,930	0,909	0,889	0,869
0,7	-0,525	0,905	0,864	0,826	0,792	0,760
0,8	-0,84	0,856	0,799	0,748	0,704	0,665
0,9	-1,28	-0,796	0,722	0,662	0,609	0,566
0,95	-1,65	0,752	0,669	0,602	0,548	0,503

Bảng (9.6) có thể biểu diễn bằng biểu đồ:

(1) cho: R,  $\vartheta(I_h)$ ,  $v_{ms}$ ,  $h_{Vgh}$ ,  $I_h$ .

tìm:  $t_{hq}$

(2) cho:  $t_{hq}$ ; R(t);  $\vartheta(I_h)$ ;  $v_{ms}$ ;  $h_{Vgh}$ .

tìm:  $I_h$

(3) cho:  $t_{hq}$ ,  $\vartheta(I_h)$ ;  $v_{ms}$ ;  $h_{Vgh}$ ;  $I_h$ .  
tìm:  $R$ .

#### 9.4.10. Xác định độ tin cậy trên cơ sở mòn

Tính theo mòn bằng phương pháp năng lượng.

Từ:  $I_h = \frac{\tau}{e_{ms}^*}$  (9.48)

trong đó:  $\tau$  - ứng suất tiếp tuyến do ma sát;

$e_{ms}^*$  - mật độ năng lượng ma sát riêng.

Kì vọng:  $E(I_h) = E\left(\frac{\tau}{e_{ms}^*}\right)$  (9.49)

Phương sai:  $D^2(I_h) = D^2\left(\frac{\tau}{e_{ms}^*}\right)$  (9.50)

$$F(t) = \phi \left[ \frac{E(h_{VE}) + E\left(\frac{\tau v_{max}}{e_{ms}^*}\right)t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(h_{VE}) + D^2\left(\frac{\tau v_{ms}}{e_{ms}^*}\right)v_{ms}^2 t^2}} \right] \quad (9.51)$$

Khi  $v_{ms}$  = hằng số:

$$F(t) = \phi \left[ \frac{E(h_{VE}) + E\left(\frac{\tau}{e_{ms}^*}\right)v_{ms}t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(h_{VE}) + D^2\left(\frac{\tau}{e_{ms}^*}\right)v_{ms}^2 t^2}} \right] \quad (9.52)$$

Nếu  $E(h_{VE})$  và  $D^2(h_{VE}) \neq 0$ ;  $\tau$  và  $v_{ms}$  = hằng số:

$$F(t) = \phi \left[ \frac{E(h_{VE}) + E\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right)\tau v_{ms}t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(h_{VE}) + D^2\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right)\tau^2 v_{ms}^2 t^2}} \right] \quad (9.53)$$

$$\times \sqrt{D^2(h_{VE}) + D^2\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right)\tau^2 v_{ms}^2 t^2} = E(h_{VE}) + \left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right)\tau v_{ms}t - h_{Vgh}$$

Bảng 9.7. Tính các thông số độ tin cậy trên cơ sở dạng mòn khác nhau

$(1) \quad \begin{cases} E(h_V(t)) = E(h_{VE}) + E\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t \\ D^2(h_V(t)) = D^2(h_{VE}) + D^2\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t^2 \\ F(t) = \phi\left[\frac{E(h_{VE}) + E\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(h_{VE}) + D^2\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t^2}}\right] \end{cases}$	
$(2) \quad \begin{cases} E(h_V(t)) = h_{VE} + E\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t \\ D^2(h_V(t)) = D^2\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t^2 \\ F(t) = \phi\left[\frac{(h_{VE}) + E\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t^2}}\right] \end{cases}$	
$(3) \quad \begin{cases} E(h_V(t)) = E\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t \\ D^2(h_V(t)) = D^2\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t^2 \\ F(t) = \phi\left[\frac{E\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2\left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t^2}}\right] \end{cases}$	
$(4) \quad \begin{cases} E(h_V(t)) = E(h_{VE}) + \left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t \\ D^2(h_V(t)) = D^2(h_{VE}) \\ F(t) = \phi\left[\frac{E(h_{VE}) + \left(\frac{\tau v_{ms}}{e^*_{ms}}\right)t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(h_{VE})}}\right] \end{cases}$	

Khi  $F(t) = 50\%$  thì  $t_{50}$  tương ứng với  $x = 0$ .

Ta có:  $F(t = t_{50}) = \phi(0) = 0,5$

$$E(h_{VE}) + E\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right) \tau v_{ms} t_{50} - h_{Vgh} = 0 \quad (9.53)$$

$$t_{50} = \frac{h_{Vgh} - E(h_{VE})}{E\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right) \tau v_{ms}} \quad (9.54)$$

Khi  $E(h_{VE}) = 0$  và  $D^2(h_{VE}) = 0$

Ta có:

$$F(t) = \left[ \frac{E\left(\frac{\tau v_{ms}}{e_{ms}^*}\right) t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2\left(\frac{\tau v_{ms}}{e_{ms}^*}\right) t^2}} \right] \quad (9.55)$$

Nếu  $\tau$  và  $v_{ms}$  = hằng số:

$$F(t) = \phi \left[ \frac{E\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right) \tau v_{ms} t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right) \tau^2 v_{ms}^2 t^2}} \right] \quad (9.56)$$

Nếu theo phân phối chuẩn:

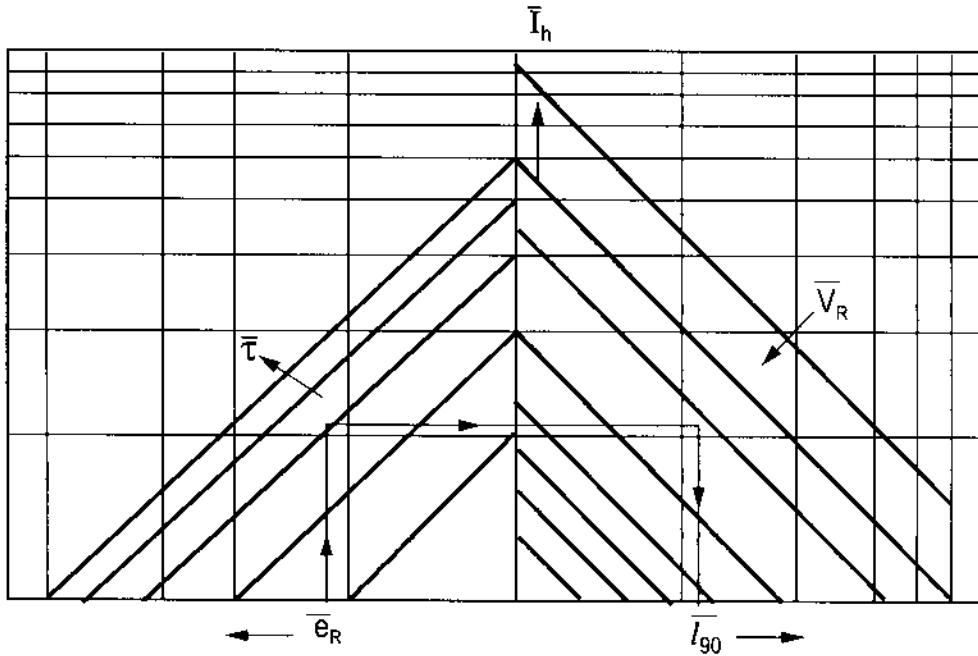
$$x \cdot \sqrt{D^2\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right) \tau^2 v_{ms}^2 t^2} = E\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right) \tau v_{ms} t - h_{Vgh} \quad (9.57)$$

và:

$$t_{hq} = \frac{h_{Vgh}}{\tau v_{ms} E\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right) \left[ 1 - x \cdot \sqrt{D^2\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right)} \right]} \quad (9.58)$$

Nếu theo hệ số biến đổi  $v$ :

$$t_{hq} = \frac{h_{Vgh}}{\tau v_{ms} E\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right) \left[ 1 - xv\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right) \right]} \quad (9.59)$$



Hình 9.11: Tương quan:  $e_{ms}^*$ ;  $\tau$ ;  $v_{ms}$ ;  $I_h$ ; và  $t_{90}$  ( $h_{Vgh}$ ,  $v$ = hằng số)

## 9.5. XÁC ĐỊNH CÁC THÔNG SỐ ĐỘ TIN CẬY KHI LƯỢNG MÒN LÀ HÀM PHI TUYẾN CỦA THỜI GIAN

Trong một số trường hợp, lượng mòn có thể viết dưới dạng hàm luỹ thừa sau:

$$h_V(t) = h_{VE} + \dot{h}_V t^\alpha \quad (9.60)$$

Nếu  $h_V(t)$ ,  $\dot{h}_V(t)$  và  $h_{VE}$  tuân theo phân phối chuẩn ta có độ tin cậy là:

$$R(t) = \phi \left[ \frac{-E(h_{VE}) - E(\dot{h}_V)t^\alpha + h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(h_{VE}) + D^2(\dot{h}_V)t^{2\alpha}}} \right] \quad (9.61)$$

Nếu coi  $h_{VE} = 0$  ta có:

$$\begin{aligned} E(h_V(t)) &= at \\ D^2(h_V(t)) &= bt^2 \end{aligned} \quad (9.62)$$

và  $h_V(t)$  tuân theo phân phối chuẩn ở mọi thời điểm thì độ tin cậy sẽ là:

$$R(t) = 1 - \phi \left[ \frac{t - ch_{Vgh}}{\sqrt{gh_{Vgh}}} \right] \quad (9.63)$$

trong đó:  $c, g$  - những tham số được xác định nhờ vào kết quả mòn cụ thể.

Trong trường hợp giá trị giới hạn  $h_{Vgh}$  đã cho ta có:

$$R(t) = 1 - \left\{ \begin{array}{l} \phi\left(\frac{at - h_{Vgh} + h_{VE}}{\sqrt{bt}}\right) + \exp\left(\frac{2a(h_{Vgh} - h_{VE})}{b}\right) \\ * \phi\left(\frac{(at + h_{Vgh} - h_{VE})}{\sqrt{bt}}\right) \end{array} \right\} \quad (9.64)$$

Trong một số trường hợp chiều cao mòn còn được viết dưới dạng:

$$h_V(t) = h_{VE} + \sum_{i=1}^{N(t)} h_{Vi} \quad (9.65)$$

trong đó:  $h_{Vi}$  - lượng mòn trong khoảng làm việc thứ i, hoặc do yếu tố i tác động;

$N(t)$  - số khoảng hoặc số các yếu tố tác động gây mòn.

Độ tin cậy có thể viết:

$$R(t) = \phi\left[\frac{h_{Vgh} - A^t}{\sqrt{ct}}\right] \quad (9.66)$$

trong đó: A và c là các thông nhận được từ bảng kết quả đo mòn.

Xác suất hỏng tương ứng với mật độ phân phối khác nhau, ta có kết quả sau:

$$F(t) = \phi\left[\frac{t - c}{\sqrt{a + bt^2}}\right] \quad (9.67)$$

Trong đó: t - thời gian;

$\phi$  - hàm phân phối chuẩn hóa;

a, b, c là các tham số của hàm phân phối.

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (9.68)$$

Trong đó  $\lambda$  là tham số của phân phối mũ:

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t^\alpha) \quad (9.69)$$

Trong đó  $\lambda$  và  $\alpha$  là tham số của phân phối Weibull:

$$F(t) = \phi\left[\frac{\ln t - A}{\sqrt{B + C \ln^2 t}}\right] \quad (9.70)$$

trong đó  $\phi$  - hàm phân phối chuẩn hóa;

A, B, C - các tham số của phân phối.

Quá trình mòn ngẫu nhiên được biểu thị trên hình 9.12.

## 9.6. MỘT SỐ THÍ DỤ ÁP DỤNG

### 1. Áp dụng phân phối Weibull

Xác định độ tin cậy trên cơ sở mòn

Khảo sát mòn 20 chi tiết ở cùng điều kiện mòn, điều kiện làm việc  $t_i$  là thời gian hỏng chi tiết thứ  $i$ .

Bảng 9.8 trình bày: thời gian hỏng, xác suất không hỏng và hỏng  $R_{tn}(t)$  và  $F_{tn}(t)$  khi  $N_o = 20$ .

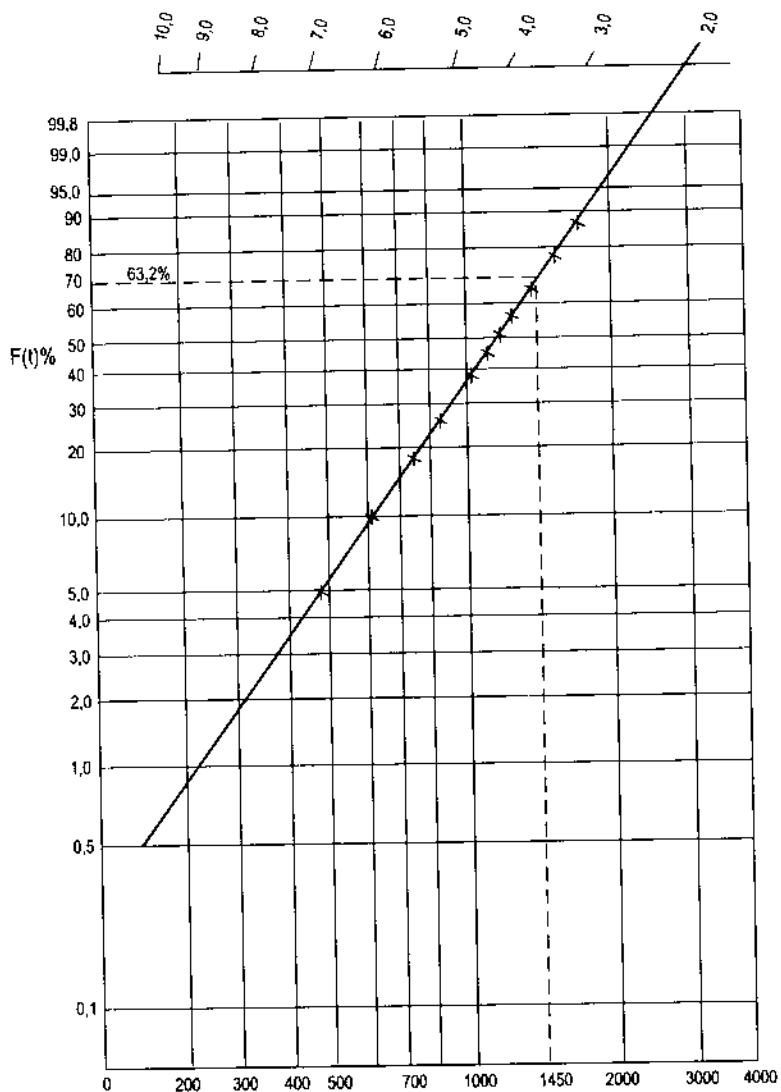
**Bảng 9.8**

$t_i(h)$	$n(t)$	$N(t)$	$F_{tn}(t_i) = \frac{n(t)}{N_o} \%$	$R_{tn}(t_i) = \frac{n(t)}{N_o} \%$
520	1	19	5	95
680	2	18	10	90
800	3	17	15	85
900	4	16	20	80
920	5	15	25	75
1000	6	14	30	70
1100	7	13	35	65
1200	8	12	40	60
1200	9	11	45	55
1300	10	10	50	50
1350	11	9	55	45
1400	12	8	60	40
1500	13	7	65	35
1600	14	6	70	30
1650	15	5	75	25
1700	16	4	80	20
1750	17	3	85	15
1950	18	2	90	10
2000	19	1	95	5
2700	20	0	100	0

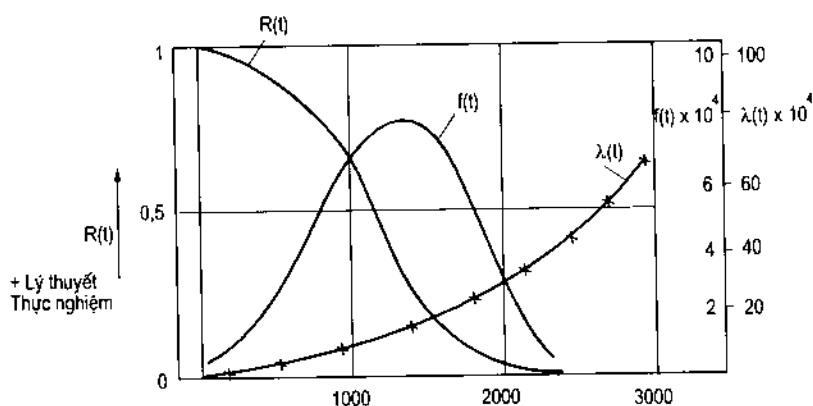
Sử dụng giấy phân bố xác suất số: 687 mô tả kết quả thực nghiệm, mô tả theo phân bố Weibull.

Đồ thị xác định các thông số phân bố.

$\alpha = 3$ ;  $\lambda = 1/\tau^\alpha$ ,  $\tau \rightarrow$  thời gian để có 63,2%  $F(t)$  tương ứng;  $\tau = 1450h$ ;  $\lambda = 3,28 \cdot 10^{-10}$  1/h



**Hình 9.12:** Thủ nghiệm phân bố theo giấy (phân bố Weibull) và xác định các thông số phân bố



**Hình 9.13:** Đồ thị  $R(t)$ ;  $f(t)$ ;  $\lambda(t)$

Bảng 9.9. Các thông số R(t) ; f(t) ; λ(t) ; F(t) theo phân phối Weibull

t(h)	R(t)	F(t)	f(t)*10 <sup>4</sup> (1/h)	λ(t)*10 <sup>4</sup> (1/h)
200	0,9974	0,0026	0,38	0,39
400	0,9793	0,0207	1,54	1,57
600	0,9316	0,0684	3,29	3,54
800	0,8454	0,1546	5,32	6,29
1000	0,7204	0,2796	7,09	9,84
1200	0,5674	0,4326	8,04	14,17
1267	0,5132	0,4868	8,11	15,79
1400	0,4065	0,5935	7,83	19,28
1600	0,2609	0,7391	6,57	25,19
1800	0,1476	0,8524	4,70	31,88
2000	0,0725	0,9275	2,85	39,56
2200	0,0304	0,9696	1,45	47,62
2400	0,0107	0,9893	0,61	56,68
2600	0,0031	0,9969	0,206	66,52
2800	0,0007	0,9993	0,054	77,14

Thời gian hoạt động trung bình:

$$t_{tb} = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)}{\lambda^{1/\alpha}} = \frac{\Gamma(1,333)}{(3,28 \cdot 10^{-10})^{1/3}}; t_{tb} = 1295 \text{ (h)}$$

Độ lệch chuẩn:

$$\sigma = \frac{1}{\lambda^{1/\alpha}} \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} = \frac{1}{(3,28 \cdot 10^{-10})^{1/3}} \sqrt{\Gamma(1,666) - \Gamma^2(1,333)}$$

Trong đó:  $\Gamma(x)$  là hàm mật độ phân bố Gamma, lấy theo bảng:

$$\Gamma(1,666) = 0,90167 + 0,00063 = 0,9023.$$

$$\Gamma(1,333) = 0,89338 - 0,00038 = 0,89300.$$

$$\sigma = 466 \text{ (h)}.$$

$$v(t) = \sigma/t_{tb} = 466/1295 = 0,359$$

$$M = \left[ \frac{\alpha - 1}{\lambda * \alpha} \right]^{\frac{1}{\alpha}} = \left[ \frac{2}{3,28 * 10^{-10} * 3} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$M = 1267 \text{ (h)}$$

## 2. Khi mòn tuân theo phân phối chuẩn

Thí nghiệm một nhóm cấp ma sát về sự phụ thuộc của mòn vào thời gian, của cùng vật liệu, cùng điều kiện làm việc, có 36 kết quả như sau: (h).

Bảng 9.10

288	360	365	370	318	334
345	350	316	350	345	338
370	340	345	310	338	342
316	334	350	380	330	335
310	330	390	360	350	370
330	290	380	355	325	335

Trình tự tính như sau:

Thứ 1. Chia lớp có:  $K \leq 5 \lg N_o$  chọn  $K = 6$ .

Thứ 2. Khoảng mỗi lớp 17h.

Thứ 3. Thú trên giấy phân phối

Bảng 9.11

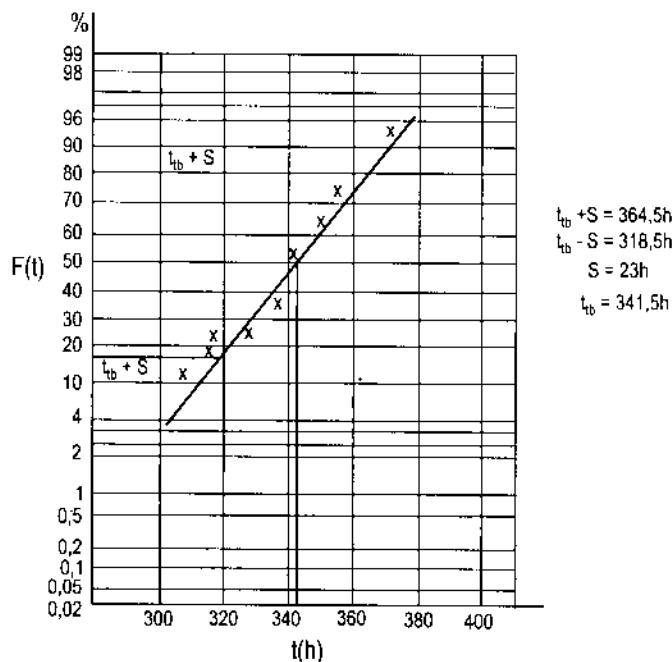
$\Delta t$ (h)	t (h)	$\Delta n(t)$	N(t)	R(t)	F(t)	$f(t) \cdot 10^3$	$\lambda(t) \cdot 10^3$
288...305	-	2	-	-	-	3,27	3,46
	305	-	34	0,94	0,06	-	-
305... 322	-	5	-	-	-	8,17	8,65
	322	-	29	0,80	0,20	-	-
322... 339	-	10	-	-	-	16,30	20,30
	339	-	19	0,53	0,47	-	-
339... 356	-	10	-	-	-	16,30	30,90
	356	-	9	0,25	0,75	-	-
356... 373	-	6	-	-	-	9,80	39,40
	373	-	3	0,08	0,92	-	-
373... 390	-	3	-	-	-	4,48	58,80
	390	-	0	0	1	-	-

Hình 9.14 trình bày cách xác định các thông số phân phối trên giấy xác suất (phân phối chuẩn) tương ứng với bảng số liệu 9.11.

$$f(t) = \frac{\Delta n(t)}{N_o \cdot \Delta t} \text{ có } f_1(t) = \frac{2}{36.17} = 3,27 \cdot 10^{-3}$$

và

$$f(t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t N(t)} \text{ có } f_1(t) = \frac{2}{17.34} = 3,46 \cdot 10^{-3}$$



Hình 9.14

Mô tả gần đúng giá trị  $F(t)$  theo % tương ứng thời gian  $t$ , nó gần trùng với một đường thẳng, như vậy  $F(t)$  chấp nhận phân phối chuẩn.

### 3. Việc xác định phân phối của số liệu có thể sử dụng phép thử $\chi^2$ hoặc Kolmogorov

Đối với phân phối chuẩn, ta có thể thông qua phép tính sau:

$$t_{tb} = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} t_i \quad (9.71)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N_o - 1} \sum_{i=1}^{N_o} (t_i - t_{tb})^2} \quad (9.72)$$

$$S = 23,7 \text{h}$$

Tương ứng hình 9.14 ta có:  $t_{tb} = 341,5$  (h)

Nhận được  $S = 23$ (h).

### 4. Xác định $f(t)$ ; $R(t)$ ; $F(t)$ và $\lambda(t)$

$$\text{Đặt } Z_i = \left( \frac{t_i - t_{tb}}{\sigma} \right) \quad (9.73)$$

Có:  $\varphi(0,1) = \varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$  (9.74)

$$f(t_1) = \varphi(Z_i)/\sigma \quad (9.75)$$

$$\varphi(-x) = \varphi(x) \quad (9.76)$$

Tương ứng có:  $\varphi(Z) = F(t) = 1 - R(t)$  (9.77)

$$\varphi(-Z) = 1 - \varphi(Z) = 1 - F(t) = R(t) \quad (9.78)$$

Khi  $t_b = 341,5$  h và  $\sigma = 23,7$  h có kết quả 9.12 được thể hiện ở bảng sau:

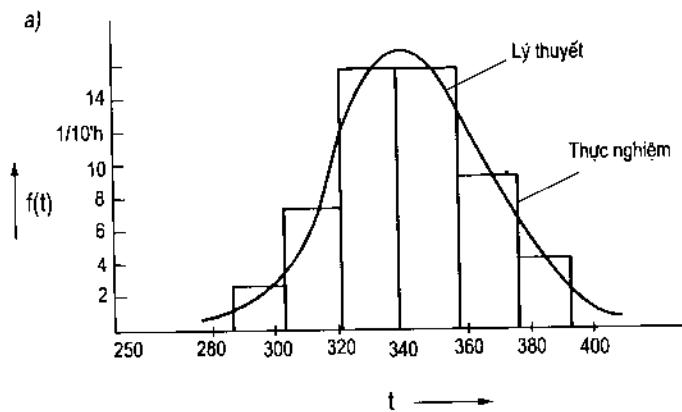
Bảng 9.12

$t_i$	$t_i - t_b$	Z	$\varphi(Z)$	R(t)	$\varphi(Z)$	$f(t)*10^3 1/h$	$\lambda(t)*10^3 1/h$
280	-61,5	-2,594	0,995	0,995	0,0139	0,58	0,58
300	-41,5	-1,751	0,960	0,960	0,0862	3,63	3,78
320	-21,5	-0,907	0,817	0,817	0,2636	11,12	13,61
340	-1,5	-0,063	0,524	0,524	0,3982	16,80	32,06
341,5	0	0	0,506	0,500	0,3989	16,83	33,66
360	18,5	0,781	0,782	0,218	0,2943	12,41	56,96
380	38,5	1,624	0,947	0,053	0,1070	4,51	85,18
400	58,5	2,468	0,993	0,007	0,0190	0,80	114,28

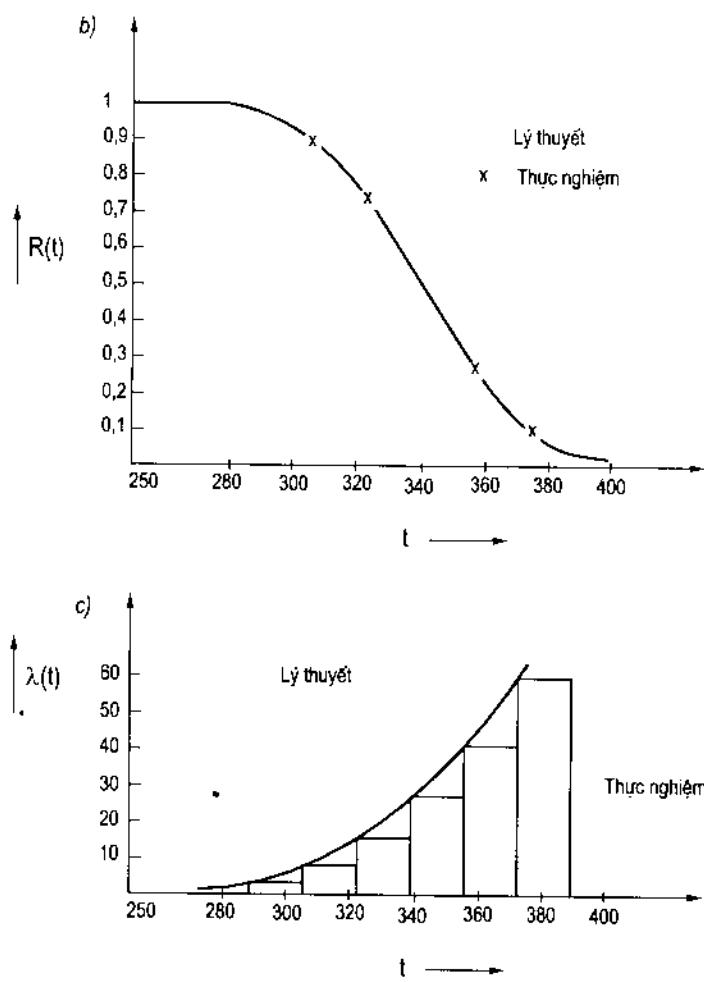
Hệ số biến động tính theo v(t)

$$S(t) = \frac{S}{t_b} = 0,0673 \rightarrow \text{sử dụng để so sánh 2 phân phối thực nghiệm và lý thuyết}$$

(hình 9.15).



Hình 9.15a: Phân phối thực nghiệm: bậc thang (lý thuyết) và phân phối liên tục



**Hình 9.15b, c:** Phân phối thực nghiệm: bậc thang (lý thuyết) và phân phối liên tục

### 5. Ảnh hưởng của cường độ mòn đến xác suất hỏng:

a) Xác định độ tin cậy làm việc và hỏng hóc, khi cường độ mòn biến đổi giảm đi, từ giá trị kì vọng của cường độ mòn cho như sau:

$$E(I_h1) = 0,5 \cdot 10^{-8}$$

$$E(I_h2) = 1,6 \cdot 10^{-9}$$

Thời gian làm việc  $t = 100$  (h) và có:  $E(h_{VE}) = 0$ ;  $v_{ms} = 0,55$  m/s;  $\sigma(I_h) = 0,3$ ;  $h_{Vgh} = 0,3$  mm.

Hãy xác định xác suất hỏng do mòn:

Vì  $v_{ms}$  = hằng số; có xác suất hỏng là:

$$F(t) = \Phi \left[ \frac{E(I_h)v_{ms}t - h_{Vgh}}{\sqrt{D^2(I_h)v_{ms}t}} \right] \quad (9.79)$$

trong đó:  $\sqrt{D^2(I_h)}$  =  $v(I_h) \cdot E(I_h)$  =  $0,3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-8} = 1,5 \cdot 10^{-9}$

Và  $\sqrt{D^2(I_{h2})} = v(I_h) \cdot E(I_{h2}) = 0,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-8} = 0,48 \cdot 10^{-9}$

$$F_1(t=100) = \phi \left[ \frac{0,5 \cdot 10^{-8} \cdot 0,5 \cdot 3600 \cdot 100 - 0,3 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 0,5 \cdot 3600 \cdot 100} \right]$$

$$= \phi \left[ \frac{9 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}}{2,7 \cdot 10^{-4}} \right]$$

$$F_1(t=100) = \phi [2,22] = 98,6\% \rightarrow R_1(t=100) = 1,4\%$$

$$F_2(t=100) = \phi [-138]$$

$$\text{Vì } \Phi(-x) = 1 - \phi(x) = 1 - 0,555 = 0,445$$

$$\text{Tức là: } F_2(t=100) = 44,5\%$$

$$\text{Và } R(t=100) = 55,5\%$$

Như vậy: Giảm cường độ mòn sẽ dẫn đến giảm xác suất hỏng hóc.

b) Ánh hưởng của độ lệch tiêu chuẩn đến thời gian làm việc, với  $R(t) = 90\%$  và biến thiên  $\theta(I_h)$  từ 0,1 đến 0,7

Hãy xác định thời gian làm việc là bao nhiêu?

Cho:  $E(I_h) = 10^{-9}$ ;  $E(h_{Vg}) = 0$ ;  $h_{Vg} = 2,5 \text{ mm}$ ;  $v_{ms} = 1 \text{ m/s}$

$v_{ms}$  (m/s) và  $h_{Vg}$  (mm).

Thời gian hoạt động:

$$t_{hd} = t_{hq} = 2,777 \cdot 10^{-7} \frac{h_{Vg}}{v_{ms} E(I_h) (1 - xv(I_h))} \quad (9.80)$$

$R(t) = 0$ , có  $x = -1,28 \rightarrow x$  sử dụng trong công thức = -1,28

$$v(I_h) = \frac{\sqrt{D^2(I_h)}}{E(I_h)} \text{ và } \sqrt{D^2(I_h)} = v(I_h) E(I_h)$$

$$\sqrt{D^2(I_{h1})} = 0,1 \cdot 10^{-9}; \quad \sqrt{D^2(I_{h2})} = 0,7 \cdot 10^{-9}$$

Thời gian hoạt động ứng với  $v(I_h) = 0,1$  là:

$$t_{190} = 2,777 \cdot 10^{-7} \frac{25}{10^{-9} l(1 + 1,28 \cdot 0,1)} = 615,6 \text{ h}$$

Thời gian hoạt động ứng với  $\theta(I_h) = 0,7$  là:

$$t_{290} = 2,777 \cdot 10^{-7} \frac{25}{10^{-9} l(1 + 1,28 \cdot 0,7)} = 366,2 \text{ h}$$

Trong đó các thứ nguyên là:  $v(\text{m/s})$ ;  $h_{Vgh}$  (mm) và  $R(t) \rightarrow x \rightarrow$  lấy dấu âm (-)

$h_{VE} = 0$  lượng mòn, hay khe hở ban đầu.

c) Thời gian làm việc có  $F(t)$  xác định

Cường độ mòn cần phải là bao nhiêu, để thực hiện thời gian làm việc có xác suất hỏng  $F(t)$  nhất định:

Xác định cường độ mòn của cặp ma sát trượt nếu thời gian làm việc  $t = 5000$  h và cho:

$$F(t = 5000\text{h}) = 0,1; E(h_{VE}) = 0; v_{ms} = 3\text{m/s}; v(I_h) = 0,4; h_{Vgh} = 0,5\text{mm}.$$

$$F(t) = 0,1 \text{ và } R(t) = 0,9 \text{ tương ứng } x = -1,28$$

$$\text{Từ (9.35) có: } E(I_h) = \frac{h_{Vgh} \cdot 2,78 \cdot 10^{-7}}{t \cdot v_{ms} (1 - xv(I_h))} \quad (9.81)$$

$$E(I_h) = \frac{0,5 \cdot 2,78 \cdot 10^{-7}}{5000 \cdot 3(1 + 1,28 \cdot 0,4)} \approx 6,13 \cdot 10^{-12}$$

Điều đó chứng tỏ, cần phải có trạng thái bôi trơn ướt mới đảm bảo  $E(I_h) \approx 6,13 \cdot 10^{-12}$

d) Ảnh hưởng của điều kiện làm việc đến  $R(t)$

Ảnh hưởng của điều kiện làm việc đến xác suất làm việc không hỏng của cặp ma sát khi thời gian làm việc xác định;  $t = 300$  (h).

$$\text{Cho: } h_V = \bar{h}_V \cdot t = K_o \cdot \bar{p} \cdot v_{ms} \cdot t \quad (9.82)$$

$$\bar{p} = 1,6 \text{N/mm}^2 \pm 0,45 \text{N/mm}^2$$

$$v_{ms} = 2\text{m/s} \pm 0,6\text{m/s}$$

\* Theo phân bố chuẩn  $\pm 2\sigma$

\* Vận tốc mòn trung bình  $\bar{h}_V$  thông qua thực nghiệm:

$$\bar{h}_V = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm/h}$$

\* Độ chính xác yêu cầu đối với cặp ma sát:  $\pm 0,06\text{mm}$  (vùng phân phối  $2\sigma$ )

\* Mòn giới hạn  $h_{Vgh} = 0,5\text{mm}$ ;  $h_{VE} = 0$ .

Trình tự tính như sau:

1. Độ lệch tiêu chuẩn cho điều kiện hoạt động:

$$\sigma_p = \sqrt{D^2(p)} = 0,225 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{do } p \pm 2\sigma$$

$$\sigma_{v_{ms}} = \sqrt{D^2(v_{ms})} = 0,3 \text{ m/s} \rightarrow \text{do } v_{ms} \pm 2\sigma$$

2. Hằng số  $K_o$ :

$$K_o = \frac{\bar{h}_V}{\bar{p} \cdot v_{ms}} = 1,04 \cdot 10^{-10} \text{ mm}^2/\text{N}; \bar{h}_V (\text{m/h})$$

3. Độ lệch chuẩn phụ thuộc vào chính xác sản xuất:

$$\sigma_{ho} = \sqrt{D^2(h_o)} = 0,03\text{mm}$$

4. Độ lệch tiêu chuẩn của vận tốc mòn:

$$\begin{aligned} D^2 \bar{h}_v &= D^2(K_o \cdot p \cdot v_{ms}) = K_o^2 D^2(p \cdot v_{ms}) \\ \sigma_{hv} &= \sqrt{D^2(\bar{h}_v)} = K_o \sqrt{D^2(p) D^2(v_{ms}) + \bar{p}^2 D^2(v_{ms}) + v_{ms}^2 D^2(p)} \\ \sigma_{hv} &= K_o \sqrt{(0,225)^2 (0,3)^2 + (1,6)^2 (0,3)^2 + (2)^2 (0,225)^2} \\ \sigma_{hv} &= 2,476 \cdot 10^{-4} \text{ mm/h} \end{aligned}$$

5. Xác suất không hỏng, khi  $t = 300$ :

$$R(t) = R(300) = \phi \left[ \frac{h_{vh} - \dot{h}_{vtb} t}{\sqrt{D^2(h_v) + D^2(\dot{h}_v) t^2}} \right] \quad (9.83)$$

$$R(t) = \phi \left[ \frac{0,5 - 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 300}{\sqrt{(0,03)^2 + (2,476 \cdot 10^{-4})^2 (300)^2}} \right]$$

$$R(t) = \phi(1,747) = 0,959$$

6. Sử dụng biểu đồ 9.16 ta tìm được giá trị  $R(t)$  tương tự:

Đồ thị quan hệ  $R(t)$ ,  $h_{vh}$ ,  $E(I_h)$ ,  $v(I_h)$ ,  $t_{hd}$

Thí dụ tương ứng có kì vọng của cường độ mòn là  $E(I_h)$ :

$$I_{htb} = \frac{\dot{h}_{vtb}}{v_{ms}} \quad (9.84)$$

trong đó:  $I_{htb}$  - cường độ mòn trung bình;

$\dot{h}_{vtb}$  - tốc độ mòn trung bình;

$v_{ms}$  - tốc độ ma sát.

Ở đây có:

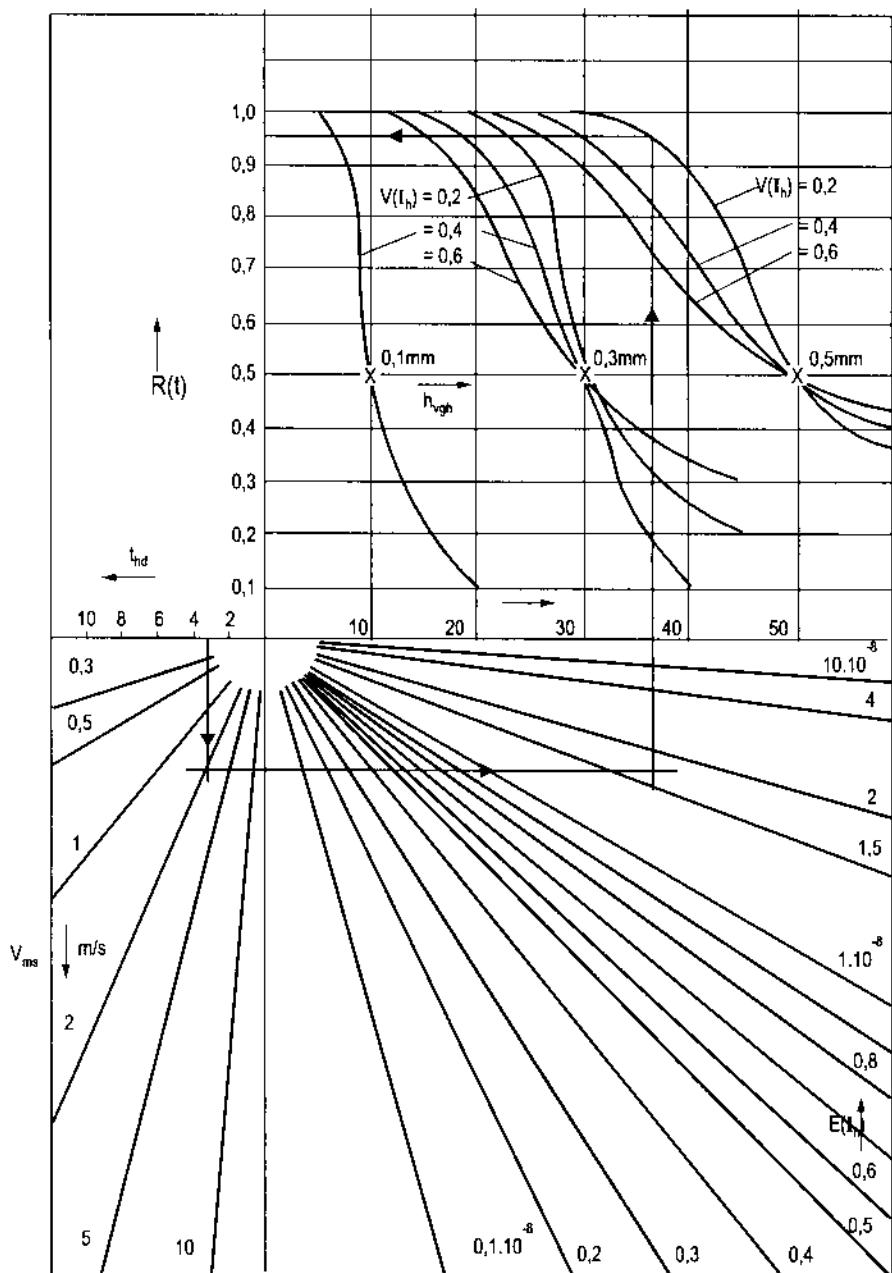
$$I_{htb} = 1,66 \cdot 10^{-10}$$

Hệ số biến động:

$$v(\dot{h}_v) = \frac{\sqrt{D^2(\dot{h}_v)}}{E(\dot{h}_v)} \quad (9.85)$$

$$v(\dot{h}_v) = 0,206$$

cho  $v_{ms} = 2 \text{ m/s}$



**Hình 9.16**

Từ hình 9.16 có kết quả sau:

$$\text{Chọn trục toạ độ } \frac{E(I_h)}{100} = 1,66 \cdot 10^{-8}$$

$$t/100 = 3h$$

Từ trục  $t_{hd} = 3$  ta xác định được giá trị  $R(t = 300) \approx 0,96$ .

e) Xác định thông số độ tin cậy của cùp ma sát

Đối với cùp ma sát cùng vật liệu, cùng điều kiện làm việc, khi thử mòn.  $h_{Vi}$  được xác định theo kết quả khi đo đạc, người ta thử nghiệm mòn 50 cùp ma sát, với  $v_{ms} = 0,4\text{m/s}$ . Chiều cao mòn giới hạn  $h_{Vgh} = 100\mu\text{m}$ . Bảng 9.13 cho kết quả thử nghiệm:

Bảng 9.13

$h_{VEi} (\mu\text{m})$	$I_{hi} \cdot 10^{-9}$	$\dot{h}_{Vi} (\mu\text{m}/\text{h})$	$h_{VEi} (\mu\text{m})$	$I_{hi} \cdot 10^{-9}$	$\dot{h}_{Vi} (\mu\text{m})$
34	0,2	0,3	50	0,8	1,2
40	1,0	1,5	53	1,4	2,1
46	0,8	1,2	54	0,5	0,75
53	0,8	1,2	57	1,2	1,8
58	0,5	0,75	61	0,8	1,2
65	1,1	1,65	32	0,8	1,2
70	0,9	1,35	36	0,4	0,6
30	1	1,5	39	0,8	1,2
33	1,53	2,29	41	0,5	0,75
60	0,2	0,3	47	1,3	1,95
62	0,5	0,75	48	0,9	1,35
66	0,8	1,2	59	0,8	1,2
43	1	1,5	74	1	1,5
52	1	1,5	37	1,4	2,1
56	1	1,5	89	1,05	1,58
63	1	1,5	56	0,8	1,2
27	0,5	0,75	54	0,8	1,2
38	0,5	0,75	51	1,1	1,65
49	0,5	0,75	49	1,6	2,4
52	0,5	0,75	41	0,7	1,05
58	1	1,5	42	0,5	0,75
62	1,15	1,73	44	1,3	1,95
69	0,5	1,75	45	0,5	0,75
44	0,8	1,2	46	1,5	2,25
48	1	1,5	50	0,2	0,3

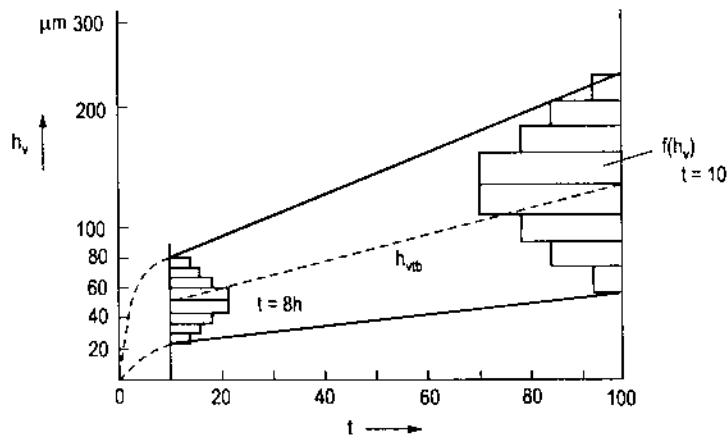
Trong đó tốc độ mòn được tính như sau:

$$\dot{h}_{Vi} = \frac{\Delta h_{Vi}}{\Delta t_i} = I_{hi} * v_{ms} \quad (9.86)$$

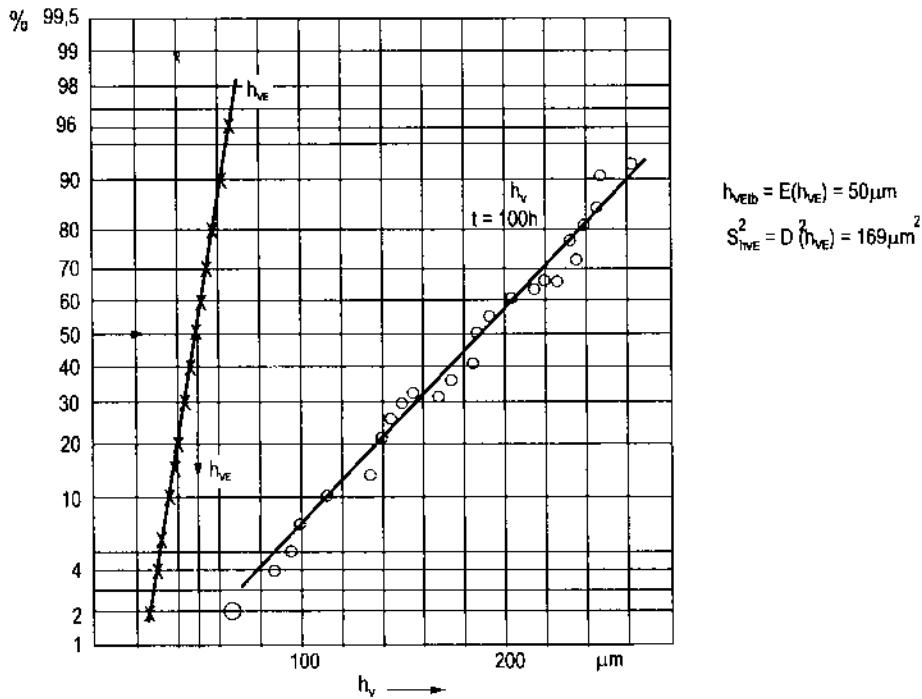
Sử dụng giấy phân bố xác suất số 678 mô tả kết quả thực nghiệm, mô tả theo phân bố Weibull.

Và

$$h_{Vi} = h_{VEi} + \dot{h}_{Vi} \quad (9.87)$$



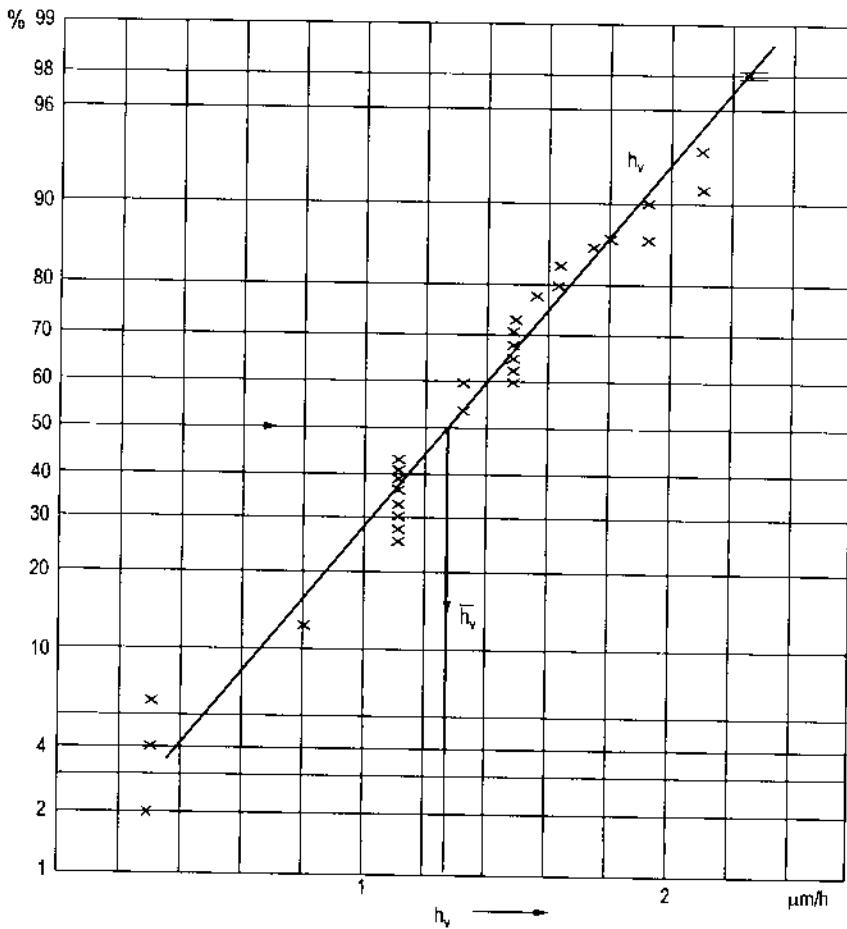
Hình 9.17: Sự phụ thuộc của mòn vào thời gian  $t = 8\text{ (h)}$  và  $t = 100\text{ (h)}$



Hình 9.18: Xác định  $E(h_{VE})$  và  $D^2(h_{VE})$  bằng giấy xác suất chuẩn

Hình 9.19 xác định  $h_{VtB}$ ;  $E(h_{VtB}) = 1,27 \frac{\mu\text{m}}{\text{h}}$

$$S^2_{hV} ; D^2(h_V) = 0,26 \frac{\mu\text{m}^2}{\text{h}^2}$$



**Hình 9.19:**  $\dot{h}_{Vtb}$  và  $S_{hv}^2$

Trên giấy phân phối chuẩn, các thông số mòn được xác định nhờ các hình (9.17) (9.18) và (9.19)

$$h_{VEtb} = E(h_{VE}) = 50 \mu\text{m} ; \quad D^2(h_{VE}) = 169 \frac{\mu\text{m}^2}{h^2} ; \quad E(\dot{h}_{Vtb}) = 1,27 \frac{\mu\text{m}}{h}$$

$$D^2(h_v) = 0,26 \frac{\mu\text{m}^2}{h^2} .$$

Theo phân phối chuẩn ta được:

$$\begin{aligned} E(h_v(t)) &= E(h_{VE}) + E(\dot{h}_v)t \\ D^2(h_v(t)) &= D^2(h_{VE}) + D^2(\dot{h}_v)t^2 \end{aligned} \quad (9.88)$$

Nếu cho giá trị  $h_{Vgh} = 0,1 \text{mm}$  ta được:

$$* \text{ Xác suất hỏng: } F(t) = \phi \left[ \frac{1,27t - 50}{\sqrt{169 + 0,26t^2}} \right]$$

$$* \text{ Xác suất không hỏng: } F(t) = \phi \left[ \frac{-1,27t + 50}{\sqrt{169 + 0,26t^2}} \right]$$

Kết quả  $F(t)$  và  $R(t)$  được trình bày ở bảng 13.14

Bảng 9.14. Giá trị  $F(t)$  và  $R(t)$

$t(h)$	$[Z]$	$F(t)$	$R(t)$
10	-2,674	0,004	0,996
20	-1,488	0,069	0,931
30	-0,592	0,278	0,722
39,37	0	0,500	0,500
40	0,033	0,513	0,487
50	0,471	0,681	0,319
60	0,788	0,780	0,220
70	1,024	0,847	0,153
80	1,205	0,885	0,115

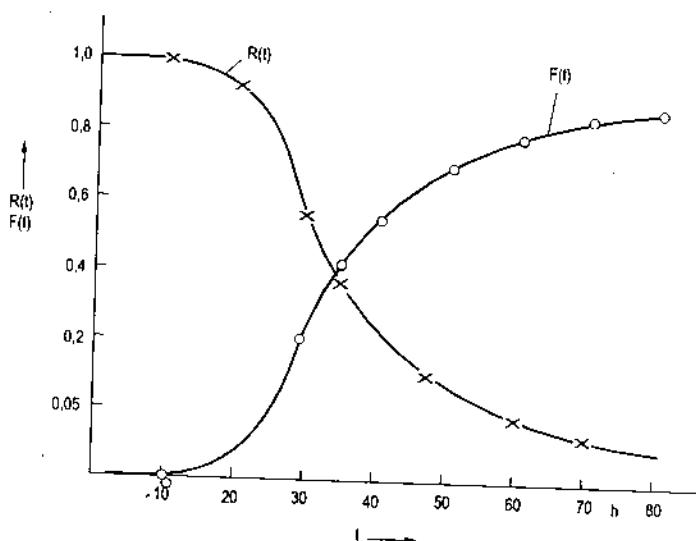
Hình (9.20) biểu thị sự phụ thuộc của  $R(t)$ ;  $F(t)$  vào thời gian.

Khi  $F(t) = 0,5$  tương ứng  $\phi(Z) = 0,5$ ;  $Z = 0$ .

Có thời gian tương ứng là:

$$t_{50} = \frac{h_{Vgh} - E(h_{VE})}{E(h_V)} \quad (9.89)$$

$$t_{50} = 39,37 \text{ (h)}$$



Hình 9.20

Thời gian làm việc trung bình là:

$$t_{tb} = t_{50}(1 + v^2(h_v))$$

với  $v(h_v) = 0,40$ :

$$t_{tb} = 45,6 \text{ (h)}$$

Khi xác suất hỏng  $F(t) \neq 0,5$  có phương trình sau:

$$x \sqrt{D^2(h_{VE}) + D^2(h_v)t^2} = E(h_{VE}) + E(h_v)t - h_{vh} \quad (9.90)$$

Trong đó  $x$  là thông số được xác định thông qua bảng tích phân  $\phi(x) = F(t)$  tức là định trước xác suất hỏng ta có được một giá trị  $x$  tương ứng.

Thí dụ: Nếu có  $F(t) = \phi(x) = 0,841$  thì ta có giá trị  $x = 1$  tương ứng từ bảng  $\phi(x)$ . Thay vào (9.85) ta có:

$$\sqrt{169 + 0,26t^2} = 1,27t - 50$$

$$t^2 - 94,07t + 1726,66 = 0$$

$$t = 69,05 \text{ (h).}$$

Có thể kết luận rằng: Tương ứng với  $h_{vh} = 0,1\text{mm}$  và cho phép  $F(t) = 0,841$  thì thời gian làm việc sẽ là 69,05 (h).

g) Xác định các thông số độ tin cậy với cặp ma sát chuyển động quay:

- Trường hợp cặp ma sát chuyển động quay.

Cho các số liệu sau:

$$E(h_{VE}) = 0; v(I_h) = 0,4; E(I_h) = 2,10^{-9}; h_{vh} = 0,5\text{mm}$$

Đường kính trục quay:  $d = 20\text{mm}$ .

Góc tiếp xúc  $\varphi = 100^\circ$ .

Hãy xác định số chu kì tương ứng  $Z$  để  $R(Z) = 0,9$  và  $R(Z) = 0,5$  quãng đường ma sát trong một chu kì là:  $S_{ms_1} = r\varphi$ , cho  $Z$  chu kì:  $S_{ms} = r\varphi Z$ .

Xác suất làm việc:

$$R(Z) = \phi \left[ \frac{h_{vh} - E(I_h)Zr\varphi}{D^2(I_h)Zr\varphi} \right] \quad (9.91)$$

$$Z = \frac{h_{vh}}{E(I_h)r\varphi(1-xv)(I_h)} \quad (9.92)$$

Tương ứng:  $R(Z) = 0,9$  có  $x = -1,28$  (bảng  $\phi(x)$ ).

$$R(Z) = 0,5$$
 có  $x = 0$  (bảng  $\phi(x)$ )

Thay x vào (9.87) có:

$$Z_{90} = 9,45 \cdot 10^6 \text{ chu kì}$$

$$Z_{50} = 14,28 \cdot 10^6 \text{ chu kì.}$$

#### 6. Một số thí dụ tính mòn theo năng lượng:

**Thí dụ 9.3:** Thử nghiệm mòn lớp phủ của má phanh dạng tròn với các chế độ sau:

$$p_{tb} = 1 \text{ N/mm}^2; \mu_{tb} = 0,4; v_{ms} = 6 \text{ m/s}; e_{mstb}^* = 8,78 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2; h_{Vgh} = 8 \text{ mm.}$$

Hãy xác định tuổi thọ tương ứng  $t_{50}$ ;  $t_{90}$ .

Nếu coi  $h_{Ve} \ll h_{Vgh}$  và hệ số biến động  $v\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right) = 0,3$  và theo  $\phi(x)$  ta có:

$t_{50}$  ứng với  $x = 0$ .

$t_{90}$  ứng với  $x = -1,28$ .

$$t_{50} = \frac{8}{0,4 \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 36 \cdot 10^2 \cdot 1 / 8,78 \cdot 10^6}$$

$$t_{50} = 8,14 \text{ h}$$

$$t_{90} = \frac{t_{50}}{\left(1 - vx\left(\frac{1}{e_{ms}^*}\right)\right)} = \frac{8,14 \text{ h}}{1 + 1,28 \cdot 0,3} = 5,88 \text{ h}$$

$$t_{90} = 5,88 \text{ h}$$

Trong đó  $t_{\gamma\%}$  tuân theo công thức sau:

$$t_{hd} = \frac{h_{Vgh}}{\tau v_{ms} E \left( \frac{1}{e_{ms}^*} \right) \left[ 1 - xv \left( \frac{1}{e_{ms}^*} \right) \right]} \quad (9.93)$$

Trong đó:  $\tau = \mu \cdot p$

(9.94)

Trong trường hợp giữ nguyên thứ nguyên (m/s) ta có công thức sau:

$$t_{50} = 2,78 \cdot 10^{-7} \frac{h_{Vgh}}{\tau v_{ms} E \left( \frac{1}{e_{ms}^*} \right)} \quad (9.95)$$

#### Thí dụ 9.4

Thí nghiệm vật liệu làm ổ trượt tự bôi trơn với điều kiện thí nghiệm sau:

$$v_{ms} = 0,3 \text{ m/s}; \tau_{tb} = 0,1 \text{ N/mm}^2; e_{ms}^* = 6 \cdot 10^8 \text{ N/mm}^2; h_{VEtb} = 0,02 \text{ mm.}$$

Hãy xác định độ tin cậy (xác suất không hỏng) trong thời gian làm việc  $t = 1000h$  ; với  $\theta = 0,4$ .

Và  $h_{Vg} = 0,5mm$ .

Áp dụng công thức:

$$R(t) = \phi \left[ \frac{h_{Vg} - E(h_{VE}) - E\left(\frac{\tau}{e_{ms}}\right) v_{ms} t}{\sqrt{(E(h_{VE}))^2 + \left(E\left(\frac{\tau}{e_{ms}}\right) v v_{ms} t\right)^2}} \right] \quad (9.96)$$

Ta có:

$$R(t) = \phi \left[ \frac{0,5 - 0,02 - 0,1/6 \cdot 10^8 \cdot 0,3 \cdot 10^3 \cdot 3,6 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{\sqrt{(0,02 \cdot 0,4)^2 + (1/6 \cdot 10^8 \cdot 0,4 \cdot 0,36 \cdot 0,3 \cdot 10^6 \cdot 10^3)}} \right] = \phi(1,695)$$

$\phi(1,695)$  từ bảng  $\phi(x)$  ta có:

$$R(t = 1000 h) = 0,955.$$

## PHẦN IV

# KĨ THUẬT BÔI TRƠN (KTBT)

## Chương 10

### MỞ ĐẦU

#### 10.1. LỊCH SỬ PHÁT TRIỂN, PHÂN LOẠI KĨ THUẬT BÔI TRƠN

##### 10.1.1. Lịch sử phát triển KTBT

a) *Định nghĩa:* Bôi trơn là biện pháp đưa vật liệu bôi trơn vào vùng ma sát, làm giảm ma sát và giảm mòn.

Hình 10.1 mô tả cùp ma sát được bôi trơn.

Trong đó (1) và (2) là hai vật thể tiếp xúc, chuyển động tương đối với nhau, dưới tác dụng của lực P, vận tốc V, (3) là vật liệu bôi trơn (4) là môi trường.

b) *Sự phát triển ngày càng hoàn thiện của vật liệu bôi trơn (VLBT)*

- Từ thời kì đồ đồng đến 1870, người ta mới chỉ sử dụng nước, dầu thực vật, mỡ động vật;

- Từ 1870 đến 1900, sản phẩm dầu mỡ, dầu khoáng đã được sử dụng để bôi trơn, người đầu tiên sử dụng là Bác học Mendeléep;

- Từ 1990 đến 1930, dầu khoáng chính thức thay cho dầu động thực vật;

- Từ 1930 đến 1950, người ta đã sử dụng hoàn toàn dầu khoáng để bôi trơn;

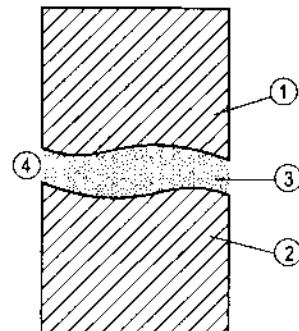
- Từ 1950 đến 1970, người ta đã nâng cao hiệu quả sử dụng dầu khoáng, bằng cách thêm phụ gia (nâng cao hoạt tính bằng các phụ gia);

- Từ 1970 đến nay, vật liệu bôi trơn chủ yếu là dầu tổng hợp, ngoài ra trong một số thiết bị người ta còn sử dụng bôi trơn khí, và bôi trơn rắn.

c) *Sự phát triển của kĩ thuật bôi trơn*

Trước thế kỉ XIX, người ta chú ý đến ma sát, chưa sử dụng chất bôi trơn.

- Năm 1883, Pêkôp (người Nga) là người đầu tiên đặt nền móng cho kĩ thuật bôi trơn thuỷ động;



Hình 10.1

- Năm 1886, Râynol hoàn thiện lí thuyết bôi trơn thủy động của Pêkôp bằng cách đưa ra một số giả thuyết. Sau đó Bôđen và Taylor đã đưa ra thêm một số nhân tố quan trọng chưa được đề cập như: Hiện tượng lọt dầu qua mặt bên (xói mòn), sự nhấp nhô của các bề mặt được bôi trơn, độ nhớt của chất bôi trơn phụ thuộc vào nhiệt độ và áp suất ( $T^\circ$ , p);
- Năm 1916, Keple Ertıl và Kapit Xa đã đưa ra lí thuyết bôi trơn thủy động đàn hồi, thủy động tiếp xúc, cho phép xác định chiều dày lớp dầu nhỏ nhất và sự phân bố áp lực trong dầu bôi trơn;
- Năm 1960, phương pháp bôi trơn thuỷ tĩnh ra đời (bôi trơn nhờ nguồn dầu có áp lực cao);
- Năm 1970, phương pháp bôi trơn lưu biến ra đời (bôi trơn bằng dầu có thêm chất phụ gia, tạo ra được các pha đàn hồi, nhớt, dẻo...).

Kĩ thuật bôi trơn có vị trí rất quan trọng trong công nghiệp, ngày càng phát triển mạnh mẽ. Do đó việc chọn đúng vật liệu bôi trơn là rất quan trọng, vật liệu bôi trơn được đưa vào vị trí ma sát, chúng ta có những nhiệm vụ chính sau:

- + Đảm bảo tính truyền dẫn;
- + Giảm mất mát năng lượng cơ học;
- + Giảm sinh nhiệt (làm nguội);
- + Chống mòn tốt;
- + Chống bụi bẩn của môi trường;
- + Chống rung tốt.

**Bảng 10.1. Một số vật liệu bôi trơn quan trọng**

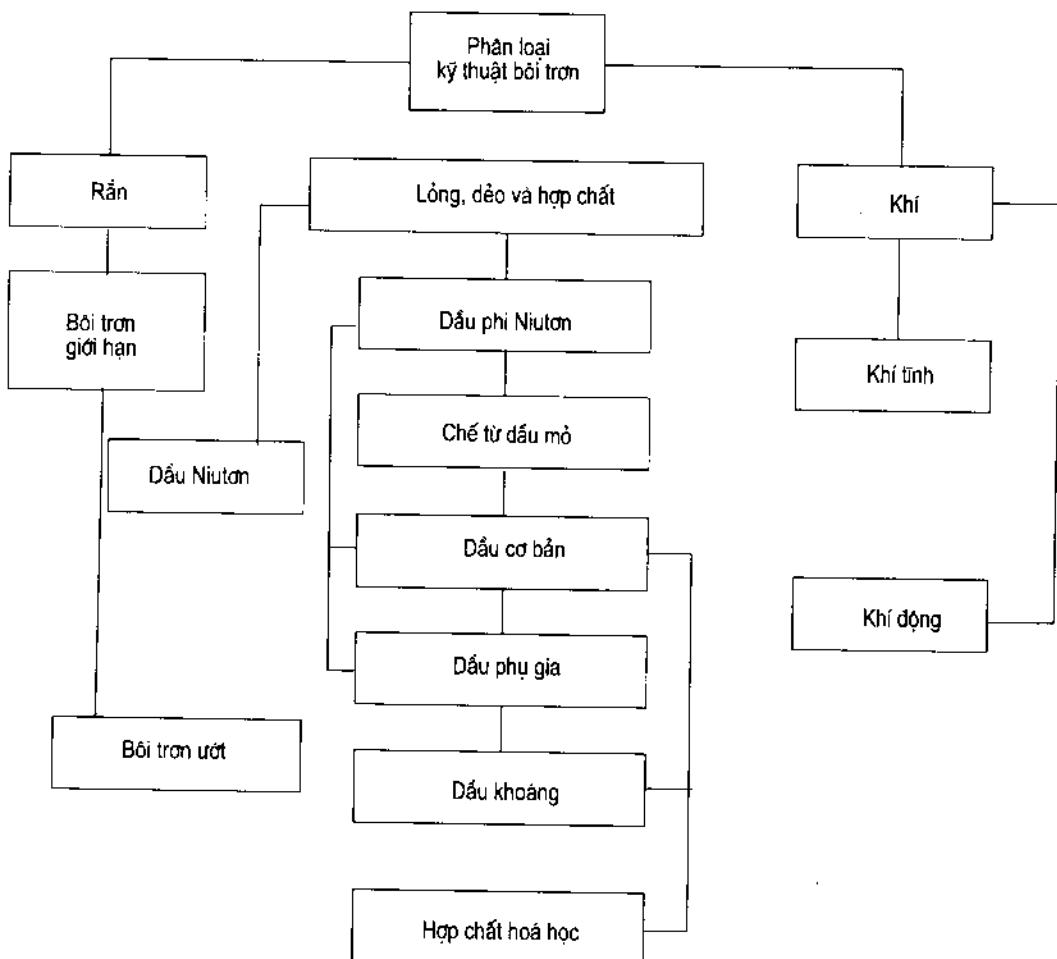
Dạng khí	Dạng lỏng	Dạng đặc quánh	Dạng rắn
Không khí	Dầu khoáng	Mỡ khoáng chất	Grafit
Khí Nitơ	Dầu tổng hợp	Mỡ tổng hợp	Đisulfítmolipden
Khí Đioxít cacbon	Dầu thực vật Mỡ động vật Huyền phù Nhũ tương		Kim loại (Cu, Pb, Au) Hợp chất vô cơ $\text{CaF}_2$ , $\text{ZnO}$ , $\text{ZnS}$ , $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$

Việc lựa chọn vật liệu bôi trơn tốt, thường, kém phải dựa theo yêu cầu đặt ra trước, bôi trơn có hiệu quả cao nhất là: biết kết hợp chất chẽ giữa vật liệu được bôi trơn và vật liệu bôi trơn cùng các điều kiện: vĩ mô, vi mô, động học và động lực học.

### 10.1.2. Phân loại kĩ thuật bôi trơn

Người ta phân loại kĩ thuật bôi trơn theo nhiều cách, theo kết cấu, theo trạng thái chất bôi trơn...

**Bảng 10.2. Trình bày, phân loại theo trạng thái chất bôi trơn**



### 10.1.3. Vật liệu dùng bôi trơn

#### a) Khái niệm chung

Trong thời gian dài, người ta coi vật liệu bôi trơn như là loại vật liệu phụ. Ngày nay các nhà chuyên môn đã đánh giá chúng là một yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến ma sát mà buộc phải quan tâm trong thiết kế, chế tạo, bảo hành máy.

#### b) Dầu khoáng

Đặc tính của dầu khoáng là được sản xuất từ dầu mỏ, được phân chia theo liên kết của hydro các bon, hydro cácbon bão hòa liên kết chuỗi, liên kết vòng, nhóm Napton (băng phiến)... Nhóm chất thơm hydro cácbon không bão hòa liên kết vòng, thành phần dầu khoáng phụ thuộc vào gốc dầu mỏ, tính chất cơ bản của nhóm vật liệu này được trình bày ở bảng (10.3).

**Bảng 10.3. Tính chất cơ bản của nhóm dầu khoáng quan trọng**

Paraffine Tỉ trọng thấp	Napton (băng phiến) Tỉ trọng trung bình	Nhóm chất thơm Tỉ trọng lớn
Ôxy hoá chậm, trước hết là liên kết của axít bay hơi, chống mòn, sau đó là mối liên kết sệt nhót	Ôxy hoá không chậm, liên kết của vật liệu không bay hơi, chống mòn kém, sau đó ở trạng thái bùn	Ôxy hoá mạnh, không bay hơi lớn, số lượng chất thơm giảm tương ứng là sự hạn chế ôxy hoá

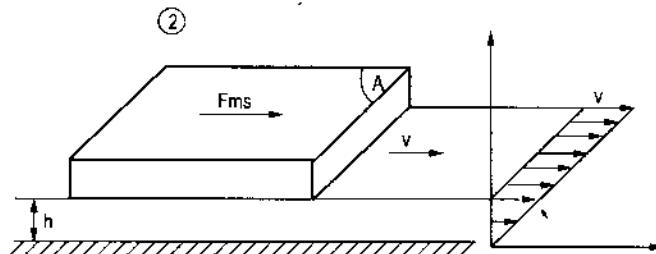
#### 10.1.4. Tính nhót của vật liệu bôi trơn

Lực xuất hiện khi trượt các lớp chất lỏng lên nhau, trong khối chất lỏng giữa hai mặt phẳng song song là do ma sát nội gây ra (gọi là tính nhót, quán của vật liệu).

##### a) Độ nhót động

Một tấm phẳng không khối lượng có diện tích A, trượt trên khối chất lỏng đồng chất có chiều dày h, trượt với vận tốc v, dựa vào các phương trình Newton, ta có thể tính được lực trượt như sau:

$$F_{ms} = \eta A \frac{dv}{dh} \quad (10.1)$$



**Hình 10.2: Xác định độ nhót động**

Ứng suất tiếp của lớp chất lỏng sẽ là:

$$\tau = \frac{F_{ms}}{A} = \eta \frac{dv}{dh} \quad (10.2)$$

Hệ số tỉ lệ  $\eta$  được gọi là *độ nhót động* (hay *độ nhót tuyệt đối*) giá trị của nó phụ thuộc vào tính chất của từng chất lỏng.

$\frac{dv}{dh}$  gọi là gradien vận tốc, đơn vị đo độ nhót động theo hệ SI là:

$$1CP = 10^{-2} P = 10^{-3} \frac{Ns}{m^2} = 10^{-3} P_a \cdot s = 1mP_a \cdot s \quad (10.3)$$

P kí hiệu là Poiz; CP là Sảng ti. Poiz.

Chất lỏng mà ứng suất tiếp tỉ lệ với gradien vận tốc chúng tuân theo các định luật Niuton, trong đó  $\eta$  là hằng số vật liệu, phụ thuộc vào áp suất. Phần lớn các dầu khoáng, do không đồng nhất về cấu trúc, nên cấu trúc loại vật liệu này có ảnh hưởng đến độ nhớt, và được gọi là *tính nhớt cấu trúc hoặc là phi Niuton*.

### b) Độ nhớt động lực

Độ nhớt động, chưa mô tả mối quan hệ giữa độ nhớt và khối lượng riêng của chất lỏng. *Tỉ số giữa độ nhớt động và khối lượng riêng của nó được gọi là độ nhớt động lực*.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (10.4)$$

đơn vị của độ nhớt động lực theo hệ SI là:

$$1\text{CS}_t = 10^{-2}\text{S}_t = 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s} = 1\text{mm}^2/\text{s} \quad (10.5)$$

$S_t$  gọi là Stock;  $CS_t$  gọi là Sảng ti. Stock

Người ta còn sử dụng một số đơn vị độ nhớt khác như:

Độ nhớt Ole ( $^{\circ}\text{E}$ ) ở châu Âu

Độ nhớt Redut ( $R''$ ) ở Anh.

Độ nhớt Saibol (SUS) ở Mỹ.

Độ nhớt là một yếu tố rất quan trọng trong việc lựa chọn, sử dụng dầu bôi trơn, nó có ảnh hưởng quyết định đến khả năng tải, chiều dày màng dầu bôi trơn, áp lực màng dầu, tổn thất ma sát, tản nhiệt, độ chính xác cơ học và mòn.

### c) Sự phụ thuộc của độ nhớt vào nhiệt độ

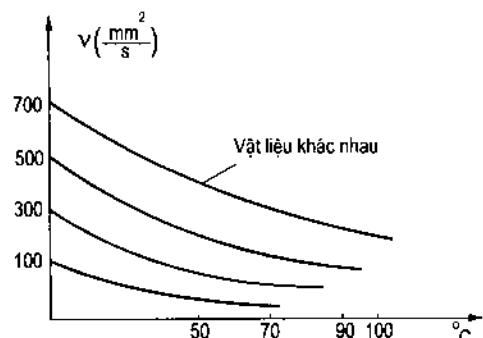
Độ nhớt của dầu bôi trơn phụ thuộc rất lớn vào nhiệt độ, nó là mối quan hệ phi tuyến, độ nhớt giảm khi nhiệt độ tăng, trong mối quan hệ này đối với mỗi loại dầu, cũng khác nhau.

Công thức tổng quát mô tả sự phụ thuộc này như sau:

$$\eta_t = \eta_0 e^{\lambda(t-t_0)} \quad (10.6)$$

Nếu ở cùng một nhiệt độ, các loại dầu khác nhau cũng có độ nhớt khác nhau.

Ở đây  $\lambda$  là hệ số tỉ lệ, thường với dầu từ  $\lambda = 0,02$  đến  $0,03$ .



Hình 10.3: Sự phụ thuộc độ nhớt vào nhiệt độ

$\eta_0$ ,  $t_0$  là độ nhớt và nhiệt độ ban đầu.

#### d) Sự phụ thuộc của độ nhớt vào áp lực

Độ nhớt của chất lỏng phụ thuộc vào áp lực, áp lực nhỏ có thể bỏ qua sự phụ thuộc này khi áp lực lớn thì độ nhớt tăng và biểu thị như sau:

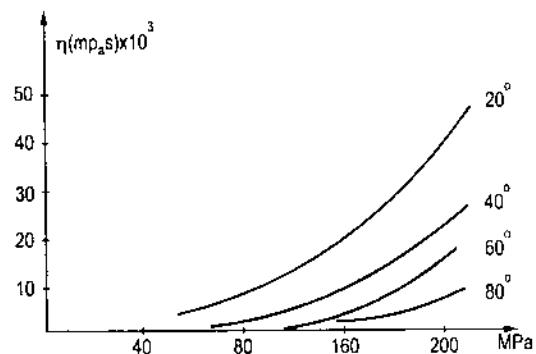
$$\eta_p = \eta_0 e^{\alpha(p-p_0)} \quad (10.7)$$

trong đó:  $\eta_p$  - độ nhớt ở áp lực  $p$ ;

$\eta_0$  - là độ nhớt ở áp lực  $p_0$ ;

$\alpha$  - hệ số nhớt áp lực, tương ứng với các đường đẳng nhiệt khác nhau.

Ở cùng một nhiệt độ, cùng một áp lực, các vật liệu khác nhau, có độ nhớt khác nhau.



Hình 10.4: Sự phụ thuộc độ nhớt vào áp lực

#### 10.1.5. Một số phương pháp đo độ nhớt

##### a) Nhớt kế kiểu Ole

Xác định độ nhớt kiểu Ole ( ${}^{\circ}E$ ) được tiến hành như sau: tìm tỉ số giữa thời gian chảy của  $200\text{cm}^3$  nước cất (chất lỏng tiêu chuẩn) ở nhiệt độ  $20^{\circ}\text{C}$ , ta có được độ nhớt ( ${}^{\circ}E$ ) cho chất lỏng.

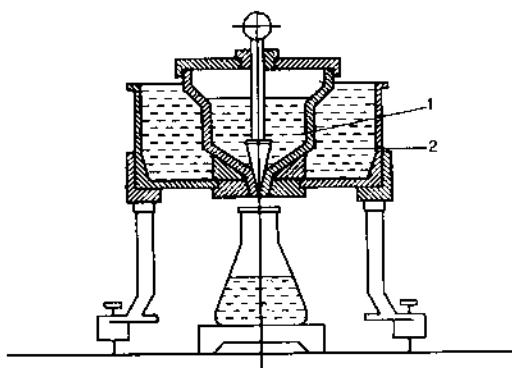
$${}^{\circ}E = \frac{t_1}{t_2} = \frac{t_1}{50 - 52^{\circ}} \quad (10.8)$$

Trong đó ( ${}^{\circ}E$ ) là độ nhớt Ole,  $t_1$  là thời gian chảy của  $200\text{cm}^3$  chất lỏng cần thực nghiệm,  $t_2$  là thời gian chảy  $200\text{cm}^3$  nước cất ở  $20^{\circ}\text{C}$ .

Trong thực tế độ nhớt Ole được đo ở các nhiệt độ  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$  tương ứng  ${}^{\circ}E_{20}$ ,  ${}^{\circ}E_{50}$ ,  ${}^{\circ}E_{100}$ .

##### b) Nhớt kế kiểu quay

Đối với chất lỏng mà độ nhớt thay đổi, các dụng cụ thông thường không có khả năng xác định, do đặc. Người ta đã chế tạo nhớt kế kiểu quay để xác định mối quan hệ giữa ứng suất trượt và gradien vận tốc trượt, qua đó xác định được độ nhớt của vật liệu phi Niuton.



Hình 10.5: Nhớt kế Ole

- 1. Khối lượng chất lỏng cần đo,
- 2. Chất lỏng ổn nhiệt

Dạng đầu đo	Phương trình tính
	$\eta = \frac{1}{4\pi L} \cdot \frac{(R_n^2 - R_t^2)}{R_n^2 \cdot R_t^2} \cdot \frac{M}{\omega}$ $\tau = \frac{M}{2\pi L R_t^2}$
	$\eta = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{(R_n^3 - R_t^3)}{R_n^3 \cdot R_t^3} \cdot \frac{M}{\omega}$

Hình 10.6: Đầu đo nhớt kế kiểu quay

## 10.2. MỘT SỐ PHƯƠNG TRÌNH CƠ BẢN SỬ DỤNG TRONG KĨ THUẬT BỘI TRƠN

### 10.2.1. Các phương trình liên tục

Giả thiết, trong khối chất lỏng chuyển động không có điểm nguồn và điểm hút, khối chất lỏng không chuyển hoá sang dạng khác, như bốc hơi, cháy... Từ định luật Bảo toàn khối lượng ta có thể suy ra các phương trình liên tục.

#### a) Phương trình liên tục dạng tổng quát Ole

Khảo sát một thể tích V bất kì, chứa chất lỏng và S là mặt bao quanh khối chất lỏng đó, lượng chất lỏng ra khỏi mặt S trong một đơn vị thời gian sẽ là:

$$\int_S \rho v_n ds \quad (10.9)$$

Theo định luật Bảo toàn khối lượng ta có:

$$\int_S \rho v_n ds = \int_S \frac{\partial \zeta}{\partial t} dv \quad (10.10)$$

Trong đó:  $\rho$  - khối lượng riêng;

$v_n$  - vận tốc pháp tuyến.

Ứng dụng công thức Ostogradsky ta có:

$$\int_S \rho v_n ds = \int_S \operatorname{div}(\rho v) dv \quad (10.11)$$

Thay (10.9) vào (10.8) ta có:

$$\int_v \left[ \frac{\partial p}{\partial t} \operatorname{div}(\rho v) \right] dv = 0 \quad (10.12)$$

Vì  $V$  là thể tích bất kì nên (10.11) trở thành:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = 0 \quad (10.13)$$

Phương trình (10.11) gọi là *phương trình liên tục dạng Ole*. Khi khối lượng riêng không thay đổi theo thời gian tức là:  $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$

Từ (10.11) ta có:

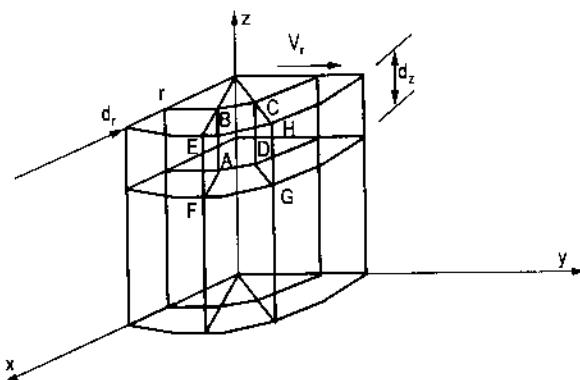
$$\operatorname{div}(\vec{v}) = 0 \quad (10.14)$$

Tức là:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (10.15)$$

### b) Phương trình liên tục dạng tọa độ trụ

Khảo sát phân tố hình trụ chứa chất lỏng biểu diễn trên hình 10.7



Hình 10.7: Phân tố chất lỏng khảo sát hình trụ

Lượng chất lỏng chảy qua các mặt như sau:

Mặt ABCD là  $\rho v_r r d\theta dz$

Mặt FGHE là  $\rho v_r r d\theta dz + \frac{\partial(\rho v_r r)}{\partial r} d\theta dz dr$

Mặt ABEF là  $\rho v_\theta dr dz$

Mặt DCHG là  $\rho v_\theta dr dz + \frac{\partial(\rho v_\theta)}{\partial \theta} dr dz d\theta$

Mặt AFGD là  $\rho v_z r d\theta dr$

Mặt BEHC là  $\rho v_z r d\theta dr + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} r d\theta dr dz$

Lượng chất lỏng chảy qua các mặt, phải bằng sự giảm lượng chất lỏng bên trong thể tích đó.

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} r dr d\theta dz \quad (10.16)$$

Kết hợp các phương trình trên và chia cho  $r dr d\theta dz$  ta có:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_r r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (10.17)$$

Hay:  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_r r)}{r dr} + \frac{\partial(\rho v_\theta)}{r d\theta} + \frac{\partial(\rho v_z)}{dz} = 0 \quad (10.18)$

Đối với chất lỏng không nén được,  $\rho = \text{const}$

Phương trình (10.18) có dạng

$$\frac{v_t}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (10.19)$$

Trong trường hợp  $v_z = 0$  phương trình (10.17) đưa về phương trình tọa độ độc cực:

$$\frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (10.20)$$

hay  $\frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (10.21)$

### 10.2.2. Các phương trình vi phân chuyển động của chất lỏng

a) Đối với chất lỏng lì tưởn

Theo nguyên lý Đalāmbe: Tổng lực mặt, lực khói, lực quán tính tác dụng lên phân tử sẽ làm phân tử cân bằng.

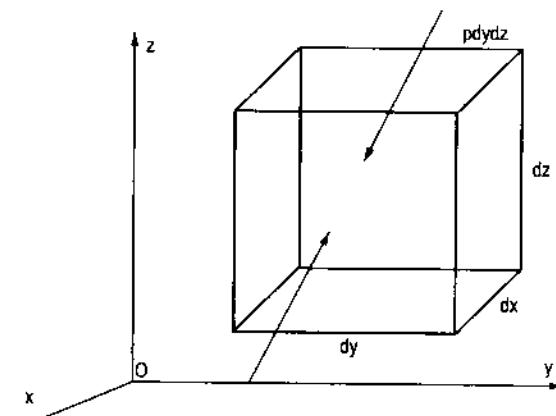
Lực tác dụng theo:

Phương x:

$$pdz - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy dz$$

Phương y:

$$pdz - \left( p + \frac{\partial p}{\partial y} dy \right) dx dy \quad (10.22)$$



Hình 10.8: Khảo sát phân tử chất lỏng  
hình hộp  $dxdydz$  chứa đầy chất lỏng

Phương z:

$$pdxdy - \left( p + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) dydx$$

Gọi F(X, Y, Z) là lực khối đơn vị tác dụng lên phân tử chất lỏng, thành phần hình chiếu lên các trục sẽ là:

$$\rho X dydz; \rho Y dx dydz; \rho Z dx dydz; \quad (10.23)$$

Các lực quán tính sẽ là:

$$-\rho \frac{dv_x}{dt} dxdydz; -\rho \frac{dv_y}{dt} dxdydz; -\rho \frac{dv_z}{dt} dxdydz \quad (10.24)$$

Trong đó:  $v_x, v_y, v_z$  là các thành phần v.

Từ các phương trình trên ta có phương trình cân bằng theo phương x, y, z như sau:

$$\left[ p - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dydz + \rho X dydz + \rho \frac{dv_x}{dt} dxdydz = 0 \quad (10.25)$$

$$\left[ p - \left( p + \frac{\partial p}{\partial y} dy \right) \right] dxdz + \rho Y dx dydz + \rho \frac{dv_y}{dt} dxdydz = 0 \quad (10.26)$$

$$\left[ p - \left( p + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) \right] dx dy + \rho Z dx dydz + \rho \frac{dv_z}{dt} dxdydz = 0 \quad (10.27)$$

Rút gọn phương trình trên ta có hệ phương trình:

$$\begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{dv_x}{dt} \\ Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{dv_y}{dt} \\ Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{dv_z}{dt} \end{aligned} \quad (10.28)$$

Tóm tắt dưới dạng vectơ như sau:

$$F - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}p = \frac{d\bar{v}}{dt} \quad (10.29)$$

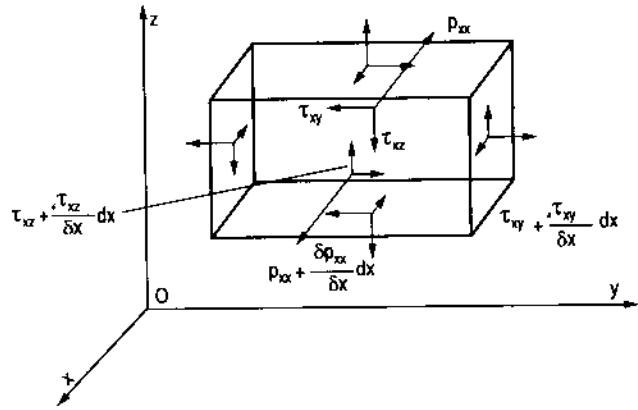
Hệ phương trình (10.28) và (10.29) gọi là hệ phương trình vi phân chuyển động của chất lỏng lí tưởng dạng Ole.

Trường hợp chuyển động dừng  $\frac{d\bar{v}}{dt} = 0$  (10.30)

Ta có phương trình dạng tổng quát sau:

$$F - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}p = 0 \quad (10.31)$$

b) Đối với chất lỏng thực



Hình 10.9: Khảo sát phân tố chất lỏng  $dxdydz$ .

Tenxơ ứng suất của phân tố chất lỏng như sau:

$$\begin{vmatrix} p_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & p_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & p_{zz} \end{vmatrix}$$

Theo nguyên lý Đalambé, tương tự (10.28) ta có phương trình vi phân chuyển động chất lỏng thực:

$$\begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) &= \frac{dv_x}{dt} \\ Y - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) &= \frac{dv_y}{dt} \\ Z - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) &= \frac{dv_z}{dt} \end{aligned} \quad (10.32)$$

Chú ý mối quan hệ đối ứng sau:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \tau_{xz} = \tau_{zx}; \tau_{zy} = \tau_{yz}$$

Định luật Niuton trong không gian:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \eta \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \\ \tau_{xz} &= \eta \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ \tau_{yz} &= \eta \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (10.33)$$

Đặt  $-p = \frac{1}{3}(p_{xx} + p_{yy} + p_{zz})$  (10.34)

Ta có  $p_{xx} = -p + 2\eta \frac{\partial v_x}{\partial x}$   
 $p_{yy} = -p + 2\eta \frac{\partial v_y}{\partial y}$   
 $p_{zz} = -p + 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z}$  (10.35)

### 10.2.3. Hệ phương trình Navier - Stock

Kết hợp các hệ phương trình (10.32) đến (10.35). Nếu coi  $\eta$  không phụ thuộc vào toạ độ  $(x, y, z)$  và  $v = \frac{\eta}{\rho}$ , đối với chất lỏng không nén được có  $\zeta = \text{hằng}$  và  $\text{div}(\vec{v}) = 0$ .

Ta có phương trình Navier - Stock như sau:

$$\begin{aligned}\frac{dv_x}{dt} &= X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + v \Delta v_x \\ \frac{dv_y}{dt} &= Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + v \Delta v_y \\ \frac{dv_z}{dt} &= Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + v \Delta v_z\end{aligned}\quad (10.36)$$

Viết dưới dạng vectơ có dạng:

$$\frac{dv}{dt} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}p + v \Delta \bar{v} \quad (10.37)$$

Trong đó  $\Delta$  là toán tử Laplas có dạng:

$$\Delta v_x = \frac{\partial^2(v_x)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(v_x)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(v_x)}{\partial z^2}$$

Giải hệ phương trình (10.37) cùng với các phương trình liên tục, phương trình trạng thái, cho phép ta xác định 5 ẩn số:  $v_x, v_y, v_z, p, \rho$  là những đại lượng phụ thuộc vào  $x, y, z, t$ . Trong trường hợp  $\eta = \eta_1$ , thì phải bổ sung thông số này.

Giải bài toán Navier-Stock rất khó ngay cả đối với chất lỏng không nén được. Vì vậy các bài toán thủy động thường được giải bằng phương pháp gần đúng, nghĩa là bỏ qua các thành phần của phương trình, mà trong từng bài toán xét thấy khá bé so với các thành phần khác.

#### 10.2.4. Hệ phương trình Râynol

Hệ phương trình Râynol là hệ phương trình cơ bản trong lí thuyết bôi trơn, để xây dựng phương trình đó, người ta đưa ra các giả thiết như sau;

1. Bỏ qua tác dụng của lực khối.
2. Áp lực không đổi theo chiều dày của lớp bôi trơn.
3. Độ cong của bề mặt bôi trơn và chiều dày của lớp bôi trơn xem như không đáng kể.
4. Bỏ qua sự trượt của các lớp biên, nghĩa là vận tốc lớp biên chất bôi trơn dính vào bề mặt bôi trơn sẽ bằng vận tốc của bề mặt đó.
5. Chất bôi trơn được khảo sát là chất lỏng Niuton.
6. Dòng bôi trơn được xem như dòng chảy tầng và chuyển động dừng của chất lỏng không nén được.
7. Có thể bỏ qua ảnh hưởng của lực quán tính.

Khảo sát một phân tố chất lỏng có diện tích đáy  $dx \cdot dz$  và chiều cao  $h$ , trong đó trục  $y$  và  $z$  lần lượt theo hướng kính và hướng trực.

- Theo giả thiết (1) và (2) nên ta có:

$$\bar{F} = 0; \quad \frac{dp}{dy} = 0; \quad \frac{dv}{dt} = 0; \quad (10.38)$$

- Theo giả thiết (6);  $v_x$  và  $v_z$  đều không phụ thuộc vào  $x$ ,  $z$ , do đó toán tử Laplas chỉ còn

$$\Delta v_x = \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}; \quad \Delta v_z = \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2}; \quad (10.39)$$

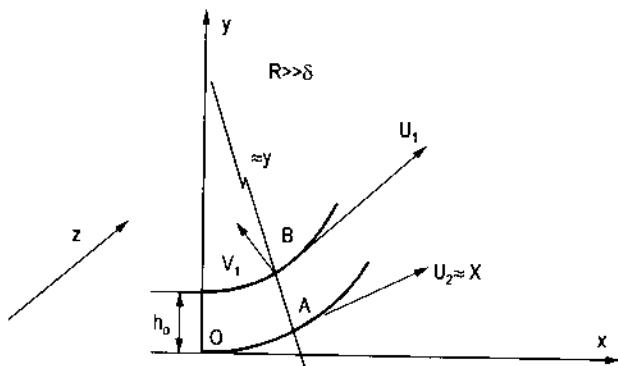
Vì vậy phương trình Naviê-Stock (10.36) trở thành:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \eta \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \quad (10.40)$$

Hệ phương trình (10.40) là *phương trình Râynol trong không gian ba chiều*.

Tích phân (10.40) ta được

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$$



**Hình 10.10:** Mô hình thiết lập phương trình Râynol

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_x}{\partial y} &= \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} y + C_1 \\ v_x &= \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2\end{aligned}\quad (10.41)$$

trong đó:  $C_1, C_2$  là hằng số tích phân, xác định theo điều kiện biên:

Tại  $y = h$  có  $v_x = U_1$

Tại  $y = 0$  có  $v_x = U_2$

Thay vào (10.41) ta có:  $C_2 = U_2$

$$C_1 = \frac{U_1 - U_2}{h} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{h}{2} \quad (10.42)$$

$$\text{và } v_x = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot (y^2 - yh) + \frac{(U_1 - U_2)y}{h} + U_2 \quad (10.43)$$

Lưu lượng sẽ là:

$$\begin{aligned}q_x &= \int_0^h v_x dy = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \left( \frac{y^3}{3} - \frac{y^2 h}{2} \right) \Big|_0^h + (U_1 - U_2) \frac{y^2}{2h} \Big|_0^h + U_2 y \Big|_0^h \\ q_x &= \frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + (U_1 + U_2) \frac{h}{2} y\end{aligned}\quad (10.44)$$

Tương tự ta có:

$$q_z = \frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + (W_1 + W_2) \frac{h}{2} \quad (10.45)$$

$$\text{Trong đó: } W_1 = v_z \Big|_{z=0}; \quad W_2 = v_z \Big|_{z=\frac{h}{2}};$$

$$\text{Và } v_1 = v_y \Big|_{y=h}; \quad v_2 = v_y \Big|_{y=0}; \quad y$$

Vận tốc theo phương  $y$  ( $v_1 - v_2$ ) quá nhỏ nên bỏ qua.

Theo phương trình liên tục ta có:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (10.46)$$

Kết hợp (10.44), (10.45) và (10.46) ta được

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (U_1 + U_2) \cdot \frac{h}{2} - \frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (W_1 + W_2) \cdot \frac{h}{2} - \frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 0$$

Kí hiệu  $U = U_1 + U_2$  và  $W = W_1 + W_2$

Theo giả thiết 6, W và h đều không phụ thuộc vào z, nên  $\frac{\partial}{\partial z}(W.h) = 0$

Và U không phụ thuộc x nên:  $\frac{\partial}{\partial x}(U.h) = U \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$

Từ phương trình trên ta được:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta U \frac{dh}{dx} \quad (10.47)$$

Phương trình (10.47) là phương trình Râynol đối với dòng bôi trơn phẳng, viết dưới dạng toạ độ trụ như sau:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta \omega \frac{dh}{d\varphi} \quad (10.48)$$

Đối với ống dài vô tận ta có:  $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$  (10.49)

Từ (10.47) ta có:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6\eta U \frac{dh}{dx} \left( \frac{h + C_1}{h^3} \right) \quad (10.50)$$

Phương trình (10.46) là phương trình Râynol đối với dòng chảy một chiều. Sau tích phân ta được:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta U \left( \frac{h + C_1}{h^3} \right)$$

Trong đó  $C_1$  là hằng số tích phân, khi  $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$  tại giá trị  $\bar{h}$  nào đó. Đặt  $h = -C_1$  (chiều dày màng dầu) có thể xác định được. Lúc đó phương trình Râynol cho dòng chảy một chiều có dạng:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta U \left( \frac{h + \bar{h}}{h^3} \right) = 6\eta U \left( \frac{1}{h^2} - \frac{\bar{h}}{h^3} \right) \quad (10.51)$$

Viết dưới dạng toạ độ trụ sẽ là:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{dp}{d\varphi} = 6\eta U \frac{h + \bar{h}}{h^3} \quad (10.52)$$

Để xác định giá trị  $\bar{h}$  dựa vào các điều kiện biên, từ phương trình (10.44) có:

$$q_x = \frac{Uh}{2} - \frac{\bar{h}}{12\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (10.53)$$

Vì điều kiện tại  $\bar{h}$  có  $\frac{dp}{dx} = 0$  hay  $\frac{dp}{d\varphi} = 0$

Từ (10.53) ta có:  $q_x = \frac{Uh}{2}$  (1.54)

Giải phương trình (10.51) ta có:

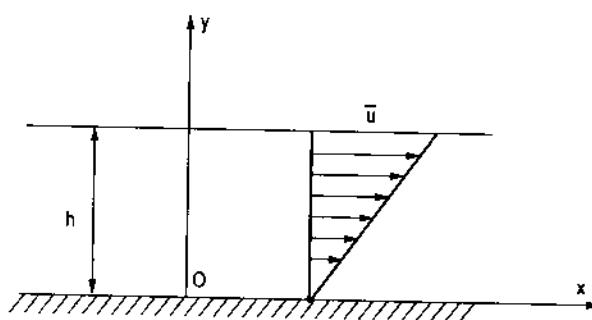
$$p = 6U\eta \left[ \int_0^x \frac{dx}{h^2} - \bar{h} \int_0^x \frac{dx}{h^3} \right] + C$$

Đặt  $J_2 = \int_0^x \frac{dx}{h^2}; J_3 = \int_0^x \frac{dx}{h^3}$

Ta có  $p = 6\eta U(J_2 - \bar{h}J_3) + C$  (10.55)

Hằng số C được xác định nhờ điều kiện biên.

### 10.2.5. Thí dụ: Bài toán dòng chảy Cuét



**Hình 10.11**

Các điều kiện biên như sau:

Khi  $y = 0$  có  $v_x = 0 = U_2$ ;

Khi  $y = h$  có  $v_x = U_1 = U$ .

Áp dụng công thức (10.53) ta có:

$$q_x = Q = \frac{Uh}{2} - \frac{\bar{h}^3}{12\eta} \cdot \frac{dp}{dx}$$

Mặt khác theo (10.43) ta có:

$$v_x = \frac{1}{2\eta} \cdot (y^2 - yh) \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{Uy}{h}$$

Trong trường hợp  $\frac{dp}{dx} \neq 0$  ta có:

$$q_x = Q = \frac{Uh}{2} \quad \text{và} \quad v_x = \frac{Uy}{h}$$

Ứng suất trượt (tiếp tuyến) có dạng:

$$\tau = \eta \frac{\partial v_x}{\partial y} = \eta \frac{U}{h}$$

### 10.3. Ổ TRƯỢT

#### 10.3.1. Khái niệm

- **Ổ trượt:** là chi tiết máy ôm lấy ngõng trực tiếp hay qua trung gian bạc, vòng bạc, mà vòng bạc này giữ cho trục ở một vị trí nhất định.

Ổ trượt có nhiệm vụ:

- Không cản trở trục quay hoặc lắc lư;
- Làm liên kết giữa ổ và ngõng trục;
- Đỡ ổ hướng kính hoặc nối ghép ổ hướng trục.

• **Bạc ổ:** là phần đệm của ổ trượt, dạng trục rỗng, trong đó là ngõng trục, bạc có thể một mảnh hoặc nhiều mảnh, hoặc bạc có lớp lót; theo tính chất bôi trơn, người ta chia ra: ổ thủy động, ổ khí động, ổ thuỷ tĩnh, ổ khí tĩnh, ổ bôi trơn không đủ, ổ bôi trơn vật liệu xốp, ổ bôi trơn rắn.

#### 10.3.2. Vật liệu làm ổ trượt

- Chế độ làm việc của ổ trượt: Trong quá trình làm việc dưới tác dụng của tải trọng  $F_N$ , xuất hiện lực ma sát:

$$F_{ms} = \mu F_N \quad (10.56)$$

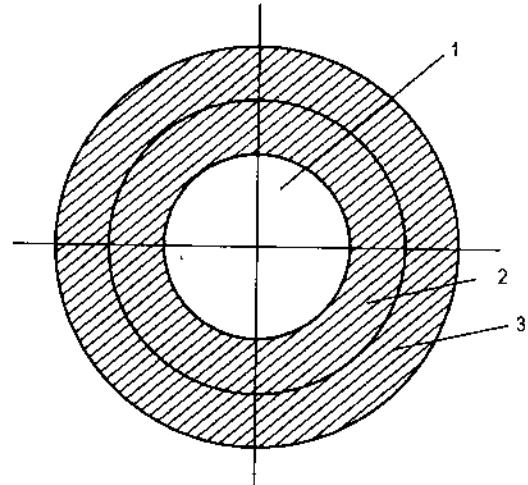
- Công suất cần thiết để thăng ma sát trượt khi có vận tốc trượt  $V_t$  (m/s) sẽ là:

$$P_{ms} = F_{ms} \cdot v_t = \mu F_N v_t$$

Nếu coi công suất ma sát biến thành nhiệt và truyền ra ngoài trên bề mặt (b.d) của ổ (chính xác thấp). Công suất riêng sẽ là:

$$N_{ms} = \frac{P_{ms}}{b.d} = \frac{\mu F_N V_t}{b.d} = \mu p_{tb} v_t \quad (10.57)$$

Trong đó:  $p_{tb} = \frac{F_N}{b.d}$



Hình 10.12: Kết cấu ổ kín

1. Trục; 2. Bạc trượt 3. Ổ trượt

Nếu gọi  $[N_{td}]$  là công suất tương đương cho phép thì:

$$N_{ms} \leq [N_{td}]$$

Với điều kiện lí tưởng  $\mu = \text{hằng số}$  ta có:

$$P_{tb} \cdot v_t \leq [p.v] \quad (10.58)$$

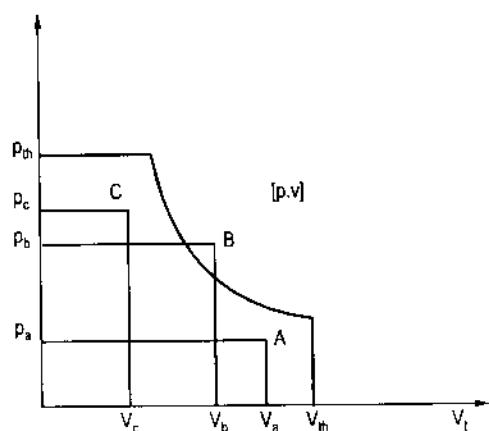
Tích số  $[p.v]$  có thể tăng nếu tăng khả năng tỏa nhiệt của ổ

Thí dụ: Chọn chế độ làm việc:

Tại A:  $P_a \cdot v_a < [p.v]$  ổ làm việc tốt, mặc dù  $v_a$  lớn.

Tại C:  $p_c \cdot v_c < [p.v]$  ổ làm việc tốt mặc dù  $p_c$  lớn.

Tại B:  $p_b \cdot v > [p.v]$  không đảm bảo làm việc mặc dù  $p_b$  không lớn và  $v_b$  không lớn.



Hình 10.13: Quan hệ tích số  $p.v$

Bảng 10.4. Vật liệu làm bạc và p.v thích hợp

Vật liệu	Độ cứng	Độ chính xác	Tải trọng	Vận tốc	Phương pháp bôi trơn	B/d	Độ nhám	$p(\text{MP}_a)$ ; $v(\text{m/s})$
Gang xám		Vừa	Nhỏ	Nhỏ	Tuần hoàn	$\leq 1$	$0,5 \mu\text{m}$	1 5 7 6 5 4 3 2,5 0,3 0,4 0,7 1,1 2 3 5
Đồng thiếc Cu Sn <sub>12</sub>	Nhỏ 80HB	Cao	Lớn	$< 5 \text{ m/s}$	Giới hạn	$\leq 1$	$0,5 \mu\text{m}$	40 32 24 20 16 4 1 0,6 2,4 3,7 4,5 5 7 8
Đồng thiếc chì Cu-Sn <sub>10</sub> -Pb <sub>10</sub>	Nhỏ	Cao	Lớn	Lớn	Giới hạn	$\leq 1$	$0,5 \mu\text{m}$	20 18 16 12 8 4 1 0,2 1 2,5 4 5 6 7
Đồng dỏ Cu-SnS-Pb-Zn	Nhỏ	Cao	Lớn	Trung bình	Giới hạn	$\leq 1$		18 1,5
Nhôm rèn	Thấp	Thấp	Lớn	Nhỏ	Giới hạn		$\leq 0,6 \mu\text{m}$	40 32 20 12 8 4 1 1,5 4 5 6 10
Vật liệu xốp	Thấp	Vừa	Nhỏ	Nhỏ	Thông thường	$< 0,8$	Lớn	8,5 6 4 2 1 0,2 0,5 1 1,5 3
Polyamide-G								5 4 3 1 0,5 0,2 0,4 0,7 1,4 5

### 10.3.3. Một số phương pháp bôi trơn đơn giản

Căn cứ vào chế độ làm việc và kết cấu của ổ. Việc chọn vật liệu và phương pháp bôi trơn theo hai nhiệm vụ chính sau:

- Lựa chọn đúng phương pháp, hệ thống bôi trơn;
- Lựa chọn đúng loại dầu bôi trơn.

**Bảng 10.5. Một số phương pháp bôi trơn đơn giản**

Phương pháp	Chế độ bôi trơn
Băng tay	P nhỏ, v < 1,5m/s, bôi trơn ngắn hạn
Mao dẫn	..... v < 3m/s.....
Mỡ	P trung bình, v < 5m/s, ... lâu dài
Nguồn dầu áp lực cao	P trung bình, v < 5m/s
Vòng bôi trơn	p vừa, v nhỏ
Bơm tuần hoàn	p lớn, v lớn
Chất dẻo	p vừa, v bé, nhiệt cao
Tinh	p vừa, v bé
Động	p vừa, v bé

## Chương 11

# **BÔI TRƠN THỦY ĐỘNG (BTTĐ)**

### **11.1. KHÁI NIỆM VÀ PHÂN LOẠI**

Trên cơ sở thực nghiệm và sử dụng trong thực tế, có thể phân ổ trượt ra thành 2 nhóm chính sau:

Nhóm thứ nhất (I) bao gồm các ổ bôi trơn cục bộ, hoặc không được bôi trơn.

Nhóm thứ hai (II) bao gồm các loại ổ làm việc ở chế độ bôi trơn ướt hoặc nửa ướt.

Các ổ ở nhóm thứ nhất thường có dạng bề mặt phức tạp, dầu bôi trơn được cấp dưới hình thức rãnh dầu hoặc túi dầu.

Việc bôi trơn ổ được thực hiện theo chu kì hoặc liên tục từ các nguồn dầu hay túi dầu.

Trong trường hợp đặc biệt, dầu bôi trơn được cấp do một nguồn tập trung có áp lực.

Các ổ nhóm thứ hai, thường có độ nhẵn bề mặt cao. Để giữ được khả năng tải của màng dầu, kết cấu ổ đơn giản, nhưng kết cấu hệ bôi trơn lại phức tạp hơn. Theo chế độ áp lực, chúng phải đảm bảo bôi trơn ướt và khả năng truyền nhiệt tốt.

Dựa vào chế độ làm việc, người ta còn phân mỗi nhóm thành các nhóm nhỏ hoặc cụm nhỏ.

Các ổ làm việc ở chế độ không có bôi trơn hoặc bôi trơn theo chu kì với khối lượng nhỏ (tức là ở chế độ ma sát khô hoặc hạn chế) thuộc vào nhóm (I-1). Phần lớn loại ổ này ở dạng liền hoặc giống như ống đỡ. Vật liệu cho nhóm ổ này là gang hoặc đồng thanh. Chúng được sử dụng khi vận tốc nhỏ và áp lực riêng không lớn. Thí dụ: Trục tay quay, trục máy công tác công suất nhỏ.

Các ổ thuộc nhóm (I-2) là những ổ được bôi trơn liên tục bằng mỡ, bằng phớt dầu, đệm dầu. Chúng là loại ổ dễ tháo được. Người ta thường sử dụng trong các thiết bị rèn, rãp, đúc, cán...

Các ổ thuộc nhóm (I-3) là những ổ làm việc ở chế độ bôi trơn thủy động. Chúng chịu tải nặng, vừa với trục có vận tốc nhỏ, thay đổi. Người ta thường sử dụng chúng trong động cơ và hộp tốc độ.

Những ổ ở nhóm (I-1) là ổ thủy động, chịu tải nhẹ và vận tốc trượt lớn, chúng thường được dùng trong các turbin hơi nước, khí và bơm li tâm.

Các ổ thuộc nhóm (II-2) là những ổ làm việc ở chế độ bôi trơn thủy động, chúng chịu tải trọng nặng, vừa với trục có vận tốc nhỏ người ta thường sử dụng cho máy nén.

## 11.2. BÔI TRƠN Ở DÀI VÔ TẬN

Khi nghiên cứu các bài toán bôi trơn ngõng trục ta giả thiết rằng: Ngõng bố trí lệch tâm trong ống, còn khoảng hở giữa ngõng và ống được chất bôi trơn diền đầy; ta coi ngõng trục dài vô tận (điều đó kéo theo giả thiết màng bôi trơn là những mặt phẳng song song). Kí hiệu đường kính ngõng là  $r_1$  bề dày biến thiên của màng dầu là  $h$  (hình 11.1) và cho rằng ngõng quay với vận tốc góc không đổi theo chiều kim đồng hồ, vận tốc dài trên bề mặt ngõng sẽ là:

$$U = r_1\omega \quad (11.1)$$

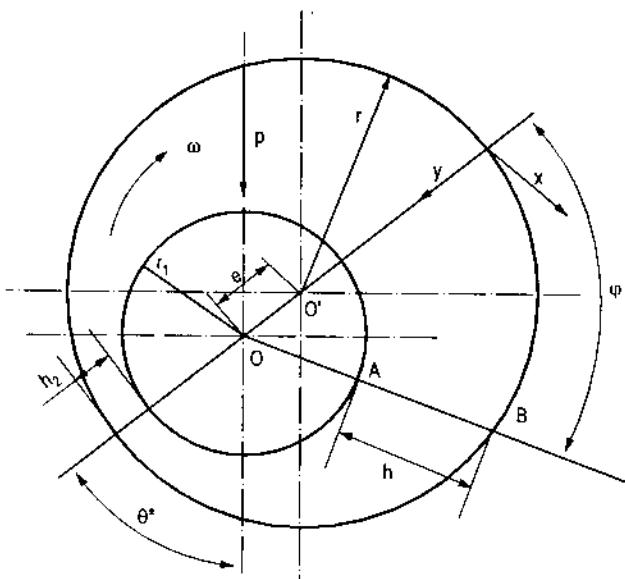
Vị trí phần tử bất kì trong màng bôi trơn sẽ được xác định bằng tọa độ X và Y, trục X theo cung tròn của ống. Ta cho rằng bề dày của màng dầu bôi trơn so với bán kính ngõng trục có thể bỏ qua, tức là coi:

$$X = r\cdot\varphi \quad (11.2)$$

$\varphi$  - góc tính từ đường nối tâm.

00' - khoảng cách giữa tâm ống và tâm trục, gọi là độ lệch tâm, kí hiệu là e còn:

$$\Delta = r - r_1 \quad (11.3)$$



Hình 11.1

$\Delta$  - khe hở hướng kính, bỏ qua giá trị góc bé  $O'B0$  ta có:

$$\begin{cases} OB = O'B + e \cos \varphi \\ h + r_1 = r + e \cos \varphi \end{cases} \quad (11.4)$$

Từ (11.4) ta có:

$$h = r - r_l + e \cos \varphi = \Delta + e \cos \varphi \quad (11.5)$$

Đặt  $\chi = \frac{e}{\Delta}$  (gọi là độ lệch tâm tương đối).

Ta có:  $h = \Delta(1 + \chi \cos \varphi) \quad (11.6)$

Phương trình Raynal áp dụng trong trường hợp này có dạng:

$$\frac{1}{r_l} \cdot \frac{dp_\infty}{d\varphi} = 6\mu U \cdot \frac{h - h_m}{h^3} \quad (11.7)$$

$h_m$  - bề dày màng bôi trơn tại điểm áp lực lớn nhất, thay (11.6) vào (11.7) ta được:

$$\frac{dp_\infty}{d\varphi} = \frac{6\mu U_1}{\Delta^2} \cdot \frac{(1 + \chi \cos \varphi) - (1 + \chi \cos \varphi_m)}{(1 + \chi \cos \varphi)^3} \quad (11.8)$$

Tích phân (11.8) ta có:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta U \cdot \frac{dh}{dx} \quad (11.9)$$

Ở đây:

$$I_1 = \int \frac{d\varphi}{(1 + \chi \cos \varphi)^2} \quad (11.10)$$

$$I_2 = \int \frac{d\varphi}{(1 + \chi \cos \varphi)^3} \quad (11.11)$$

Sử dụng phép thế:

$$\cos \varphi = -\frac{(\chi + \cos \eta)}{1 + \cos \eta} \quad (11.12)$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \frac{\sqrt{1 - \chi^2} \cdot \sin \eta}{1 + \chi \cos \eta} \quad (11.13)$$

Vì phân và rút gọn ta được:

$$d\varphi = -\frac{\sqrt{1 - \chi^2}}{1 + \chi \cos \eta} \cdot d\eta \quad (11.14)$$

$$I_1 = -\int \frac{1 + \chi \cos \eta}{(1 - \chi^2)^{3/2}} d\eta = \frac{\eta - \chi \sin \eta}{(1 - \chi^2)^{3/2}} \quad (11.15)$$

$$I_2 = -\int \frac{(1 + \chi \cos \eta)^2}{(1 - \chi^2)^{5/2}} \cdot d\eta = -\frac{\eta + 2\chi \sin \eta \frac{\chi^2 \eta}{2} + \frac{\chi^2}{2} \cdot \sin 2\eta}{(1 - \chi^2)^{5/2}} \quad (11.16)$$

Và

$$P_\infty = \frac{2\mu U r_1}{\Delta^2} \cdot \frac{1}{(1-\chi^2)^{3/2}} (A\eta + B \sin \eta + C \sin 2\eta + D) \quad (11.17)$$

Trong đó:

$$A = 3 \cdot \frac{H(2+\chi^2)}{2(1-\chi^2)} - 1 \quad (11.18)$$

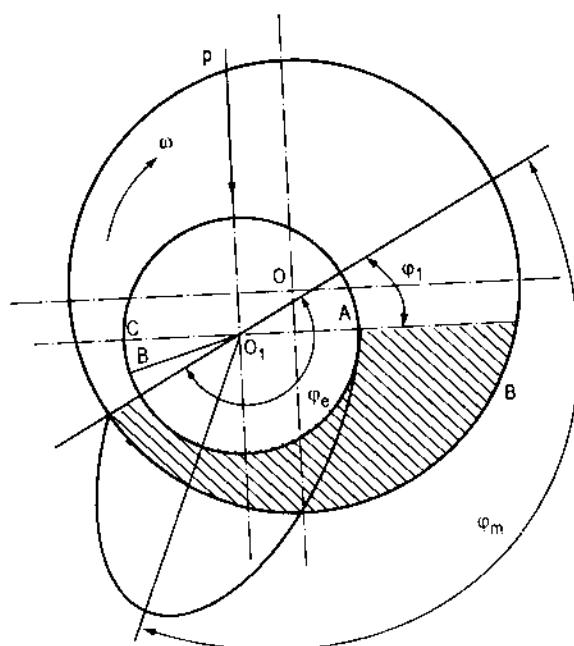
$$B = 3\chi \left( \frac{2H}{1-\chi^2} - 1 \right) \quad (11.19)$$

$$C = 3 \cdot \frac{H}{4} \cdot \frac{\chi^2}{(1-\chi^2)} \quad (11.20)$$

$$H = 1 + \chi \cos \varphi_m \quad (11.21)$$

Hằng số tích phân D trong (11.17) được xác định theo điều kiện biên, áp lực ở biên màng bôi trơn sẽ triệt tiêu khi  $\varphi = \varphi_1$ .

$$D = \frac{1}{(1-\chi^2)^{3/2}} (A\eta_1 + B \sin \eta_1 + C \sin 2\eta_1) \quad (11.22)$$



Hình 11.2: Sơ đồ tính biên màng bôi trơn

Nếu biết được biên của màng bôi trơn, ta tính được các hệ số A, B, C;  $\varphi_1$ : vị trí đầu của màng bôi trơn;  $\varphi_2$ : vị trí ngắt quãng của màng bôi trơn. Biên của màng bôi trơn của

để dài vô tận có thể lấy theo như ổ có chiều dài giới hạn. Ở đây lưu ý rằng: sự phân bố các biên màng bôi trơn ổ dài vô tận phải được xem như giới hạn cho phép đối với ổ có chiều dài giới hạn.

Sự phân bố biên của màng bôi trơn phụ thuộc rất nhiều vào các thông số kết cấu của ổ (giá trị độ hở tương đối, tỉ số chiều dài trên đường kính  $\frac{L}{D}$ ), kết cấu của bạc (bạc tròn, bạc nửa, bạc  $120^\circ$  hay nhiều vòng bạc) và còn phụ thuộc vào điều kiện sử dụng (vì nó sẽ làm thay đổi giá trị của độ lệch tâm tương đối  $\chi$ , ở đây phải kể đến đặc tính của chất bôi trơn, phương pháp và vị trí bôi trơn).

Những yếu tố này đều có ảnh hưởng đến sự phân bố biên của màng dầu bôi trơn. Dòng chảy của dầu bôi trơn sẽ ổn định trong khoảng cung  $\widehat{AB}$  (vì đi qua vùng thắt hẹp) hình 11.2.

Nếu chất bôi trơn chảy theo tiếp tuyến càng nhiều, thì giá trị  $\widehat{AB}$  càng lớn. Khi lượng dầu đưa vào ổ cố định, lượng dầu chảy theo hướng tiếp tuyến sẽ giảm nếu giảm chiều dài ổ. Có nghĩa là nếu giảm  $\frac{L}{D}$  thì số lượng dầu tăng lên thêm chỉ chảy ra mặt bên ổ mà thôi. Điều này nhất định ảnh hưởng đến sự phân bố áp lực trong màng bôi trơn và làm giảm cung  $\widehat{AB}$ . Tương tự, khi tăng giá trị khe hở tương đối  $\psi$  thì giá trị cung  $\widehat{AB}$  cũng giảm. Đặc biệt, kết cấu ổ, phương pháp bôi trơn, rãnh bôi trơn sẽ có ảnh hưởng rất lớn đến biên của màng dầu bôi trơn. Lưu ý rằng, phân bố các lỗ dầu, rãnh dầu và vùng thắt không làm tăng áp lực tại đó, vì áp lực đưa vào chưa đủ lớn so với áp lực dư trong buồng dầu. Vì vậy chất bôi trơn nên đưa vào vùng không có tải của màng dầu. Nếu ổ làm việc ở chế độ thủy động, đối với ổ có bạc tròn đều, màng bôi trơn sẽ ở lại vị trí có khe hở lớn nhất ( $\varphi_1 = 0$ ). Đối với ổ có một mảnh, góc ôm  $\alpha$  và đường tải trọng chia đôi góc  $\alpha$ , thì màng bôi trơn sẽ bắt đầu ở vị trí lệch với đường tác dụng của tải trọng một góc  $\alpha/2$  (tức là ở mép phần chịu tải của ổ).

Chỗ đứt quãng của màng bôi trơn  $\varphi_2$  xác định rất phức tạp vì phụ thuộc vào việc bố trí ngõng trực trong ổ (mà đặc trưng của nó là đại lượng lệch tâm tương đối  $\chi$ ). Các yếu tố khác như: khe hở tương đối, lượng dầu, bản chất của dầu, đều có ảnh hưởng trực tiếp đến giá trị cung  $\widehat{AB}$  của màng dầu và khả năng tải của ổ.

Vì vậy, khi chưa có số liệu thực nghiệm đáng tin cậy, để có thể xác định chính xác chỗ ngắt quãng của màng bôi trơn, người ta thường sử dụng các giả thiết khác nhau. Hiện nay có ba giả thiết, thường được áp dụng:

1. Chỗ ngắt quãng của màng bôi trơn sẽ là chỗ có khe hở giữa ngõng trực và ổ nhỏ nhất.
2. Chỗ ngắt quãng của màng dầu sẽ là vị trí, mà tại điểm đó, biểu đồ phân bố áp lực bằng không  $p = 0$ .

3. Chỗ ngắt quãng của màng dầu sẽ là vị trí mà ở đó biểu đồ phân bố áp lực bằng không  $p = 0$  và đạo hàm riêng của nó bằng không:  $\frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0$ .

### 11.3. BÔI TRƠN Ổ CÓ CHIỀU DÀI GIỚI HẠN

Dòng bôi trơn mặt bên là yếu tố rất quan trọng, không những là đối tượng xác định mà còn là đối tượng điều chỉnh màng bôi trơn của ổ thực. Tuy vậy, người ta chỉ mới nghiên cứu lí thuyết này, khi bắt đầu sử dụng rộng rãi các bộ phận ma sát, làm việc với vận tốc lớn, chịu nhiệt. Khi sử dụng phương pháp bôi trơn bằng áp lực, chất bôi trơn chảy ra mặt bên sẽ làm ảnh hưởng lớn đến phân bố áp suất động lực.

Đối với loại ổ này, áp lực giảm đến không, từ đầu màng bôi trơn đến cuối màng bôi trơn. Đồng thời áp lực cũng giảm đến không từ giữa ổ đến mặt bên. Điều này làm cho phân bố bôi trơn trong ổ khác với loại ổ không có mặt bên. Song song với vấn đề này còn tồn tại sự thay đổi ma sát, sự tỏa nhiệt trong màng bôi trơn. Sự thay đổi đặc tính trong màng bôi trơn ổ có chiều dài giới hạn làm cho các hệ số  $K_1$  và  $K_2$  luôn nhỏ hơn 1, chúng thay đổi từ 1 đến 0. Các hệ số  $K_1$  và  $K_2$  là các hệ số ma sát tương quan giữa hệ số giới hạn đối với ổ dài vô tận. Trong các kết cấu thường dùng hiện nay giá trị của  $K_1$  nằm trong khoảng 0,3 - 0,75 còn  $K_2$  nằm trong khoảng 0,6 - 0,9;  $K_1$ ,  $K_2$  được gọi là hệ số chịu tải tương đối và lực cản quay của ổ. Đối với ổ giới hạn, còn phải chú ý đến lượng dầu chảy ra mặt bên của ổ  $Q_T$  và đặc trưng không thứ nguyên:

$$q_t = \frac{Q_T}{L h r_l w \varphi} \quad (11.23)$$

Như vậy, bản chất của lí thuyết ổ có chiều dài giới hạn là xác định hệ số  $K_1$ ,  $K_2$  và  $q_t$  đối với từng trường hợp cụ thể.

#### 11.3.1. Phân bố áp lực trong màng dầu bôi trơn ổ có chiều dài giới hạn

Phương trình Räynol cho phân bố áp lực trong màng bôi trơn, khi ngõng trực quay, trong điều kiện đẳng nhiệt có thể viết:

$$\frac{1}{r_l^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial Z} \right) = 6\mu\omega \frac{dh}{d\varphi} \quad (11.24)$$

Trong đó:  $\omega$  - vận tốc quay,  $\varphi$  - hệ toạ độ khảo sát.

Ta đặt các biến số mới để đưa về dạng không thứ nguyên:

$$W = \frac{Z}{L/2}; \quad \bar{h} = \frac{h}{\Delta}; \quad \bar{p} = \frac{P\varphi^2}{2\mu\omega}$$

Phương trình (11.24) có thể viết dưới dạng sau:

$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} \left( \bar{h}^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial w} \left( \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial w} \right) = 3 \frac{dh}{d\varphi} \quad (11.25)$$

Tại mặt phẳng chia đôi ổ ta có  $Z = 0$  nên giới hạn của biến số  $W$  là " $\pm 1$ " thay  $h = 1 + \chi \cos \varphi$  nên có thể viết:

$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} \left( \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \varphi} \right) + \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial w} \left( \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial w} \right) = 3\chi \sin \varphi \quad (11.26)$$

Biểu diễn hàm  $P$  dưới dạng tích:

$$P = E(\varphi) f(w) \quad (11.27)$$

Đặt  $E(\varphi)$  dưới dạng  $P_\infty(\varphi)$  và  $f(w)$  dưới dạng chuỗi:

$$f(w) = \sum_{m=1}^n C_m U_m(w) \quad (11.28)$$

Kết quả sẽ có dạng:

$$\bar{P} = P_\infty \sum_{m=1}^n C_m U_m(W) \quad (11.29)$$

Hệ phương trình Galerkin để xác định  $C_m$  được viết dưới dạng:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{-1}^1 \left[ \frac{\partial p}{\partial \varphi} \left( \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \varphi} \right) + \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial w} \left( \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial w} \right) \right] = \bar{p}_\infty U_i(w) \quad (11.30)$$

$$d\varphi dw = -3\chi \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} p_\infty \sin \varphi U_i(w) d\varphi dw$$

Bởi vì:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \varphi} = \frac{3}{\bar{h}^3} (\bar{h} - H) \sum_{m=1}^n C_m U_m(W) \quad (11.31)$$

Với  $H = 1 + \chi \cos \varphi$  ta có:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{-1}^1 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \left( \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \varphi} \right) \bar{p}_\infty U_i(w) d\varphi dw = -3\chi \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} p_\infty \sin \varphi d\varphi \sum_{m=1}^n C_m \int_{-1}^1 U_m U_i dw \quad (11.32)$$

Còn:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{-1}^1 \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial w} \left( \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial w} \right) \bar{p}_\infty U_i(w) d\varphi dw = \left( \frac{D}{L} \right)^2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \bar{h}^3 p_\infty dw \sum_{m=1}^n C_m \int_{-1}^1 \frac{d_2 U_m}{d^2 w} U_i(w) dw \quad (11.33)$$

Trong đó:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} p_\infty \sin \varphi d\varphi = \varphi_\infty \sin \theta \quad (11.34)$$

Thay (11.31), (11.32) vào (11.34) ta có hệ phương trình để tính hệ số  $C_m$ :

$$\sum_{m=1}^n C_m A_m - \left( \frac{D}{L} \right)^2 G \sum_{m=1}^n C_m B_{mi} = \int_{-1}^1 U_i(w) dw \quad (11.35)$$

Ở đây:

$$G = \frac{1}{3\chi\varphi_\infty \sin \theta} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} p_\infty \bar{h}^3 d\varphi \quad (11.36)$$

$$A_{mi} = \int_{-1}^1 U_m U_i dw \quad (11.37)$$

$$B_{mi} = \int_{-1}^1 \frac{d^2 U_m}{dw^2} U_i(w) dw \quad (11.38)$$

Dạng của hàm số  $C_m$  sẽ phụ thuộc vào hàm phân bố áp lực dọc theo trục của  $\delta$ . Có thể mô tả dưới dạng hàm lượng giác:

$$U_k(w) = \cos\left(\frac{2K-1}{2}\pi w\right) \quad (11.39)$$

Từ đó ta nhận được:

$$\begin{aligned} A_{mi} &= \int_{-1}^1 \cos\left(\frac{2m-1}{2}\pi w\right) \cos\left(\frac{2i-1}{2}\pi w\right) dw \\ &= \begin{cases} 0 & \text{khi } i \neq m \\ 1 & \text{khi } i = m \end{cases} \end{aligned} \quad (11.40)$$

$$\begin{aligned} B_{mi} &= \frac{(2m-1)^2}{4} \pi^2 \int_{-1}^1 \cos\left(\frac{2m-1}{2}\pi w\right) \cos\left(\frac{2i-1}{2}\pi w\right) dw \\ &= 0 \text{ khi } i \neq m \\ C_{mi} &= \frac{(2m-1)^2}{4} \pi^2 \text{ khi } i = m \end{aligned} \quad (11.41)$$

$$\int_{-1}^1 U_i dw = \int_{-1}^1 \cos\left(\frac{2i-1}{2}\pi w\right) dw = \frac{(-1)^{i+1}}{2i-1} \cdot \frac{4}{\pi} \quad (11.42)$$

Theo (11.35) ta có:

$$\frac{1}{C_m} = (-1)^{m+1} \pi \frac{2m-1}{4} \left[ 1 + \frac{(2m-1)^2}{4} \pi^2 \left( \frac{D}{L} \right)^2 G \right] \quad (11.43)$$

Phương trình (11.4) cho phép xác định  $C_m$ , trong đó  $G$  là đại lượng phụ thuộc vào từng giá trị riêng của  $\chi$  và đã được thống kê theo bảng.

### 11.3.2. Khả năng mang tải của màng dầu

Trên cơ sở xác định được sự phân bố áp lực theo chu vi ngõng trực, hệ số chịu tải có thể tính:

$$\varphi \cos \theta = \frac{1}{2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{-1}^1 p \cos \varphi d\varphi dw \quad (11.44)$$

Thay  $\bar{p}$  ở (11.29) vào (11.44) ta có:

$$\begin{aligned}\varphi &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\cos \theta} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} p_\infty \cos \varphi d\varphi \sum_{m=1}^n C_m \int_{-1}^1 U_m(w) dw \\ &= \frac{1}{2} \varphi_\infty \sum_{m=1}^n C_m \int_{-1}^1 U_m(w) dw\end{aligned}\quad (11.45)$$

$\varphi_\infty$  - hệ số tải trọng của ống dài vô tận và hệ số tải trọng tương đối là:

$$K_1 = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^n C_m \int_{-1}^1 U_m(w) dw \quad (11.46)$$

$K_1$  phụ thuộc vào dạng hàm số gần đúng, và mức độ chính xác của phép giải hàm lượng giác.

$$\int_{-1}^1 U_m(w) dw = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(-1)^{m+1}}{2m-1} \quad (11.47)$$

$$\text{Và } K_1 = \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^n \frac{(-1)^{m+1}}{2m-1} C_m \quad (11.48)$$

Hoặc là:

$$K_1 = \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \left[ 1 + G \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{(2m-1)\pi^{2-1}}{4} \right] \quad (11.49)$$

Giá trị của hệ số tải trọng  $\varphi$  ứng với tỉ số  $L/D$  được trình bày theo bảng cho trước. Đối với ống có chiều dài giới hạn, khả năng mang tải sẽ thay đổi rất rõ ràng khi  $L/D \leq 1,5$ . Còn khi  $L/D > 1,5$  khả năng tải tăng không đáng kể. Đối với ống giới hạn, hệ số  $K_1$  cũng có ảnh hưởng rất lớn đến khả năng tải của ống.

### 11.3.3. Ma sát trong chuyển động của ngõng trực

Ta có thể tính hệ số cảm quay theo sự phân bố áp lực trên đường tròn ngõng trực:

$$\zeta = \frac{1}{2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{-1}^1 \tau d\varphi dw = \frac{1}{4} d\varphi dw \quad (11.50)$$

Sử dụng (11.34) và tích phân từng phần (11.50) ta có:

$$\zeta = \frac{1}{4} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{-1}^1 \tau d\varphi dw \pm \frac{\chi}{2} \zeta \sin \theta \quad (11.51)$$

Trong đó:

$$K_1 = \frac{\zeta}{\zeta_\infty} \rightarrow \zeta = \zeta_\infty K_1 \quad (11.52)$$

Lấy  $p$  từ (11.29) trong trường hợp ma sát chỉ xuất hiện ở phần làm việc của màng bôi trơn, ta có:

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\eta_2 \eta_1}{\sqrt{1-\chi^2}} \pm \frac{\chi}{2} K_1 \zeta_\infty \sin \theta \quad (11.53)$$

Nếu coi ma sát có trên toàn bộ khe hở thì:

$$\zeta^f = \frac{\Pi}{\sqrt{1-\chi^2}} \pm \frac{\chi}{2} K_1 \zeta_\infty \sin \theta \quad (11.54)$$

Trong đó dấu "+" là đối với ngõng trực, còn dấu "-" là đối với ỏ trực. So sánh (11.53) và (11.54) ta tìm được công thức tính hệ số cản quay tương đối:

$$K_2 = K_1 + T(1 - K_1) \quad (11.55)$$

$$\text{Trong đó: } T = \frac{1}{2} \frac{\eta_2 - \eta_1}{\sqrt{1-\chi^2}} \cdot \frac{1}{\zeta_\infty} \quad (11.56)$$

Trị số  $\zeta^f$  đối với ỏ một nửa và ỏ  $120^\circ$  được tra theo bảng. Hệ số ma sát là đại lượng tỉ lệ với hệ số cản quay và được viết:

$$\frac{f}{4} = \frac{\xi}{\xi_f} \quad (11.57)$$

Theo (11.55) chứng tỏ  $K_2 > K_1$ , nghĩa là hệ số ma sát của ỏ, có chiều dài giới hạn luôn lớn hơn hệ số ma sát của ő có chiều dài vô hạn. Do đó, khả năng mang tải giảm xuống nhanh, khi ta giảm tỉ số chiều dài  $L/D$ .

#### 11.3.4. Tiêu hao chất bôi trơn chảy ra mặt bên

Ta coi sự chênh lệch lượng dầu chảy vào màng bôi trơn và lượng dầu chảy ra khỏi màng bôi trơn là lượng dầu tiêu hao ở mặt bên ỏ. Đặt lượng chất lỏng theo màng bôi trơn trên một đơn vị chiều dài theo hướng quay là  $q$ , phương trình tiêu hao dầu có thể viết:

$$q = -\frac{h^3}{12\mu r_l} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \omega r_l h \quad (11.58)$$

Lượng chất lỏng qua màng bôi trơn dọc theo suốt chiều dài  $L$  là:

$$Q = \frac{\omega r_l h}{2} L - \frac{h^3}{12\mu r_l} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} P dz \quad (11.59)$$

Viết lại (11.59) dưới dạng không thứ nguyên:

$$\frac{4Q}{Lr_l^2 W^4} = 2\bar{h} - \frac{\bar{h}}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \int_{-1}^1 \bar{P} dw \quad (11.60)$$

Kết hợp (11.29); và (11.45) và (11.60) ta có:

$$\frac{2Q}{Lr_l^2 w^4} = \bar{h} \frac{K_1}{3} \bar{h}^3 \frac{d\bar{p}_\infty}{d\varphi} \quad (11.61)$$

$$\frac{2Q}{Lr_1^2 w^4} = (1 - K_1) \bar{h} + K_1 H \quad (11.62)$$

Hiệu số lượng dầu tại biên  $\varphi = \varphi_1$  và  $\varphi = \varphi_2$  là lượng dầu tiêu hao, hệ số tiêu hao có thể viết:

$$q_t = \frac{Q}{Lr_1^2 w^4} = \frac{1}{4} [(1 - K_1)(\bar{h}_1 - \bar{h}_2) + K_1(H - \bar{h}_2)] \quad (11.63)$$

Giá trị hệ tiêu hao dầu  $q_t$  phụ thuộc vào  $\chi$  và  $L/D$  đã được lập thành bảng. Điểm cực đại của các đường cong quan hệ này sẽ bị dịch về phía bên phải, nếu ta giảm tỉ số  $L/D$ . Điều này được giải thích do ảnh hưởng ngược của gradien áp lực và mặt cắt qua dòng chảy mặt bên ổ.

#### 11.4. Ổ HƯỚNG KÍNH CÓ BẠC TỰ LỰA

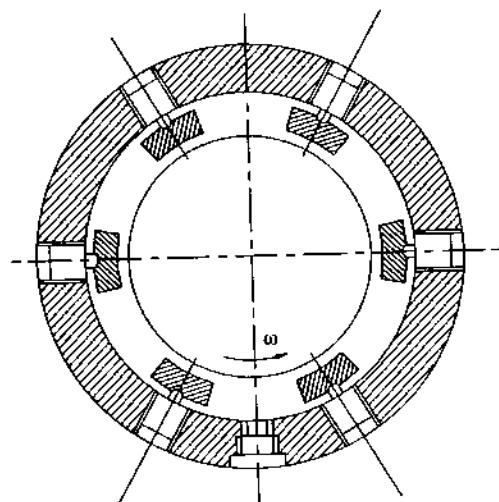
Loại ổ hướng kính có bạc tự lựa chỉ mới được áp dụng, khi việc sử dụng ổ thường, có bạc cố định không còn đem lại kết quả mỹ mãn. Kết cấu của loại ổ này thường phức tạp hơn nhiều. Khác với loại ổ có kết cấu cổ điển, loại ổ này, không những không gây kích thích và duy trì dao động tự nhiên của rôto cao tốc ở màng bôi trơn, mà còn có tính ổn định cao do tác dụng của ngoại lực điều hoà. Ngoài ra, ổ còn có khả năng tự lựa theo độ xiên của trực dẫn động. Tuy nhiên, sự tổn hao do ma sát cũng giảm, khi có bôi trơn bạc riêng biệt. Ổ được sử dụng có hiệu quả trong những turbin có công suất lớn. Chúng được sử dụng để loại trừ dao động tự nhiên của trực trong động cơ cao tốc, trong turbin nhà máy điện.

Hình 11.3 mô tả ổ có bạc tự lựa của hãng FAL - MATIC Mỹ, ổ có sáu bạc riêng biệt, điều chỉnh hướng kính bằng các điểm gối.

Đã có nhiều kiểu ổ loại này, được sử dụng ở nhiều công ty khác nhau. Người ta còn sử dụng bạc có gối hình cầu, đôi khi còn được thiết kế như một khớp động.

##### 11.4.1. Tương quan hình học giữa các kích thước cơ bản của ổ

Hình 11.4 trình bày sơ đồ nguyên lý ổ có bạc tự lựa. Mỗi bạc đều có khả năng quay quanh khớp  $A_K$  một góc  $\beta_K$  (lấy gốc là đường nối  $AKO$ ) theo ngược chiều kim đồng hồ. Sự phân bố của khớp tương đối với mép vào của bạc theo tỉ số:



*Hình 11.3: Ổ sáu bạc tự lựa của hãng "FAL - MATIC"*

$$\gamma_K = \frac{\gamma_K}{\alpha_K} \quad (11.64)$$

Bề dày bạc được đặc trưng bằng thông số:

$$b_K = \frac{B_K}{R} \quad (11.65)$$

Tâm cong của bạc  $O_K$  khi bạc không quay (ở vị trí bình thường) sẽ phân bố trên đường AKO và lệch so với tâm ổ  $O$  một lượng:

$$OO_K = \varepsilon_K \quad (11.66)$$

Độ lệch của tâm cong bạc so với tâm ổ được biểu thị bằng hệ số hình dạng:

Hình 11.4: Sơ đồ tính ổ bạc tự lựa

$$m_K = \frac{\varepsilon_K}{R_K - R - \varepsilon_K} \text{ hoặc } m_K^* = \frac{\varepsilon_K}{R_K - R} \quad (11.67)$$

$$\text{Trong đó: } m_K^* = \frac{m_K}{1 + m_K} \quad (11.68)$$

Nếu  $R_1 = R_2 = \dots = R_s$  và  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_s = r$ , thì tâm cong của bạc sẽ nằm trên đường tròn bán kính  $r$  nhận  $O$  làm tâm. Trong trường hợp này, nếu các bạc phân bố đều theo đường ngõng trực, thì điểm  $O$  sẽ là điểm đối xứng của ổ. Ở điều kiện, tải trọng tĩnh, tâm ngõng trực  $O_C$  và tâm cong của ổ  $O$  được tính bằng độ lệch tâm  $e$  và tâm cong của bạc theo  $e_K$  (tính theo các góc  $\delta$  và  $\delta_K$  (11.4)). Độ dày của màng bôi trơn ở góc qua bất kì được xác định như sau:

Lấy  $O$  làm gốc toạ độ và  $Y$  là trục phân cực khoảng cách từ  $O$  đến bề mặt ngõng và đến mỗi bạc được tính như sau:

$$\xi^2 - 2\xi e \cos(X - \delta) + e^2 = R^2 \quad (11.69)$$

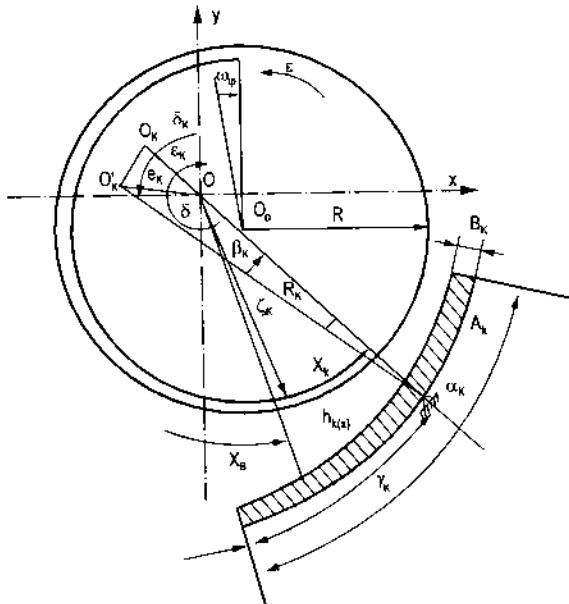
$$\xi_K^2 - 2\xi_K e_K \cos(X - \delta) + e_K^2 = R_K^2 \quad (11.70)$$

Trong đó:

$$e_K^2 = \varepsilon_K^2 + (R_K + B_K)^2 \beta_K^2 \quad (11.71)$$

$$\delta_K = X_K - \text{sign}(\beta_K) \frac{\Pi}{2} \quad \text{Khi } m_K = 0$$

$$\delta_K = X_K + \arctg \frac{R_K + B_K}{\varepsilon_K} \beta_K - \Pi \quad \text{Khi } m_K \neq 0$$



Độ dày của màng bôi trơn:

$$H_K(X) = \xi_K - \xi = e \cos(X - \delta_K) - e \cos(X - \delta) + \left[ R_K^2 + e_K^2 \cos^2(X - \delta_K) - e_K^2 \right]^{0.5} - \left[ R^2 + e^2 \cos^2(X - \delta) - e^2 \right]^{0.5} \quad (11.72)$$

Dạng không thứ nguyên của (11.71), (11.72) có thể viết:

$$\begin{aligned} \Delta_K &= R_K - R - \delta_K \\ \Delta_K^* &= R_K - R \end{aligned} \quad (11.73)$$

Và dạng không thứ nguyên của (11.72) là:

$$\begin{aligned} h_K(X) &= \chi_K \cos(X - \delta_K) + \chi \cos(X - \delta) + \\ &+ \sqrt{\frac{1}{4^2} + \chi_K^2 \cos^2(X - \delta_K) - \chi_K^2} - \sqrt{\frac{1}{4} + \chi^2 \cos^2(X - \delta) - X^2} \end{aligned} \quad (11.74)$$

$$\text{Trong đó: } \chi = \sqrt{m_K^2 + (1 + b_K)^2 \beta_K^2} \quad (11.75)$$

Bỏ qua các đại lượng  $\chi^2$ ,  $\chi_K^2$  vì chúng nhỏ so với các đại lượng  $\frac{1}{4}$  và  $\frac{1}{4^2}$  ta nhận được

phương trình tính chiều dày màng bôi trơn và đạo hàm của nó ở dạng không thứ nguyên:

$$\begin{aligned} h_K(X) &= \chi_K \cos(X - \delta_K) - \chi \cos(X - \delta) + m_K + 1 \\ \frac{dh_K}{dx} &= \chi \sin(X - \delta) - \chi_K \sin(X - \delta_K) \end{aligned} \quad (11.76)$$

Những phương trình này đúng cho mọi ống có bề mặt làm việc dạng cung tròn. Đối với các ống có bậc cố định, và trường hợp cá biệt với ống trực phương trình (11.76) có dạng:

$$h_K(X) = 1 - \chi \cos(X - \delta) \quad (11.77)$$

Vì:  $m_K = \beta_K = b_K = 0$

Nên trong trường hợp ống elíp, có độ elíp m là:

$$h_k(X) = 1 - \chi \cos(X - \delta) + m [1 + \cos(X - \delta_K)] \quad (11.78)$$

Vì:  $m_K = \beta_K = b_K = 0$ ;  $\chi_K = m$

Nên từ (11.71) đối với bậc phía trước ( $k = 1$ )  $\delta_1 = 0$  còn đối với bậc phía trên ( $k = 2$ );  $\delta_2 = TT$ .

#### 11.4.2. Tính năng của ống hướng kính có bậc tự lựa

Tính toán tính năng của ống hướng kính có bậc tự lựa bao gồm:

- Xác định vị trí cân bằng của ngõng trực (toạ độ của  $\chi$  và  $\delta$ ) và với mỗi bậc  $\beta_k$ .

- Xác định khả năng chịu tải, tiêu hao dầu và mất mát do ma sát, trong trường hợp cho trước hướng của tải trọng lên ổ. Dựa trên phương trình Raynor cho dạng tĩnh định, dâng nhiệt ở dạng không thứ nguyên ta có:

$$L(P_k) = \frac{\partial}{\partial X} \left( h_k^3 \frac{\partial P_k}{\partial X} \right) + A \frac{\partial}{\partial Z} \left( h_k^3 \frac{\partial P_k}{\partial X} \right) = 6 \frac{\partial h_k}{\partial X} \quad (11.79)$$

Trong đa số trường hợp (11.79) được giải theo điều kiện sau:

$$\begin{aligned} P_k(X, Z) &= \pm 0,5 = 0 \\ P_k(X_B, Z) &= P \\ P_k(X_B + \alpha_k)Z &= PN \end{aligned} \quad (11.80)$$

Sự quay của các bậc không phụ thuộc vào nhau, vì vậy có thể tính các đặc tính của mỗi bậc riêng biệt rồi kết hợp chúng lại, ta có đặc tính làm việc của toàn ổ. Bài toán được giải ở, giá trị xác định của độ lệch tâm tương đối  $\chi$ , vị trí cân bằng tĩnh của ngõng và của mỗi bậc (góc  $\delta$  và  $(\beta_k)$  cũng như sự phân bố áp lực trên bề mặt bậc ứng với hướng cho trước của tải trọng lên ổ, được xác định bằng phép giải phương trình Raynor, ta có phương trình cân bằng:

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{\sum_{k=1}^s \frac{\mu_k l_k}{\mu l} \left( \frac{\Delta}{\Delta_k} \right)^2 \int_{F_K} P_k(X, Z) \sin X dF}{\sum_{k=1}^s \frac{\mu_k l_k}{\mu l} \left( \frac{\Delta}{\Delta_k} \right)^2 \int_{F_K} P_k(X, Z) \cos X dF} \quad (11.81)$$

$$\int_{F_K} P_k(X, Z) \sin(X - X_K) dF = 0 \quad (11.82)$$

Trong đó  $F_K$  là miền tích phân, theo bề mặt làm việc của bậc thứ  $k$  được tính từ điều kiện  $P_k(x, z) \geq$  với diện tích làm việc của màng dầu là lớn nhất, các trị số  $\beta_k$  và  $\delta$  lấy gần đúng. Tính năng tổng cộng của ổ được tính như sau:

- Hệ số chịu tải:

$$\xi = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2} \quad (11.83)$$

$$\text{Trong đó: } \xi_x = \frac{W_x 4^2}{2Rl\mu w} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^s \frac{l_k}{l} \left( \frac{\Delta}{\Delta_k} \right)^2 \int_{F_K} P_k(x, z) \sin x dF$$

$$\xi_y = \frac{W_x 4^2}{2Rl\mu w} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^s \frac{l_k}{l} \left( \frac{\Delta}{\Delta_k} \right)^2 \int_{F_K} P_k(x, z) \cos x dF \quad (11.84)$$

Tổn hao dầu ở mép vào và mặt bên là:

$$q_{bx} = \frac{Qbx}{Rl\mu w} = \sum_{k=1}^s \frac{l_k \Delta_k}{l \Delta} \int_{0,5}^{0,5} \left( \frac{hk}{2} - \frac{h^3 k}{12} \left( \frac{\partial P_k}{\partial x} \right)_{x=x_B} dZ \right) \quad (11.85)$$

$$q_T = \frac{Qbx}{R^3/\mu w} = \sum_{k=1}^s 2 \frac{l_k \Delta_k}{l\Delta} \int_{x_B}^{x_B + \alpha_k} \left( \frac{h^3}{12} x \frac{\partial P_k}{\partial x} \right)_{z=\pm 0.5} dx \quad (11.86)$$

Sự tiêu hao công suất do ma sát trong vùng làm việc của ổ sẽ là:

$$\xi_T = \frac{N4}{R^2/w^2 \mu} = \sum_{k=1}^s \frac{l_k}{l} \left( \frac{\Delta}{\Delta_k} \right)^2 \int_{x_B}^{x_B + \alpha_k} \left( \frac{hk}{2} \frac{\partial p_k}{\partial x} + \frac{l}{hk} \right) dF \quad (11.87)$$

Trong các biểu thức trên  $l$  và  $\Delta$  đặc trưng cho chiều dài và độ hở.

Nếu các bậc giống nhau, thì tỉ số  $\frac{l}{hk}$  và  $\frac{\Delta}{\Delta_k}$  đều bằng một.

Phương trình Râynol ở dạng đạo hàm riêng (11.79) được đưa về dạng vi phân thường, kết quả có dạng:

$$P(x, z) = \sum_{i=1,3,5} \varphi_i(x) \cos i\pi z \quad (11.88)$$

Phương trình này thỏa mãn điều kiện thứ nhất của (11.80) ở cạnh bắc.

Về phái (11.88) chỉ áp dụng trong trường hợp, ngõng trực trong bậc không lệch chéo, biên màng bôi trơn của trực không song song. Hàm ẩn  $\varphi_i(x)$  phải thỏa mãn điều kiện biên thứ hai và thứ ba của (11.80) (nghĩa là điều kiện mép vào và mép ra của ổ), khai triển theo giới hạn của áp lực  $P_o$  và  $P_N$ , ta có điều kiện biên tại  $X_B$  của hàm  $\varphi_i(x)$ :

$$\varphi_i(x_B) = \varphi_{oi} = (-1)^{\frac{i+3}{2}} \frac{4}{i\pi} P_o \quad (11.89)$$

$$\varphi_i(x_B - \alpha_k) = \varphi_{oi} = (-1)^{\frac{i+3}{2}} \frac{4}{i\pi} P_N \quad (11.90)$$

Ngoài ra, từ điều kiện không âm ta có (11.90):

$$\sum_{i=1,3,5} \varphi_i(x) \geq 0 \quad (11.91)$$

Sau đó sử dụng phương pháp của Galerkin sao cho kết quả của (11.88) đưa về (11.89) là trực giao cho mọi hàm phân bố:

$$\int_{-0.5}^{0.5} \sum_i \left[ \frac{d}{dx} \left( h^3 \frac{d\varphi_i}{dx} \cos i\pi z - i^2 \pi^2 A h^3 \varphi_i \cos i\pi z - 6 \frac{dh}{dx} \right) \right] \cos j\pi z dz = 0 \quad (11.92)$$

( $i, f = 1, 3, 5 \dots$ ).

Sau phép tích phân và biến đổi ta nhận được phương trình để tính  $\varphi_i(x)$ :

$$\frac{d}{dx} \left( h^3 \frac{d\varphi_i}{dx} \right) - i^2 \pi^2 A h^3 \varphi_i = (-1)^{\frac{i+3}{2}} \frac{24}{i\pi} \frac{dh}{dx} \quad (i = 1, 3, 5 \dots)$$

Qua (11.92) ta thấy  $\varphi_i(x)$  không phụ thuộc lẫn nhau, do đó có thể bỏ qua kí hiệu  $i$  và (11.92) có dạng:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + a(x)\frac{d\varphi}{dx} + b(x)\varphi = f(x) \quad (11.93)$$

Trong đó:  $a(x) = \frac{3}{h} \cdot \frac{dh}{dx}$  (11.94)

$$b = -i\pi^2 A \quad (11.95)$$

$$f(x) = (-1)^{\frac{i+3}{2}} \frac{24}{i\pi h^3} \cdot \frac{dh}{dx} \quad (11.96)$$

Theo phương pháp phân tử hữu hạn, ta chia khoảng tích phân thành  $N$  phân bằng nhau, có độ dài  $\Delta x = \alpha / N$  và lấy đạo hàm tại  $j$ .

$$\left( \frac{d\varphi}{dx} \right)_j = \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_{j-1}}{2\Delta x} \quad (11.97)$$

$$\left( \frac{d^2\varphi}{dx^2} \right)_j = \frac{\varphi_{i+1} - 2\varphi_j + \varphi_{j-1}}{(\Delta x)^2}$$

Thay (11.97) vào (11.93) khi  $x = x_j = x_B + j\Delta x$  ta được

$$A_j \varphi_{j+1} + B_j \varphi_j + C_j \varphi_{j-1} = F_j \quad (11.98)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} A_j &= 1 + 0,5 a_j \Delta x ; C_j = 1 - 0,5 a_j \Delta x \\ B_j &= b_j (\Delta x)^2 - 2 ; F_j = F_j (\Delta x)^2 \\ a_j &= a ; b_j = b(x_j); f_j = f(x_j) \end{aligned} \quad (11.99)$$

Từ tương quan hàm số của các điểm lân cận là:

$$\varphi_{j-1} = \alpha_{j-1} - \beta_{j-1} \varphi_j \quad (11.100)$$

Thay (11.100) và (11.99) ta có phương trình của các hệ số:

$$\alpha_j = \frac{F_j - c_j \alpha_{j-1}}{B_j - C_j \beta_{j-1}} \quad (11.101)$$

$$\beta_j = \frac{A_j}{B_j - C_j \beta_{j-1}}$$

Từ điều kiện giới hạn biên của mép vào màng bôi trơn ta có:

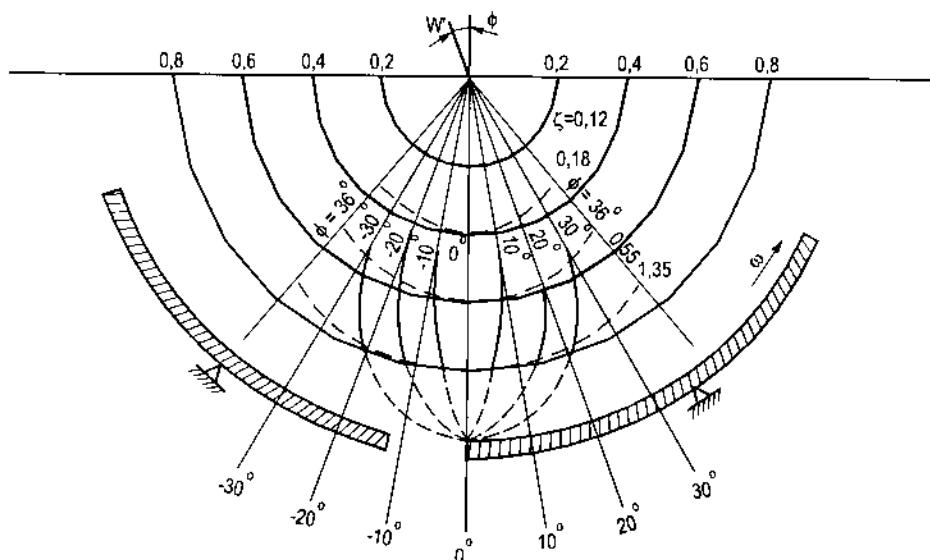
$$\alpha_1 = (F_1 - \varphi_o) / B_1 \quad (11.102)$$

$$\beta_1 = A_1 / B_1$$

Trong đó:  $\varphi_0$  được xác định theo công thức.

Như vậy (11.101) và (11.102) là công thức để tích phân bố áp lực của màng bôi trơn theo chiều dài bậc. Trên hình 11.5 trình bày đường cong của trạng thái cân bằng động đối với ổ có năm bậc là  $1/d = 0,6$ ;  $m_k = 0$ ;  $\delta_k = 0,6$ .

Những đường cong này được dựng với những góc tải  $\phi$  khác nhau.



**Hình 11.5: Đường cong dịch chuyển trạng thái cân bằng dưới các góc tác động tải trọng khác nhau**

Những đường đứt quãng, mô tả giá trị  $\xi$  cố định. Chúng cũng tương tự như trường hợp tải thẳng đứng và bậc dịch đi một góc  $\phi$ . Đối với ổ đối xứng, chỉ cần xét đường tác dụng của tải trọng ở một mảnh giữa hai khớp bên kề nhau. Ta nhận thấy rằng: Nếu tải trọng hướng tới khớp hoặc tới giữa các khớp, thì các đường cong cân bằng sẽ là những đường thẳng trùng với đường tác dụng của tải trọng, điều này chỉ đúng với các bậc có khớp phân bố đối xứng nhau, còn có bậc thì đối xứng tương ứng qua đường tác dụng của tải trọng. Đồng thời hình 11.5 cũng cho thấy nếu độ lệch tâm tương đối X đủ nhỏ so với cấp chính xác thì các đường cong cân bằng có thể coi như đường thẳng trùng với đường tác dụng của tải trọng ở hướng quay bất kỳ.

Mối quan hệ giữa các thông số kết cấu chủ yếu đã được mô tả bằng đồ thị quan hệ qua hệ số chịu tải tổng cộng  $\xi$  và sự mất mát không thứ nguyên do ma sát, khi tải trọng tác dụng vào giữa khớp.

Các đặc tính của ổ mảnh có từ 4 đến 6 bậc được lập thành bảng như sau:

- Chiều dài tương đối  $\lambda = 0,6 ; 0,8$  và 1;
- Vị trí tương đối của điểm tì bậc:  $\gamma = 0,5 ; 0,6$  và 0,65.

Theo bảng ta có thể dễ dàng tính được các đặc tính tổng hợp của ống, thứ tự tính như sau:

*Bước 1:* Từ những thông số hình học của các bậc cho bằng giá trị X và chọn giá trị đầu δ. Tính độ lệch tâm ở từng bậc  $X_k$ . Sau đó tính hướng véc tơ tổng hợp của phản lực thuỷ động và kiểm tra.

$$\vartheta = \arctan \frac{\sum_{k=1}^s \frac{l_k}{l} \left( \frac{\Delta}{\Delta_k} \right)^2 \xi_k \sin X_k}{\sum_{k=1}^s \frac{l_k}{l} \left( \frac{\Delta}{\Delta_k} \right)^2 \xi_k \cos X_k} \quad (11.103)$$

Hướng của véc tơ phải điều chỉnh sao cho  $\vartheta \approx \phi$  (góc của tải trọng) đảm bảo cấp chính xác cần thiết.

*Bước 2:* Sau khi xác định góc cần bằng cần thiết của ngõng trực δ và độ lệch tâm tương đối  $X_k$  ta tính hệ số chịu tải của ống.

$$\xi = \sqrt{\left( \sum_{k=1}^s \xi_k \sin X_k \right)^2 + \left( \sum_{k=1}^s \xi_k \cos X_k \right)^2} \quad (11.104)$$

Üng với giá trị X ta tìm các đặc tính còn lại của bậc theo bảng, và tính các tính năng không thứ nguyên của ống:

$$\xi_T = \sum_{k=1}^s \frac{l_k}{l} \left( \frac{\Delta}{\Delta_k} \right)^2 \xi_k \quad (11.105)$$

$$q_{BX} = \sum_{k=1}^s \frac{l_k}{l} \frac{\Delta_k}{\Delta} q_b_{BX_k} \quad (11.106)$$

$$q_T = \sum_{k=1}^s \frac{l}{l_k} \cdot \frac{\Delta_k}{\Delta} q_{Tk} \quad (11.107)$$

Việc tính toán các đặc tính tổng cộng sẽ đơn giản rất nhiều, nếu các điểm tì của bạn được bót đối xứng nhau qua đường tác dụng của tải trọng và các thông số hình học của các bậc giống nhau.

Trong trường hợp đó, không có góc δ vì quỹ đạo cân bằng dịch chuyển trùng với đường tác dụng của tải trọng. Vì vậy, đối với kết cấu tải hướng thẳng đứng xuống dưới thì  $\delta = 180^\circ$ .

Dưới đây giới thiệu một thí dụ cụ thể để tính toán ống có bốn bậc tự lựa.

- Các điều kiện cho trước:

S = 4 (bốn bậc tự lựa)

- Toạ độ góc của những điểm tì bậc:

$x_1 = 45^\circ; x_2 = 140^\circ; x_3 = 220^\circ; x_4 = 315^\circ$

- Các góc ôm của bậc:

$$\alpha_1 = 45^\circ; \alpha_2 = 140^\circ; \alpha_3 = 60^\circ; \alpha_4 = 50^\circ$$

- Độ dài tương đối của bậc:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0,6$$

- Độ hở hướng kính trong các bậc:

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = \Delta_4 = \Delta$$

- Góc tải trọng  $\phi = 0^\circ$

- Góc cân bằng của ngõng trục:  $\delta = 180^\circ$

Vì các gối của bậc phân bố đối xứng qua đường chịu tải, các đặc tính của các bậc đối xứng có cùng một giá trị như nhau, nên ta có:

$$X_1 = X_4 = 0,4 \cos (45^\circ - 180^\circ) = -0,282$$

$$X_2 = X_3 = 0,4 \cos (140^\circ - 180^\circ) = +0,306$$

Dựa theo bảng và bảng phương pháp nội suy tuyến tính ta có các giá trị tương ứng với  $X_k$ .

$$\xi_1 = \xi_4 = 0,0514; \quad \xi_2 = \xi_3 = 0,224;$$

$$\xi_1^T = \xi_4^T = 0,737 \quad \xi_2^T = \xi_3^T = 1,605$$

$$q_{BX1} = q_{BX4} = 0,744 \quad q_{BX2} = q_{BX3} = 0,438$$

$$q_{T1} = q_{T4} = 0,134 \quad q_{T2} = q_{T3} = 0,098$$

$$h_1 = h_4 = 0,807 \quad h_2 = h_3 = 0,443$$

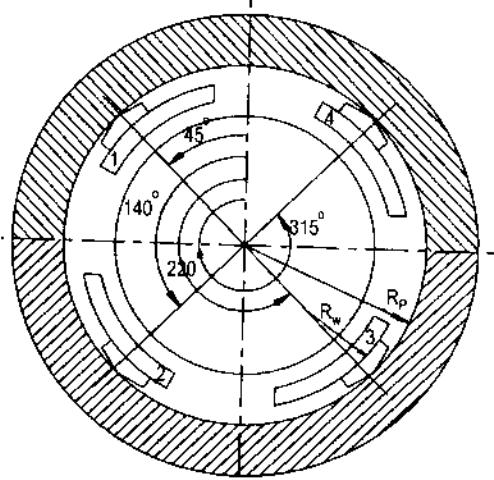
Các đặc tính của ống là:

$$\xi = -(2,0,0514 \cos 45^\circ + 2,0,224 \cos 140^\circ) = 0$$

$$\xi_T = 2,0,737 + 2,1,605 = 4,684$$

$$q_T = 2,0,134 + 2,0,098 = 0,464$$

Các đặc tính của ống với các giá trị  $X$  kí khác, cũng được tính tương tự.



Hình 11.6: Tính toán ống bậc có bốn tuy lumen

## Chương 12

### BÔI TRƠN RỐI (BTR)

### TÍNH TOÁN Ở HƯỚNG KÍNH, BẠC KÍN BÔI TRƠN RỐI

#### 12.1. ĐIỀU KIỆN BÔI TRƠN RỐI

Ở làm việc ở chế độ bôi trơn rối khi:

$$Re_m \geq Re_c$$

Trong đó:  $Re_m$  - trị số Raynol được xác định theo công thức:

$$Re_m = \frac{h_o}{C} \left( \frac{1 + \varepsilon}{1 + \varepsilon \cos \theta} \right)^q \frac{\pi n r_1^2 \phi}{30 \nu} \quad (12.1)$$

C - khe hở hướng kính ban đầu:

$$C = r_2 - r_1 = \frac{d_2 - d_1}{2} \quad (12.2)$$

$h_o$  - chiều dày màng dầu tại điểm có áp lên lớn nhất:

$$h_o = 2C \frac{1 - \varepsilon^2}{2 + \varepsilon^2} \quad (12.3)$$

$\varepsilon$  - độ lệch tâm tương đối:

$$\varepsilon = \frac{e}{C} \quad (12.4)$$

e - độ lệch tâm;

q - số mũ thay đổi độ nhớt của dầu bôi trơn theo nhiệt độ:

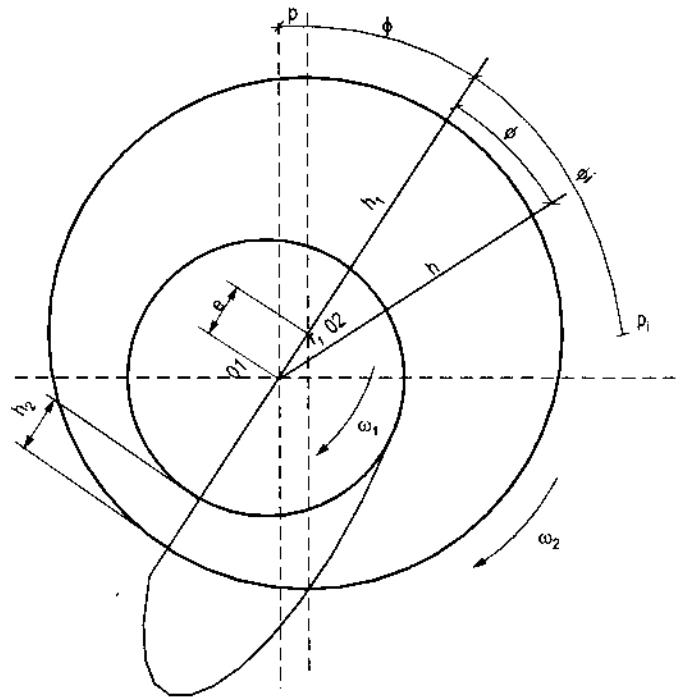
$$q = \frac{\ln \frac{\mu_2}{\mu_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\ln \frac{\mu_1}{\mu_2}}{\ln \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon}} \quad (12.5)$$

$Re_c$  là trị số Raynol tối hạn xác định theo công thức:

$$Re_c = \frac{\zeta \cdot V_c \cdot C}{\mu} = \frac{41,1}{\sqrt{\psi}} \quad (12.6)$$

$\psi$  - độ hở tương đối:

$$\psi = \frac{C}{h_1} = \frac{C}{C(1 + \varepsilon)} = \frac{1}{1 + \varepsilon} \quad (12.7)$$



Hình 12.1

## 12.2. SỰ PHÂN BỐ ÁP LỰC

Sự phân bố áp lực trong lớp dầu phụ thuộc vào góc  $\theta$ , do từ đường nối hai tâm, và phụ thuộc vào  $x_3$ .

$$P = P_o + \frac{6\mu_1\omega_1^2\varepsilon}{C^2(1+\varepsilon)^q(1-\varepsilon^2)^{1-q}} \cdot \frac{1 - \frac{1}{2}\varepsilon^2(1-q)(2-\frac{q}{2})}{1 + \frac{1}{2}\varepsilon^2(1-q)(1-\frac{q}{2})} \cdot \frac{1}{(1+\varepsilon \cos \theta)^2} \left( \frac{\operatorname{ch} \frac{\sqrt{\beta_{1q}}}{r_1} x_3}{1 - \frac{\operatorname{ch} \lambda \sqrt{\beta_{1q}}}{r_1}} \right) \cdot \left\{ \frac{1}{(1+\varepsilon \cos \theta)^2} \left[ \frac{A_{12q}}{A_{11q}} - \frac{1 - \frac{1}{2}(1-q)\left[1 + \varepsilon^2(1-\frac{q}{2})\right]}{1 - \frac{1}{2}\varepsilon^2(1-q)(2-\frac{q}{2})} \times \frac{\varepsilon}{2} \right] \times \sin 2\theta \right\} \quad (12.8)$$

Vì phân hệ thức (12.8) và cho triết tiêu  $\left(\frac{\partial P}{\partial x} = 0\right)$  xác định được  $P_{\max}$  và vị trí  $P_{\max}$ , tức là xác định đã  $\theta_m$ .

$$\cos \theta_m = \frac{-(1+2\epsilon\bar{a}) + \sqrt{(1-2\bar{a}\epsilon)^2 + 8(2\bar{a}-\epsilon)^2}}{2(4\bar{a}-\epsilon)} \quad (12.9)$$

$$P_{max} = P_o + \frac{6\mu_1\omega r_1^2\epsilon}{c^2(1+\epsilon)^q(1-\epsilon^2)^{1-q}} \cdot \frac{1 - \frac{\epsilon^2}{2}(1-q)(2-\frac{q}{2})}{1 + \frac{\epsilon^2}{2}(1-q)(1-\frac{a}{2})} \quad (12.10)$$

$$\cdot \left( 1 - \frac{ch \frac{\sqrt{\beta_{1q}}}{r_1}}{ch \lambda \sqrt{\beta_{1q}}} \right) \cdot \frac{(1+2\bar{a}\cos\theta_m)\sin\theta_m}{(1+\epsilon\cos\theta_m)^2}$$

Với  $\bar{a}$  là hệ số của  $\sin 2\theta$  xác định theo:

$$\bar{a} = \frac{A_{12q}}{A_{11q}} - \frac{1 - \frac{1}{ch 2\lambda}}{1 - \frac{1}{ch \lambda \sqrt{\beta_{1q}}}} \cdot \left( \frac{A_{12q}}{A_{11q}} - \frac{1 - \frac{1}{2}(1-q)[1 + \epsilon^2(1-\frac{q}{2})]}{1 - \frac{1}{2}(1-q).\epsilon^2(2-\frac{q}{2})} \cdot \frac{\epsilon}{2} \right) \quad (12.11)$$

$$\beta_{1q} = 0,83292 + 0,09828q + (0,7412 - 0,4992q)\epsilon \quad (12.12)$$

$$\frac{A_{12q}}{A_{11q}} = 0,05386q - 0,03816 + (0,6524 - 0,0254q)\epsilon \quad (12.13)$$

### 12.3. TẢI TRỌNG CHỊU ĐƯỢC CỦA Ố

Tải trọng chịu được của ống tính được nhờ tích phân áp lực cho bởi công thức (12.8) và đưa ở dạng hệ số chịu tải không thứ nguyên  $\xi$ :

$$P = \frac{2\mu_1\omega r_1 b}{\psi^2} \xi = \frac{4\mu_1\omega \lambda r_1^2}{\psi^2} \xi \quad (12.14)$$

$\lambda$  - hệ số chiều dài của ống:

$$\lambda = b/(2.r_1) \quad (12.15)$$

Hệ số tải trọng  $\xi$  được tính bằng:

$$\xi = \frac{3\sqrt{C_n^2 + C_t^2}}{(1+\epsilon)^q} \quad (12.16)$$

Ở đây  $C_n$  và  $C_t$  là hàm số của  $\epsilon$  và  $q$  được cho bằng các công thức sau:

$$C_\infty = \frac{\psi(1+\epsilon)^q}{6\mu_1\omega r_1 b} P_n = \frac{1}{(1-\epsilon^2)^{1-q}} \cdot \frac{1 - \frac{\epsilon^2}{2}(1-q)(2-\frac{q}{2})}{1 + \frac{\epsilon^2}{2}(1-q)(1-\frac{q}{2})} \cdot \left( 1 - \frac{th \lambda \sqrt{\beta_{1q}}}{\lambda \sqrt{\beta_{1q}}} \right).$$

$$\cdot \frac{\pi}{\varepsilon} \left[ \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} - 1 + \frac{4\bar{a}}{\varepsilon} \left( 1 - \frac{2-\varepsilon^2}{2\sqrt{1-\varepsilon}} \right) \right] \quad (12.17)$$

$$C_t = \frac{\psi^2 (1+\varepsilon)^q}{6\mu_1 \omega_1 b} P_t = \frac{1}{(1-\varepsilon^2)^{1-q}} \cdot \frac{1-\frac{\varepsilon^2}{2}(1-q)(2-\frac{q}{2})}{1+\frac{\varepsilon^2}{2}(1-q)(1-\frac{q}{2})} \cdot \left( 1 - \frac{\text{th} \lambda \sqrt{\beta_{1q}}}{\lambda \sqrt{\beta_{1q}}} \right) \\ \cdot \left[ \frac{1}{1-\varepsilon^2} - \frac{1}{\varepsilon} \ln \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon} - 4\bar{a} \left( \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} + \frac{2}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon^2} \ln \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon} \right) \right] \quad (12.18)$$

$P_n$  và  $P_t$  là hình chiếu của lực hướng kính và tiếp tuyến lên đường tâm.

Góc  $\theta^*$  giữa phương áp lực tương đương và đường nối 2 tâm cho bởi công thức:

$$\tan \theta^* = \frac{P_n}{P_t} = \frac{C_n}{C_t} \quad (12.19)$$

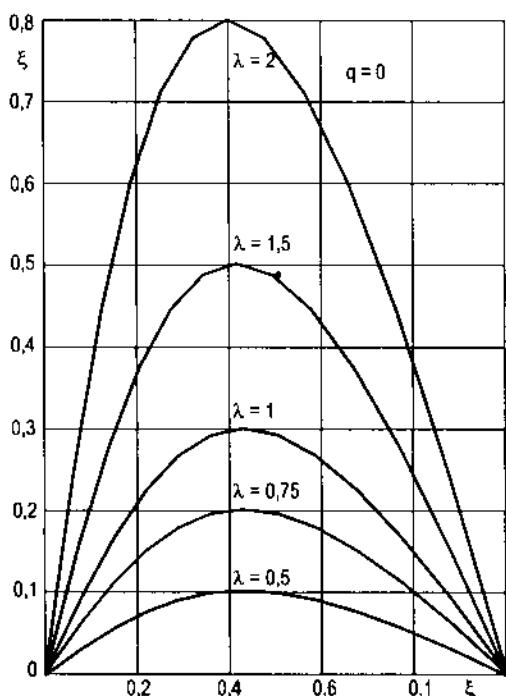
$$P_n = P \sin \theta^*$$

$$P_t = P \cos \theta^* \quad (12.20)$$

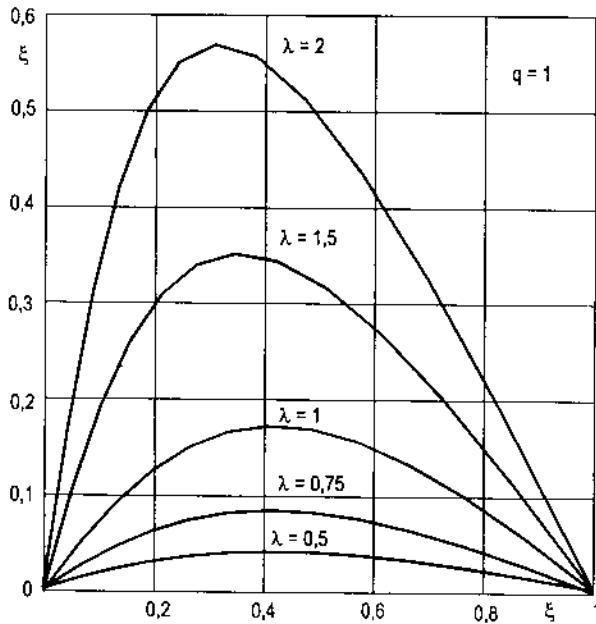
Hệ số  $\xi$  xác định theo khe hẹp tương đối  $\psi$  còn có thể nhận được bằng hệ số  $\bar{\xi}$ , trong công thức đó đưa ra chiều dày nhỏ nhất  $h_2$  của lớp dầu bôi trơn (nhiều khi ấn định cho thiết kế).

$$\bar{\xi} = \frac{P \cdot h_2^2}{4\mu_1 \omega_1 b^4} = \lambda (1-\varepsilon)^2 \xi \quad (12.21a)$$

Sự thay đổi hệ số này phụ thuộc vào  $\varepsilon$  và 1 số giá trị  $\lambda$ , khi  $q = 0$  và  $q = 1$  được đưa ra ở đồ thị hình 12.2 và hình 12.3.



Hình 12.2



**Hình 12.3**

#### 12.4. MÔ MEN MA SÁT

Kí hiệu  $M_1$  và  $M_2$  là mô men ma sát của trục và bạc. Chọn phương quay của trục làm chiều dương cho mô men.

Xác định mô men bằng các hệ số không thử nghiệm:

$$C_{m1,2} = \frac{M_{1,2}\psi}{\pi\mu\omega r_1^2 b} \quad (12.21b)$$

Tính được nhờ công thức:

$$C_{m1,2} = \frac{-1}{(1-\varepsilon)^q} \left\{ \pm \left\{ 2 - \varepsilon + \sum_{n=1}^{\infty} [q-1+(1-\varepsilon)(q-1-2n)] \cdot \frac{(q-2)-(q-3)\dots(q-2n)}{2n!} \left( \frac{2n}{n} \right) \left( \frac{\varepsilon}{2} \right)^{2n} \right\} + \frac{3\varepsilon}{\pi} C_n \right\} \quad (12.22)$$

Dấu "+" lấy cho trục, dấu "-" lấy cho bạc, ta giả thiết cấp dầu không dưới áp lực, do vậy ở vùng không tải của ổ chỉ lấp đầy một phần bằng dầu.

Ở đoạn cách nhau của lớp dầu bôi trơn chiều rộng tác dụng của màng chất lỏng sẽ là:

$$b_0 = \frac{h_2}{h} b$$

Vậy ta có:

$$C_{m1,2} = \frac{-1}{1+\varepsilon} \left[ \pm \left( 1 + \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon}} \right) + \frac{3\varepsilon}{\pi} C_n \right]; q=1 \quad (12.23)$$

$$C_{m1,2} = \pm \frac{2+\varepsilon}{(1+\varepsilon)\sqrt{1-\varepsilon^2}} - \frac{3\varepsilon}{\pi} C_n; q=0 \quad (12.24)$$

Khi giá trị  $q$  bất kỳ,  $C_{m1,2}$  có thể tìm được bằng cách nội suy:

$$(C_{m1,2})_q = (C_{m1,2})_{q=0} + [(C_{m1,2})_{q=1} - (C_{m1,2})_{q=0}]q \quad (12.25)$$

Thay cho hệ số mô men, trong tính toán đôi khi đưa ra hệ số:

$$K_{m1,2} = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{M_{1,2}}{P \cdot h_2^2} = \frac{3C_{m1,2}}{(1-\varepsilon)\xi} \quad (12.26)$$

## 12.5. LUỢNG TIÊU HAO DẦU BÔI TRƠN

Số lượng dầu đi qua tiết diện  $\theta = \pi$  (lượng tiêu hao ở cửa ra từ vùng làm việc của lớp dầu) được tính nhờ hệ số không thứ nguyên.

$$C_{qe} = \frac{Qe}{V_{cb}} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \varepsilon + \frac{a_1 \cdot C^2 (1+\varepsilon)^q (1-\varepsilon)^{1-q}}{6\mu_1 \omega r_l^2} \cdot \left( 1 - \frac{th\lambda \sqrt{\beta_{1q}}}{\lambda \sqrt{\beta_{1q}}} \right) \cdot (1 - 2\bar{a}) \right] \quad (12.27)$$

Lượng dầu chảy qua mặt đầu của ổ được tính bằng công thức:

$$\begin{aligned} C_{qs} &= \frac{Q_s}{V_{cb}} = \frac{2 \cdot K_b \cdot C^2 (1+\varepsilon)^q (1-\varepsilon)^{1-q}}{6\mu_1 \omega r_l^2} \left\{ a_1 \sqrt{\beta_{1q}} th\lambda \sqrt{\beta_{1q}} \right. \\ &\cdot \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varepsilon^{2n-1}}{2n+1} \cdot \frac{(1-q)(-q)...(-q-2n+3)}{(2n-1)} \right. \\ &\cdot \left. \left( \frac{-q-2n+2}{2n} \varepsilon + 2\bar{a} \right) \right] + \frac{P_i}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[ \left( \frac{2n}{n} \right) \left( \frac{1}{2} \right)^{2n} \cdot \varepsilon^{2n} \left( \frac{3-q}{2n} \right) + 1 \right] (2\pi - 0i) - \right. \\ &\left. \left. - \frac{1}{n} \sin n\theta i \cdot \sum_{K=0}^{\infty} \left[ \left( \frac{n+2K}{K} \right) \left( \frac{1}{2} \right)^{n+2K} \left( \frac{3-q}{n+2k} \right) \right] \right\} \right\} \end{aligned} \quad (13.28)$$

Trong đó:

$$a_1 = \frac{6\mu_1 \omega r_l^2 \varepsilon}{C^2 (1+\varepsilon)^q (1-\varepsilon^2)^{1-q}} \cdot \frac{1 - \frac{\varepsilon}{2} (1-q)(2-\frac{q}{2})}{1 + \frac{\varepsilon^2}{2} (1-q)(1-\frac{q}{2})} \quad (12.29)$$

Nếu  $q = 0$  và  $q = 1$ , biểu thức (12.28) có dạng đơn giản hơn.

$$C_{qso} = \frac{2K_b C^2}{3\mu_1 \omega r_l b} \left\{ \frac{6(1 + \frac{2\epsilon \bar{a}}{3})\mu_1 \omega r_l^2 \epsilon}{C^2(1 + \frac{\epsilon^2}{2})} \sqrt{\beta_{10}} \cdot \operatorname{th} \lambda \sqrt{\beta_{10}} + \frac{P_i}{\lambda} \left[ \left( 1 - \frac{3\epsilon^2}{2} \right) (2\pi - \theta_i) - \epsilon \left( 1 + \frac{\epsilon^2}{4} \right) \sin \theta_i - \frac{3}{4} \sin 2\theta_i - \frac{\epsilon^3}{12} \sin 3\theta_i \right] \right\} \quad (12.30)$$

$$C_{qso} = \frac{2K_b C^2}{3\mu_1 \omega r_l b} \left\{ \frac{6(1 + \frac{2\epsilon \bar{a}}{3})\mu_1 \omega r_l^2 \epsilon}{C^2(1 + \frac{\epsilon^2}{2})} \sqrt{\beta_{10}} \cdot \operatorname{th} \lambda \sqrt{\beta_{10}} + \frac{P_i}{\lambda} \left[ \left( 1 + \frac{3\epsilon^2}{2} \right) (2\pi - \theta_i) - 2\epsilon \sin \theta_i - \frac{1}{4} \epsilon^2 \sin 2\theta_i \right] \right\} \quad (12.31)$$

Khi  $q$  bất kì, nội suy có:

$$C_{qs} = C_{qco} + (C_{qss1} - C_{qso}) q \quad (12.32)$$

## 12.6. CHẾ ĐỘ NHIỆT

Nhiệt tỏa ra do ma sát bên trong chất lỏng của lớp bôi trơn theo một đơn vị thời gian khi trực quay còn bậc cố định bằng:

$$H = \frac{1}{J} M_1 \Omega_1 = \frac{1}{J} \Omega_1 \frac{\pi \mu_1 \omega r_l^2 b}{\psi} C_{m1} \quad (12.33)$$

Nếu bậc cũng quay thì:

$$H = (M_1 \Omega_1 + M_2 \Omega_2) = \frac{\pi \mu_1 \omega r_l^2 b}{\psi} \cdot (\Omega_1 C_{m1} + \Omega_2 C_{m2}) \quad (12.34)$$

Lượng nhiệt này đưa ra bằng cách đối lưu và bức xạ vào môi trường xung quanh. Dẫn nhiệt là do sự liên kết các chi tiết kim loại nhất là nhờ dầu bôi trơn mà chảy qua mặt dầu của ổ và rửa được sạch bề mặt trực và bậc.

Nhiệt truyền bằng đối lưu và bức xạ có thể viết dưới dạng:

$$H_1 = A \cdot a (t_m - t^*) \quad (12.35)$$

Trong đó:  $A$  - bề mặt tiếp xúc với môi trường xung quanh;

$a$  - là hệ số truyền nhiệt.

$$a = \frac{1,8}{J} \left[ 1 + \frac{2K_1 r_l}{B} \left( \frac{r_l}{0,0135} \right)^2 + K_2 \sqrt{\omega} \right] K_3 + 24,1 \cdot 10^{-6} K_3^4 (t_m - t^*) \left( \frac{Kcal}{m^2 \cdot s \cdot {}^\circ C} \right) \quad (12.36)$$

$t_m$  - nhiệt độ trung bình của bề mặt cứng nằm ở chỗ tiếp xúc với màng dầu;

$t^*$  - nhiệt độ môi trường xung quanh;

$B$  - chiều của trục mà nằm ở trong vỏ ổ;

$\omega$  - vận tốc dòng chảy;

$K_1, K_2, K_3$  - các hệ số phụ thuộc vào kết cấu.

+ Đối với ổ kín  $K_1 = \frac{1}{2}$

+ Ổ không kín  $K_1 = 1$

+ Ổ thông gió 1 phía  $K_2 = \frac{1}{2}$

+ Ổ thông gió 2 phía  $K_2 = 1$

+ Ổ có kết cấu lớn  $K_3 = 1$

Ổ có dầu bôi trơn tuần hoàn  $K_3 = 0,9$ .

Ổ tựa vào bề mặt  $K_3 = 0,8 \div 0,85$ .

Gần đúng có thể lấy:

$$\frac{A}{2r_1 b} = 20 \div 25 \quad (12.37)$$

(Giá trị  $\frac{A}{2r_1 b}$  có thể đạt tới giá trị 10 hoặc 60 tùy thuộc vào loại ổ và chế độ làm việc).

Nếu chỉ chú ý đến sự làm lạnh qua vỏ ổ, coi nhẹ sự làm lạnh của trục thì có:

$$a = (0,7 + 1,2\sqrt{\omega}) \frac{1}{J} \left( \frac{Kcal}{m^2 \cdot s \cdot {}^\circ C} \right) \quad (12.38)$$

Nhiệt dẫn ra bởi dầu sẽ là:

$$H_2 = \gamma C_v [Q_e(t_2 - t_1) + Q_s(t_m - t_1)] \quad (12.39)$$

$$\text{Với } t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (12.40)$$

Nếu xem nhẹ nhiệt mà được đưa ra bằng đối lưu và nếu  $\Omega_2 = 0$  ta thu được:

$$-\frac{C_{m1}}{C_{qs}} = \frac{J\gamma C_v \psi^2}{2\pi\mu_1\Omega_1} (t_2 - t_1) \quad (12.41)$$

## 12.7. CÁC ĐIỀU KIỆN TỐI UU

### 12.7.1. Độ tin cậy độ bền của ổ

Những điều kiện này và đặc biệt là khả năng bền tối đa của trục (độ mòn nhỏ nhất) được đặt ra chủ yếu cho các máy có tính chất khởi động và dừng ít. Ở những máy này làm việc ở chế độ thủy động lực học.

Trong trường hợp này chiều dày tối thiểu  $h_2$  của lớp dầu cần phải tăng lên.

Tâm sai tối ưu nhận được theo công thức:

$$\varepsilon = 0,45 - 0,15q \quad (12.42)$$

### 12.7.2. Hiệu ứng xuất hiện áp suất nguy hiểm

Nguy hiểm nhỏ nhất của sự tiếp xúc trên sườn ống với mục đích bảo trước hiệu ứng biến dạng nhỏ nhất và đặc biệt là độ cong của ống. Nếu kích thước của ống đã cho ( $b, r_1$ ) thì chỉ còn phải chọn khe hở để cho  $h_2$  được lớn nhất. Kết quả cần chọn lấy giống phần a.

Nếu chọn chiều rộng của  $l$  một cách tùy ý thì cần phải đặt ra một điều kiện để cho mối quan hệ  $h_2/b$  là lớn nhất (bởi vì làm xuất hiện áp suất nguy hiểm ở sườn ống lớn lên khi chiều rộng  $b$  lớn).

$$\text{Ta có: } \left( \frac{h_2}{b} \right)^2 = \frac{\mu_1 \omega r_1^2}{P} (1 - \varepsilon)^2 \frac{\xi}{\lambda} \quad (12.43)$$

### 12.7.3. Ma sát nhỏ nhất và công suất tiêu hao do ma sát nhỏ nhất

Ma sát sẽ nhỏ nhất khi:

$$\left( \frac{r_1^3 \lambda C_{m1}}{\psi} \right)_{\min} \quad (12.44)$$

Trong trường hợp lắp không dây vùng hở giữa ngõng trực và bạc, tâm sai tương đối mà tương ứng với hệ số  $C_{m1}$  nhỏ nhất.

Khi  $q = 0$  và  $q = 1$ :

$$\begin{cases} \varepsilon_0 = 0,3 \\ \varepsilon_1 = 0,92 - 0,11 \end{cases} \quad (12.45)$$

Khi  $q$  bất kỳ:

$$\varepsilon = 0,3 + (0,62 \div 0,11\lambda)q \quad (12.46)$$

### 12.7.4. Ma sát nhỏ nhất trong điều kiện tin cậy nhất trong vận hành

Trong trường hợp này, thông số  $K_m$  cần phải có giá trị nhỏ nhất. Lúc ấy nhận được:

Khi  $q = 0$

$$K_{m1\min} = 65 + 143\varepsilon$$

$$\lambda_0 = 0,861 - 0,732\varepsilon + \frac{0,0387}{\varepsilon - 0,482} \quad (12.47)$$

$$K_{m2\min} = 289\varepsilon - 44\varepsilon$$

$$\lambda_0 = 2,026 - 2,14\varepsilon + \frac{0,156}{\varepsilon - 0,684} \quad (12.48)$$

Khi  $q = 1$

$$K_{m1\min} = 176 - 44\varepsilon$$

$$\lambda_1 = 1,139 - 0,915\varepsilon + \frac{0,091}{\varepsilon - 0,5} \quad (12.49)$$

$K_{m2}$  không có cực tiểu nếu  $q = 1$  và không phụ thuộc vào điều kiện đâu.

$\varepsilon$  phụ thuộc vào  $\lambda$  với  $K_{m1\min}$  nhận được vào khoảng:

$$\varepsilon = 0,82 - 0,21\lambda + (0,26 - 0,11\lambda)q \quad (12.50)$$

### 12.7.5. Sự tăng nhiệt nhỏ nhất

Sự tăng nhiệt của ống phụ thuộc vào số lượng nhiệt thành phần (mômen ma sát) và đồng thời phụ thuộc vào lưu lượng dầu bôi trơn. Điều kiện này chính là phù hợp với  $\frac{C_{ml}}{C_{qs}}$  nhỏ nhất;

$$\begin{aligned}\varepsilon_0 &= 0,67 \\ \varepsilon_1 &= 0,87 \\ \varepsilon &= 0,67 + 0,2q\end{aligned}\tag{12.51}$$

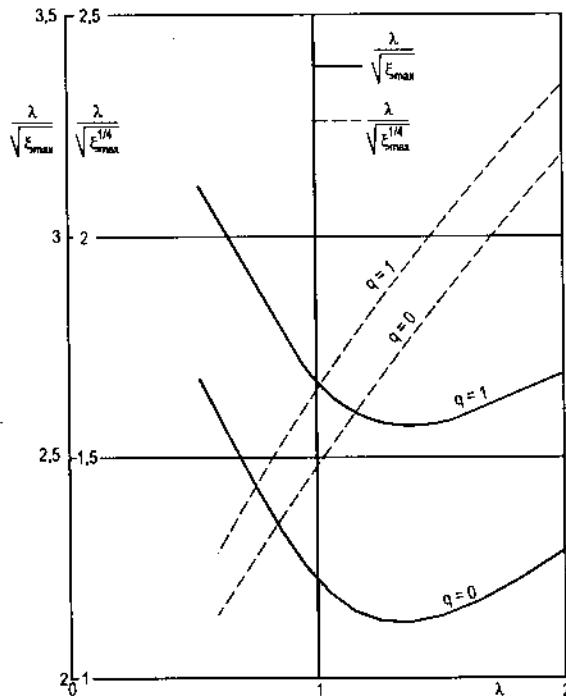
### 12.7.6. Nhỏ gọn nhất

Bề mặt thiết kế ở trực bằng (12.21):

$$br_l = h_l \sqrt{\frac{P}{\mu_l \omega} \cdot \frac{\lambda}{\xi^2}}\tag{12.52}$$

Cùng với độ dày  $h_2$  tối thiểu đó, nhận được ống có tính nhỏ gọn nhất sẽ là ống có  $\frac{\lambda}{\sqrt{\xi}}$  nhỏ hơn.

Như vậy  $\bar{\xi}$  cần phải có giá trị cực đại,  $\varepsilon$  sẽ được tính theo (12.42), còn  $\lambda$  theo hình (12.4).



Hình 12.4

(Sự thay đổi hệ số  $\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\xi_{max}}}}$ ;  $\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\xi_{max}}}}$  phụ thuộc vào  $\lambda$  khi  $q = 0$  và  $q = 1$ )

$\lambda = 1,35$  khi  $q = 0$ ;  $\lambda = 1,55$  khi  $q = 1$ .

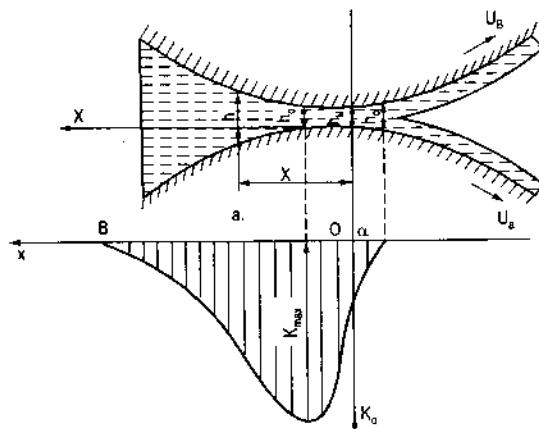
## Chương 13

# BÔI TRƠN THỦY ĐỘNG TIẾP XÚC

### 13.1. KHÁI NIỆM CHUNG

Khi làm việc, giữa bề mặt tiếp xúc của ngõng trục và ổ được ngăn cách bởi một lớp dầu, bao phủ hoàn toàn hoặc một phần (ví dụ ở bộ truyền bánh răng). Lớp dầu giữa khe hở sẽ có chiều dày thay đổi.

**Hình 13.1:** Lớp dầu giữa các bề mặt tiếp xúc



Lớp dầu giữa các bề mặt tiếp xúc dưới tác dụng của lực liên kết giữa hai lớp dầu và kim loại, lực ma sát trong xuất hiện giữa các bề mặt tiếp xúc. Dầu sẽ chuyển động theo phương chuyển động của bề mặt tiếp xúc. Khả năng chịu tải của lớp dầu sẽ cân bằng với lực nén vào bề mặt tiếp xúc. Những ảnh hưởng chủ yếu đến khả năng chịu tải của lớp dầu là:

1. Bán kính cong càng nhỏ thì vùng khe hở tiếp xúc càng nhỏ, áp lực xuất hiện trong lớp dầu càng lớn, áp lực theo đường cong này giảm đi càng lớn khi chiều cao h tăng lên. Kết quả là khả năng chịu tải giảm.
2. Độ nhớt của dầu càng cao, nội lực lớn, khả năng chịu tải lớn. Độ nhớt trong vùng tiếp xúc thay đổi rất lớn, sẽ ảnh hưởng rất lớn đến khả năng tải của màng dầu tại vùng tiếp xúc.
3. Vận tốc bề mặt tiếp xúc  $\sum V = V_1 + V_2$  càng lớn thì động năng của dầu càng lớn.
4. Giá trị khe hở  $h_{min}$  càng nhỏ, lượng thu hẹp khe hở càng lớn (khi dùng đường cong bề mặt) như vậy áp lực dư càng lớn, nhưng  $h_{min}$  không được giảm xuống quá giá trị cho phép. Khi đó khả năng chống mòn kém.

Phân tích kĩ quá trình chảy của dầu giữa các bề mặt tiếp xúc và độ nhớt thay đổi là bài toán phức tạp, cần phải giải quyết đồng thời các phương trình thủy động, lí thuyết đàn hồi và năng lượng.

### 13.2. GIẢI BÀI TOÁN BÔI TRƠN THỦY ĐỘNG CỦA LỚP DẦU CÓ ĐỘ NHỚT KHÔNG ĐỔI GIỮA CÁC BỀ MẶT KHÔNG BIẾN DẠNG

Để làm quen với bài toán bôi trơn thủy động của lớp dầu giữa các bề mặt tiếp xúc ta xét dòng chảy của chất lỏng có độ nhớt không đổi giữa các bề mặt trụ cứng (không biến dạng) và bỏ qua biến dạng của bề mặt tiếp xúc cũng như thay đổi của độ nhớt. Kết quả nhận được gần sát thực tế, cho phép ta đưa ra được nhận xét cơ bản.

Bài toán cần xét gần đúng với bài toán thủy động của ống trượt. Điều khác nhau là: hai trụ tiếp xúc ngoài, hay tiếp xúc trong. Do đó phải chấp nhận các giả thiết của Râynol là:

1. Lực quán tính và thể tích những lực xuất hiện dưới tác dụng của các trường khác (ví dụ trọng lực) tác dụng vào phân tử dầu là rất nhỏ.

2. Chiều dày lớp dầu rất nhỏ so với bán kính của bề mặt cong. Vì vậy sẽ không tính ảnh hưởng của biến dạng mặt trụ tới dòng bôi trơn.

3. Vận tốc dòng phân tử dầu  $V$  và  $W$  (theo trục  $Y$  và  $Z$ ) bằng nhau.

4. Chiều dày lớp dầu theo trục  $X$  thay đổi đều và chậm, nên chỉ phụ thuộc vào vận tốc và toạ độ  $y$  (chiều dày lớp dầu).

5. Giá trị áp suất  $p$  trên toàn bộ chiều dày đều giống nhau, nên không phụ thuộc vào  $y$  và chỉ là hàm số của  $x$ .

6. Không có sự trượt của dầu theo khe hở. Từ các giả thiết trên, ta có thể sử dụng phương trình Râynol cho bài toán phẳng có:

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (13.1)$$

Xét trường hợp đơn giản nhất, khi vận tốc của hai bề mặt ma sát đều giống nhau, có nghĩa là:  $V_1 = V_2 = V_o$ , tích phân (13.1) có thể viết dưới dạng:

$$V = \frac{1}{2\mu} (y^2 - h \cdot y) \frac{dp}{dx} + V_o \quad (13.2)$$

điều kiện  $V = V_o$  khi  $y = 0$  và  $y = h$  ( $h$  là chiều dày của lớp dầu bôi trơn) và theo điều kiện không gián đoạn (dòng chảy đồng nhất) ta có:

$$\int_0^h V dy = C = -\frac{1}{12\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot h^3 + V_o h \quad (13.3)$$

hay

$$\frac{1}{12\mu} \frac{dp}{dx} = \frac{V_o}{h^2} - \frac{C}{h^3} \quad (13.4)$$

$C = V_o h_o$  và  $h_o$  là chiều dày lớp dầu ở vị trí  $\frac{dp}{dx} = 0$ , chiều dày lớp dầu  $h$  ở gần  $h_{min}$  có thể viết:

$$h = h_{min} \left( 1 + \frac{X^2}{2Rh_{min}} \right) \quad (13.5)$$

Trong đó:  $h_{min}$  là khoảng cách giữa các bề mặt ma sát, tại vị trí gần nhất.

Gọi

$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$  là bán kính cong tương đương của các mặt trụ, để tính tích phân (13.4)

ta sử dụng biểu thức sau:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{X}{\sqrt{2Rh_{min}}} \quad (13.6)$$

$$\text{Ta có: } h = h_{min} (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma) = \frac{h_{min}}{\cos^2 \gamma} \quad (13.7)$$

$$\text{Và: } dx = \frac{\sqrt{2Rh_{min}}}{\cos^2 \gamma} \cdot dy \quad (13.8)$$

thay các công thức trên vào (13.4) ta có:

$$\frac{\cos^2 \gamma}{\sqrt{2Rh_{min}}} \cdot \frac{dp}{dy} = 12\mu \left( \frac{V_o}{h_{min}^2} \cos^4 \gamma - \frac{V_o h_o}{h_{min}^3} \cos^6 \gamma \right) = 12\mu \frac{V_o}{h_{min}^2} \left( \cos^2 \gamma - \frac{h_o}{h_{min}} \cos^4 \gamma \right) \quad (13.9)$$

Trong (13.7) thay giá trị  $\frac{h_o}{h_{min}}$  theo  $\frac{1}{\cos^2 \gamma_o}$

Ở đây  $\gamma_o$  là giá trị của  $\gamma$  khi  $\frac{dp}{dx} = 0$

Ta có:

$$\frac{h_{min}^2}{12\mu V_o \sqrt{2Rh_{min}}} dp = \left( \cos^2 \gamma - \frac{1}{\cos^2 \gamma_o} \cos^4 \gamma \right) dy \quad (13.10)$$

Tích phân ta được:

$$\frac{h_{min}^2}{12\mu V_o \sqrt{2Rh_{min}}} p = \frac{\gamma}{2} + \frac{\sin 2\gamma}{4} + C_1 - \frac{1}{\cos^2 \gamma_o} \cdot \left( \frac{3\gamma}{8} + \frac{\sin 2\gamma}{4} + \frac{\sin 4\gamma}{32} \right) \quad (13.11)$$

Trong đó (13.11) có hai hằng số tích phân. Điều kiện  $p = 0$  khi  $X = -\infty$  ( $\gamma = \frac{\pi}{2}$ ) cho ta:

$$C_1 = \frac{\pi}{4} + \frac{3\pi}{16 \cos^2 \gamma_0} \quad (13.12)$$

Cũng như tính toán ở trượt, khi xác định hằng số thứ hai  $\gamma_0$ , có thể dựa vào các điều kiện khác.

- Điều kiện Sommerfeld:  $p = 0$  khi  $x = \infty$  ( $\gamma = \pm \frac{\pi}{2}$ )
- Điều kiện Grembel và Yanopki thì:  $p = 0$  tại  $X = 0$  ( $\gamma = 0$ ).
- Điều kiện Räynol P = 0 tại  $\frac{dp}{dx} = 0$  ngay sau vị trí khe hở nhỏ nhất tại  $X = X_0$ .
- Khi  $\gamma = \gamma_0$ , sử dụng điều kiện thứ 3 để xác định  $\gamma_0$  không mâu thuẫn với ý nghĩa vật lí và thực nghiệm. Thay (13.12) vào (13.11) khi  $p = 0$  ta nhận được:

$$\frac{h_{min}^2}{12\mu V_0 \sqrt{2Rh_{min}}} = \frac{\gamma_0}{2} + \frac{\pi}{4} + \frac{\sin 2\gamma_0}{4} - \frac{1}{\cos^2 \gamma_0} \left[ \frac{3}{8} \left( \gamma_0 + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{\sin 2\gamma_0}{2} + \frac{\sin 4\gamma_0}{32} \right] \quad (13.13)$$

Giải phương trình trên ta xác định được:

$$\gamma_0 = 0,44352 \text{ và } \frac{1}{\cos^2 \gamma_0} = 1,2258$$

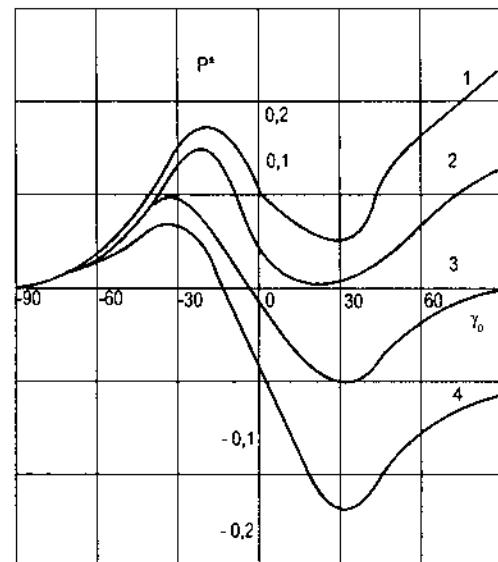
Kết quả cuối cùng là:

$$\frac{h_{min}^2}{12\mu V_0 \sqrt{2Rh_{min}}} \cdot p = \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2} + \frac{\sin 2\gamma}{4} - 1,2258 \times \left[ \frac{3}{8} \left( \gamma + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{\sin 2\gamma}{4} + \frac{\sin 4\gamma}{32} \right] \quad (13.14)$$

Biết hàm số của khe hở và  $\gamma_0$ , xác định  $h_0 = 1,2258h_{min}$ , từ (13.6) ta có:

$$X_0 = \sqrt{2Rh_{min} \operatorname{tg} \gamma_0} = 0,4717 \sqrt{2Rh_{min}}$$

Đồ thị quan hệ áp suất theo  $\gamma$  từ (13.11) được biểu thị trên hình (13.2)



Hình 13.2: Đường cong biểu diễn áp suất không thứ nguyên  $P^*$  theo  $\gamma_0$

Khi  $\frac{1}{\cos^2 \gamma_o}$  nhận giá trị (1,5); (1,226) theo điều kiện Raynol, và bảng (13.3) theo điều kiện Sommerfel.

Ở đây:

$$P^* = \frac{h_{min}^2}{12\mu V_o \sqrt{2Rh_{min}}} p \quad (13.15)$$

được gọi là áp suất không thứ nguyên; theo điều kiện Sommerfel, khả năng chịu tải nhỏ hơn nếu sử dụng điều kiện Raynol.

Hình 13.2 đường số 2. Theo điều kiện thứ hai lớp dầu dứt quãng tại vị trí khe hở nhỏ nhất ( $P = 0$  khi  $X = \gamma = 0$ ), đường cong áp suất giống đường cong Sommerfel nhưng gián đoạn khỏi  $X = 0$ , vùng áp suất âm không xuất hiện. Ứng với các giá trị khác nhau của  $\frac{1}{\cos^2 \gamma}$  ta được một loạt đường phân áp, mà chúng bằng nhau khi  $X = -\infty$  ( $\gamma = -\frac{\pi}{2}$ ).

Khả năng chịu tải của lớp dầu trên đơn vị chiều dài mặt trục là:

$$P = \int_{-\infty}^{\gamma_o} P dx \quad (13.16)$$

Thay  $P$  qua  $P^*$  và sử dụng  $dx = \frac{\sqrt{2Rh_{min}}}{\cos^2 \gamma}$  ta nhận được:

$$P = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\gamma_o} \frac{2.12V_o\mu R}{h_{min} \cos^2 \gamma} \cdot P^* dy \quad (13.17)$$

Sau khi biến đổi và rút gọn ta được:

$$P^* = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{tg} \gamma \left( \gamma + \frac{\pi}{2} \right) \left( 1 - \frac{3}{4 \cos^2 \gamma_o} \right) + \frac{\cos^2 \gamma}{8 \cos^2 \gamma_o} \right]_{-\frac{\pi}{2}}^{\gamma_o} \quad (13.18)$$

Cuối cùng ta có:

$$P^* = \frac{1}{2} \left\{ \left[ 1 + \operatorname{tg} \gamma \left( \gamma_o + \frac{\pi}{2} \right) \right] \left( 1 - \frac{3}{4 \cos^2 \gamma_o} \right) + \frac{1}{4} \right\} \quad (13.19)$$

Khi  $\gamma_o = 0,47517$  theo điều kiện Raynol ta nhận được  $P^* = 0,20392$

Khả năng tải trên đơn vị chiều dài là:

$$P = 2 \frac{12\mu V_o R}{h_{min}} P^* = 4,896 \frac{\mu V_o R}{h_{min}} \quad (13.20)$$

Khi vận tốc các mặt trụ không bằng nhau ta có:

$$V_o = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (13.21)$$

Áp suất lớn nhất sẽ ở điểm có toạ độ:

$$X = 0,475 \sqrt{2Rh_{\min}} \quad (13.22)$$

và nhận giá trị:

$$P_{\max} = 1,521 \frac{\mu V_o}{h_{\min}^2} \sqrt{2Rh_{\min}} \quad (13.23)$$

### 13.3. GIẢI BÀI TOÁN BÔI TRỌN THỦY ĐỘNG TIẾP XÚC ĐỐI VỚI CHẤT LỎNG NIUTON

Giải bài toán bôi trơn thủy động tiếp xúc là đồng thời giải hai bài toán:

1. Dòng chảy của lớp chất lỏng nhớt dẫn nhiệt giữa hai bề mặt biến dạng đàn hồi.
2. Biến dạng của hai bề mặt đàn hồi dưới tác dụng của lực thủy động.

Phương trình cơ bản gồm 11 phương trình với 11 ẩn số: ( $k_o$ ,  $h$ ,  $\mu$ ,  $T$ ,  $v_1$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $\omega$ ,  $\zeta$ ,  $c_v$ ,  $\lambda$ ) với 4 đối số ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $t$ ). Xuất phát từ lí thuyết thuỷ động ta có phương trình sau:

1.  $\frac{\partial k_o}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (13.24)$
2.  $\frac{\partial k_o}{\partial y} = 0$
3.  $\frac{\partial k_o}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right)$
4.  $\frac{\zeta}{A_1} \left[ \frac{\partial (C_v T)}{\partial t} + u \frac{\partial (C_v T)}{\partial x} + w \frac{\partial (C_v T)}{\partial z} \right] = \frac{1}{A_1} \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]$
5.  $v_1(x, z) = -2 \frac{(1-\mu^2)}{\pi E} \iint_{\Omega} \frac{k_o(\epsilon, \eta) d\epsilon d\eta}{\sqrt{(x-\epsilon)^2 + (z-\eta)^2}}$
6.  $v_1(x) = -4 \frac{(1-\mu^2)^\beta}{\pi E} \int_{\alpha} k_o(\epsilon) \ln |\epsilon - x| d\epsilon$
7.  $h(x, z) = h_1(x, z) + v_1(x, z) - \Delta$
8.  $\mu = \mu(k_o, T)$
9.  $\zeta = \zeta(k_o, T)$

$$10. C_v = C_v(k_o, T)$$

$$11. \lambda = \lambda(k_o, T)$$

Trong đó:  $t$  - thời gian;  $h$  - chiều dày lớp dầu ở điểm đã chọn trước biến dạng;  $h_1$  - chiều dày lớp dầu ở điểm đã chọn khi biến dạng;  $T$  - nhiệt độ ở điểm đã chọn;  $v_1$  - biến dạng tổng của hai bề mặt ở điểm đã chọn;  $u, v, w$  - vận tốc chuyển động của phân tử chất lỏng theo phương  $x, y, z$ ;  $\zeta$  - mật độ dầu ở điểm đã chọn;  $C_v$  - nhiệt dung ở điểm đã chọn, khi thể tích không đổi.

$\lambda$  - hệ số truyền nhiệt ở điểm đã chọn;  $A_1$  - chế độ làm việc;  $\Delta$  - sự dịch chuyển của bề mặt làm việc, khi tương đương từ bề mặt cứng tuyệt đối biến dạng đàn hồi.

$\Omega$  - vùng áp lực (vùng ma sát);

$E$  - môđun đàn hồi;

$\mu$  - hệ số Poission;

$\alpha, \beta$  - toạ độ điểm cuối và điểm đầu của vùng ma sát.

$\varepsilon, \eta$  - toạ độ điểm đặt tải trọng.

Giải 11 phương trình trên rất khó khăn. Sau đây ta khảo sát bài toán đẳng nhiệt dùng. Có nghĩa là không phụ thuộc vào nhiệt độ và thời gian, độ nhót của dầu tuân theo định luật của Basúc:

$$\mu = \mu_o e^{n.k_o} \quad (13.25)$$

Trong đó:  $\mu_o$  - độ nhót ở áp suất khí quyển;

$n$  - hệ số phụ thuộc áp suất của độ nhót.

### 13.4. GIẢI BÀI TOÁN ĐẲNG NHIỆT DÙNG ĐỐI VỚI CHẤT LỎNG NIUTON MỘT CÁCH GẦN ĐÚNG

Với các giả thiết của Raynal, ta có phương trình:

$$\frac{dk_o}{dx} = 6\mu_o(V_a + V_b) e^{n.k_o} \frac{h_o - h}{h^3} \quad (13.26)$$

Còn phương trình thứ hai, được xác định như sau:

Diện tích tiếp xúc nhỏ so với kích thước của bề mặt, vì vậy có thể coi áp lực song song với nhau và vuông góc với trục  $x$ , hình dáng khe hở được mô tả trên hình (13.3). Nếu kể đến biến dạng  $v_1(x)$  ở một điểm nào đó, ta có khe hở trước biến dạng là  $h_1(x)$  như một hình gần đúng parabol.

$$h_1(x) = h_{m1} + \frac{x^2}{2}(\lambda_a \pm \lambda_b) \quad (13.27)$$

Trong đó:  $h_{ml}$  - khe hở nhỏ nhất;  $\lambda_a, \lambda_b$  - độ cong của các bề mặt tiếp xúc, ở hình 13.3 ta có  $h(x) = h_1(x + v_1(x) - \Delta)$ . (13.28)

Theo các giả thiết của Vanelo cho rằng: độ biến dạng của bề mặt, tỉ lệ với áp suất, ta có:

$$v_1(x) = \frac{A'}{E} k_o(x) \quad (13.29)$$

Trong đó:  $E$  - môđun đàn hồi  $\text{kG/cm}^2$ ;

$A'$  - hệ số tỉ lệ.

Thay (13.29); (13.27) vào (13.28) ta được:

$$h = h_{ml} - \Delta + \frac{x^2(\lambda_a \pm \lambda_b)}{2} + \frac{A'k_o}{E} \quad (13.30)$$

Phương trình (13.30) là phương trình thứ hai của bài toán. Như vậy ta phải giải đồng thời (13.26) và (13.30). Ta đưa về dạng không thứ nguyên, thay các đối số bằng các đối số không thứ nguyên tương ứng với:

$x = B_1 z$ ;  $h = h_o H$ ;  $k_o = B_k$ , các tham số  $B_1$  và  $B$  được xác định qua phương trình (13.26) và (13.30) ta nhận được:

$$\frac{dk}{dz} = \frac{6\mu_o(U_a + U_b)B_1}{h_o^2 B} \cdot \frac{1-H}{H^3} e^{B_n k} \quad (13.31)$$

$$H = \frac{h_{ml} - \Delta}{h_o} + \left[ B_1 \sqrt{\lambda_a \pm \lambda_b} \right]^2 Z^2 + \frac{A' B}{E h_o} k \quad (13.32)$$

Trong đó:  $B_1 = \sqrt{\frac{2h_o}{\lambda_a \pm \lambda_b}}$  (13.33)

$$B = \frac{6\mu_o(U_a + U_b)}{h_o^2} \sqrt{\frac{2h_o}{\lambda_a \pm \lambda_b}} \quad (13.34)$$

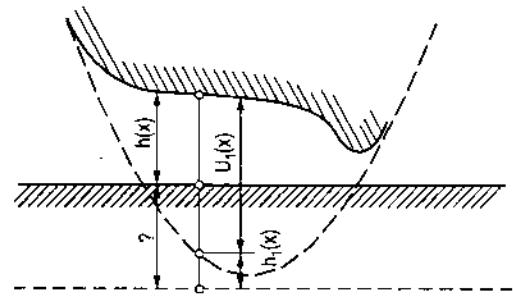
$$B_n = \frac{6\mu_o(U_a + U_b)n}{h_o^2} \sqrt{\frac{2h_o}{\lambda_a \pm \lambda_b}} \quad (13.35)$$

và  $C = \frac{A' B}{E h_o}$  (13.36)

Nếu tính ở vị trí đứt của lớp dầu, hoành độ không thứ nguyên  $z = a$ ,  $h = h_o$  và  $k_o = k = 0$ , thì ở điểm này  $H = 1$ . Từ (13.32) ta có:

$$\frac{h_{ml} - \Delta}{h_o} = 1 - a^2.$$

Từ (13.26) và (13.30) ta nhận được:



Hình 13.3: Hình dáng khe hở trước

$$\frac{dk(z)}{dz} = \frac{1 - H(z)}{H^3(z)} e^{B_n k(z)} \quad (13.37)$$

$$H(z) = 1 - a^2 + z^2 + Ck(z) \quad (13.38)$$

Trong phương trình trên, C thay đổi từ 0,1 đến 40,  $B_n$  từ 0 đến 30. Khi  $B_n = 0$  độ nhớt của dầu không phụ thuộc vào áp suất. Ở đây khí hiệu  $P_o$  - áp suất có thứ nguyên và  $P$  - áp suất không thứ nguyên. Từ (13.37) ta có:

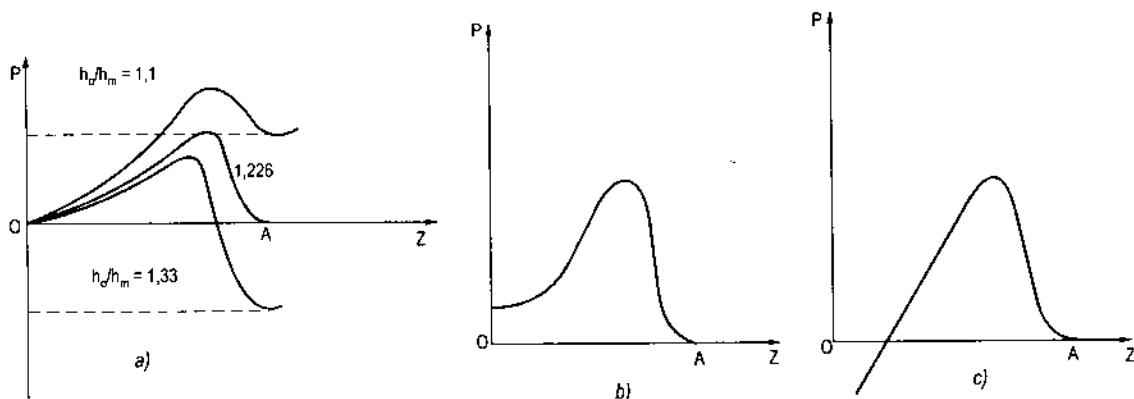
$$\frac{dp(z)}{dz} = \frac{1 - H(z)}{H^3(z)} \quad (13.39)$$

Với điều kiện biên sau:

1. Vùng cuối ma sát là điểm có toạ độ  $z = a$  ( $X = \alpha$ ), ở đó có áp suất và gradien áp suất bằng không ( $k = 0, \frac{dk}{dz} = 0; p = 0, \frac{dp}{dz} = 0$ ).
2. Vùng dầu ma sát là điểm có toạ độ  $z = b$  ( $X = \beta$ ). Ở đây áp suất tiệm cận gần tới 0. Trong thực tế, với độ chính xác nhất định có thể lấy áp suất bằng không, bài toán được giải với độ nhớt không đổi và chỉ còn một tham số là hệ số biến dạng C. Khi độ nhớt thay đổi, thêm hệ số  $B_n$ . Mỗi phương án giải đều là tổ hợp của hai tham số C và  $B_n$  và giá trị toạ độ không thứ nguyên của vùng cuối ma sát ( $z = a$ ).

Áp suất được xác định theo Ole chúng phụ thuộc vào đại lượng  $h_o/h_m$  (hình 13.4a).

Thực tế chỉ tồn tại một biểu đồ áp suất tương ứng với  $h_o/h_m = 1,226$ , còn các biểu đồ áp suất khác không thoả mãn điều kiện biên (lớp dầu bị đứt quãng ở điểm  $k_o = dk_o/dx = 0$ ) bài toán chỉ có một lời giải.



**Hình 13.4: Sự phụ thuộc biểu đồ áp suất vào tỉ số  $h_o/h_m$**

Trong bài toán với bề mặt biến dạng được giải ở vùng cuối ma sát, khi chọn các giá trị  $a$  khác nhau, tức là phân tích sự chọn các giá trị  $h_o/h_m$  khác nhau, áp suất được coi là tiếp tuyến với biểu đồ áp suất ở điểm cuối ma sát (khi  $h_o/h_m = 1,1$  và  $1,33$ ).

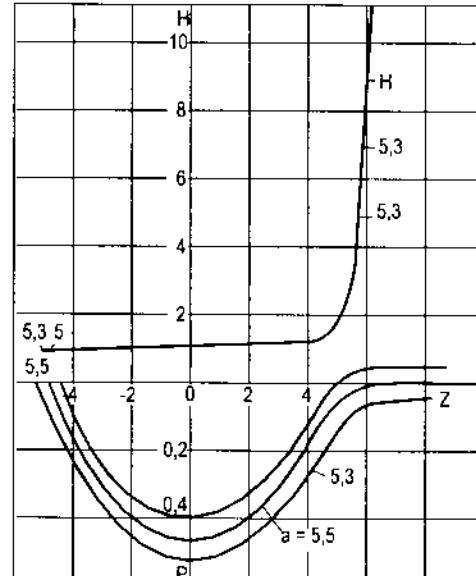
Thực tế ở điểm đầu ma sát, ta nhận được áp suất âm hoặc dương, chứ không bằng không (hình 13.4b và 13.4c), cần phải chọn giá trị  $a$  để ở điểm  $z = b$ , biểu đồ áp suất tiếp xúc với trục  $x$ .

Ta phải tiến hành nhiều lần để tìm giá trị của  $a$  cho đến khi:  $\frac{p(b)}{p_{\max}} \leq 10^{-4}$ .

Một trong những kết quả có thể tính được (hình 13.5) với  $C = 60$ ,  $B_n = 0$ . Bắt đầu chọn  $a = 5$  khi đó  $p(b) < 0$ , để tăng  $p(b)$  cần tăng  $a$  theo giá trị tuyệt đối. Lấy  $a = 5,5$  lúc đó  $p(b) > 0$  để giảm  $p(b)$  cần giảm  $a$ . Lấy  $a = 5,3$  có  $p(b)$  xấp xỉ bằng không. Việc tìm giá trị  $a$  có thể thực hiện bằng máy tính dựa vào một số giá trị cho trước  $C$  khác nhau.

Ta có giá trị  $a$  trong các trường hợp sau:

Nếu chọn  $a_1$  ta có  $p(b) < 0$  thì lấy  $a_2 = 1,5 a_1$  và lúc đó  $p(b) > 0$  thì chọn  $a_3 = \frac{a_1 + a_2}{2}$ , cứ như vậy việc chọn  $a$  cần thiết có thể từ 3 đến 8 lần để có  $a$  thích hợp.



**Hình 13.5:** Đồ thị xác định tọa độ không thứ nguyên biên vùng ma sát

Tải trọng nâng thuỷ lực được xác định như sau:

$$K_o = \int_0^\beta k_o dx ; \quad P_o = \int_\alpha^\beta p_o dx \quad (13.40)$$

chuyển thành tham số không thứ nguyên.

$$K_o = \frac{12\mu_o(U_a + U_b)}{h_o(\lambda_a \pm \lambda_b)} K; \quad P_o = \frac{12\mu_o(U_a + U_b)}{h_o(\lambda_a \pm \lambda_b)} P \quad (13.41)$$

Ở đây:  $K = \int_a^b k dz; \quad P = \int_a^b p dz$  (13.42)

So sánh với tải trọng nâng thuỷ lực của bề mặt trụ cứng tuyệt đối và độ nhót không phụ thuộc vào áp suất (tải trọng nâng, khi khe hở là đường parabol) ta có:

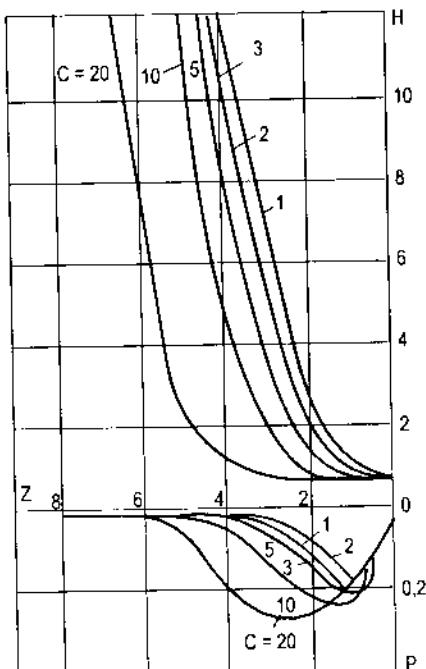
$$P_{0KB} = \frac{2,44\mu_o(U_a + U_b)}{h_m(\lambda_a \pm \lambda_b)} \quad (13.43)$$

Trong đó:  $\frac{k_o}{P_{0KB}} = 4,904 H_m K.$

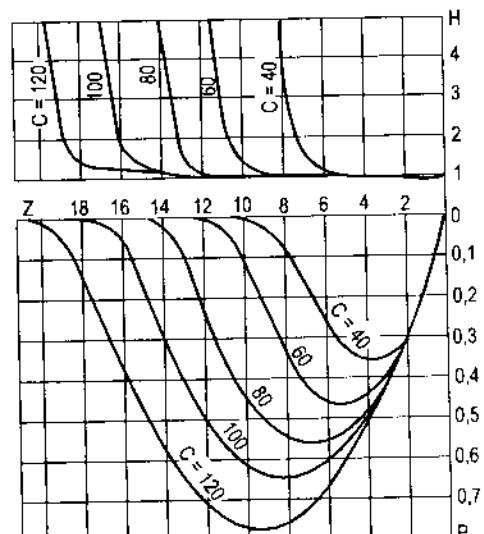
hay  $\frac{P_o}{P_{0KB}} = 4,904 H_m P.$

Trong đó:  $H_m = \frac{h_m}{h_o}$

Kết quả tính với độ nhót không đổi của dầu (trường hợp chỉ có một tham số không thứ nguyên C) được thể hiện ở hình 13.6 và hình 13.7. Khe hở và biểu đồ áp suất ứng với các giá trị của hệ số biến dạng  $C = 1, 2, 3, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100$  và  $120$ . Kết quả tính khi độ nhót không đổi  $B_n = 0$  thể hiện trên bảng 13.1.

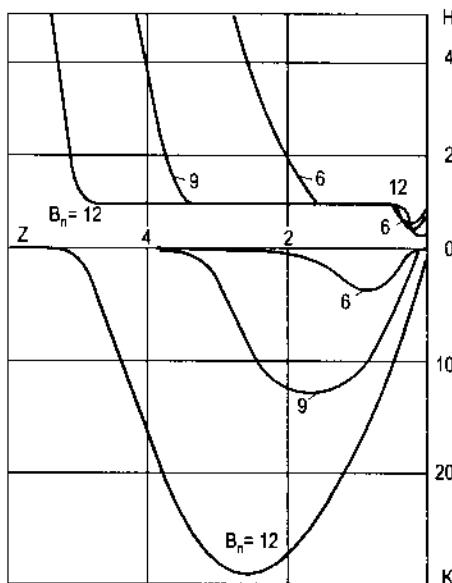


**Hình 13.6:** Hình dạng khe hở và biểu đồ áp suất khi  $B_n = 0, C \leq 20$ .

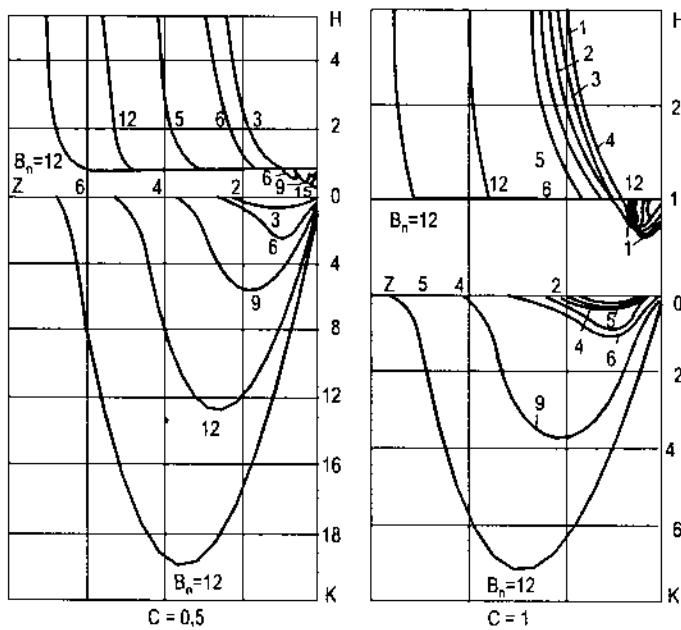


**Hình 13.7:** Hình dạng khe hở và biểu đồ áp suất khi  $B_n = 0, C \geq 40$ .

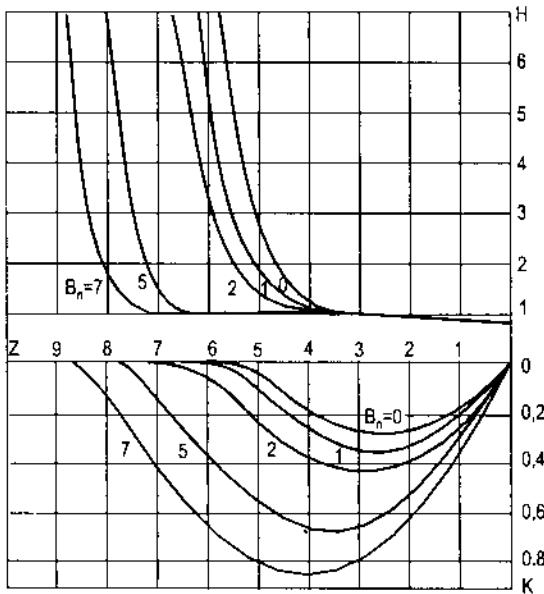
Từ hình (13.6) và (13.7) ta nhận thấy: khi tăng hệ số biến dạng C, vùng ma sát và diện tích của biểu đồ áp suất cũng tăng. Kết quả  $B_n \neq 0$  được trình bày ở bảng (13.2). Và trên (hình 13.8 đến 13.13). Các hình này trình bày hình dáng biều đồ áp suất với các giá trị của  $C = 0,2; 0,5; 1; 3; 5; 10; 20$ , và các giá trị khác của  $B_n$ . Hình này cũng chứng tỏ với C không đổi, tăng  $B_n$ , vùng ma sát cũng tăng. Đặc biệt ma sát cũng như tải trọng nâng thuỷ lực đều tăng mạnh, điều đó được thể hiện rõ trên bảng 13.3.



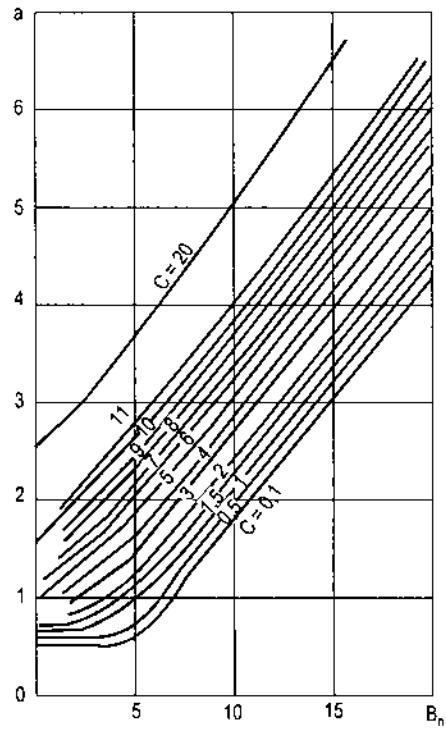
**Hình 13.8:** Hình dáng khe hở và biều đồ áp suất khi  $C = 0,2$



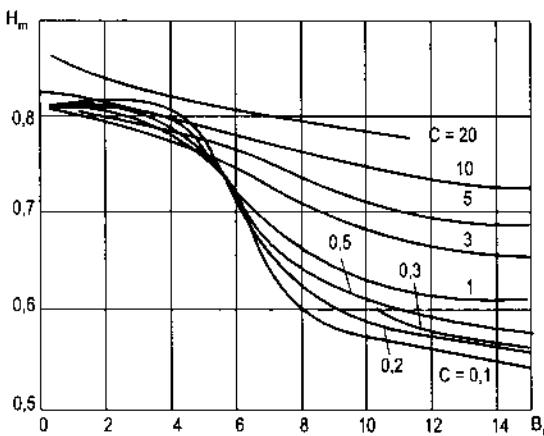
**Hình 13.9:** Hình dáng khe hở và biều đồ áp suất khi  $C = 0,5$  và  $1$



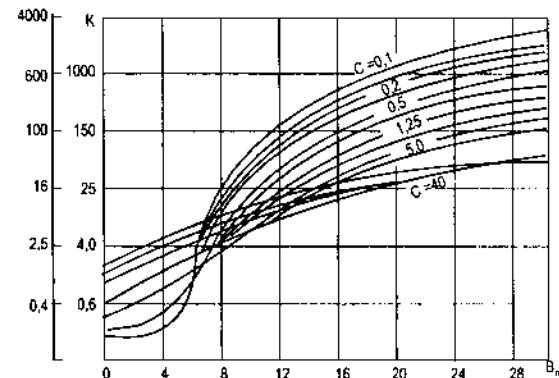
**Hình 13.10:** Hình dáng khe hở và  
biểu đồ áp suất khi  $C = 20$ .



**Hình 13.11:** Sự phụ thuộc vào  $B_n$  và  $C$   
của vùng ma sát cuối.



**Hình 13.12:** Sự phụ thuộc của  
chiều dày nhỏ nhất  $H_m$  vào  $C$  và  $B_n$ .



**Hình 13.13:** Sự phụ thuộc của  
tải trọng  $K$  vào  $B_n$  và  $C$ .

Như vậy khi hệ số biến dạng nhỏ, khả năng tải thuỷ lực sẽ lớn; trên hình 13.11 giá trị của a phụ thuộc vào C và  $B_n$ . Hình 13.12 trình bày sự phụ thuộc của  $H_m$  vào C và  $B_n$ . Hình 13.13 là sự phụ thuộc của tải trọng không trú nguyên vào C và  $B_n$ . Phạm vi thay đổi C = 0,1 ÷ 40 và  $B_n$  = 0 ÷ 30.

**Bảng 13.1. Kết quả tính toán khi độ nhớt không đổi**

C	a	P <sub>max</sub>	P	H <sub>m</sub>	1/H <sub>m</sub>	P <sub>0max</sub> P <sub>OKBmax</sub>	P <sub>o</sub> P <sub>OKB</sub>
0	-0,4295	0,171	0,245	0,81566	1,266	1	1
1	-0,5455	0,18149	0,270123	0,81202	1,2351	1,0523	1,0757
2	-0,6760	0,191464	0,310141	0,81031	1,2341	1,1066	1,2324
3	-0,8087	0,201786	0,367112	0,81027	1,2340	1,1662	1,4587
5	-1,0467	0,214219	0,422390	0,81787	1,2227	1,2555	1,6941
10	-1,5562	0,241147	0,604875	0,83430	1,1986	1,4561	2,4748
20	-2,3926	0,286029	0,983221	0,85695	1,1669	1,7979	4,1320
40	-3,8833	0,376786	2,006867	0,87319	1,1452	2,4360	8,5937
60	-5,3094	0,469777	3,352975	0,88037	1,1359	3,0748	14,4759
80	-6,7401	0,567837	5,181350	0,88371	1,1319	3,7378	22,4545
100	-8,1664	0,666891	7,285385	0,88651	1,1280	4,4107	31,6728
120	-9,6019	0,768308	9,84894	0,88795	1,1262	5,0938	42,8873

**Bảng 13.2**

0,1	1	-0,441	0,815	0,191	1,945	0,259	1,034
	4	-0,446	0,812	0,302	1,989	0,324	1,290
	6	-0,61	0,714	3,721	3,721	3,292	11,53
	7	-0,922	0,640	8,501	8,501	10,67	33,49
	10	-1,8	0,573	32,4	32,4	77,67	218,5
	15	-3,165	0,541	100,172	100,172	422,7	1121,4
0,2	6	-0,681	0,708	2,319	2,319	2,30	7,984
	9	-1,57	0,600	12,30	12,30	25,7	75,62
	12	-2,41	0,568	29,00	29,00	93,2	260,0
	15	-3,2	0,553	51,2	51,2	218,4	593,0
0,3	10	-1,88	0,597	11,8	11,8	29,5	86,5
	12	-2,44	0,578	19,8	19,8	64,6	183
	15	-3,32	0,562	34,8	34,8	150	413
0,5	1	-0,49	0,812	0,197	0,48	0,260	1,035
	3	-0,507	0,806	0,263	0,513	0,339	1,34
	5	-0,6	0,769	0,673	0,720	0,654	2,47
	6	-0,86	0,702	1,44	1,48	1,75	6,02
	9	-1,68	0,625	3,65	5,65	12,6	38,7
	12	-2,5	0,594	12,5	12,5	41,7	121,5
	15	-3,37	0,575	22,7	22,7	102	287
	20	-4,6	0,559	42,3	42,3	260	721
	30	-7,2	0,	104	104	995	-

Bảng 13.3

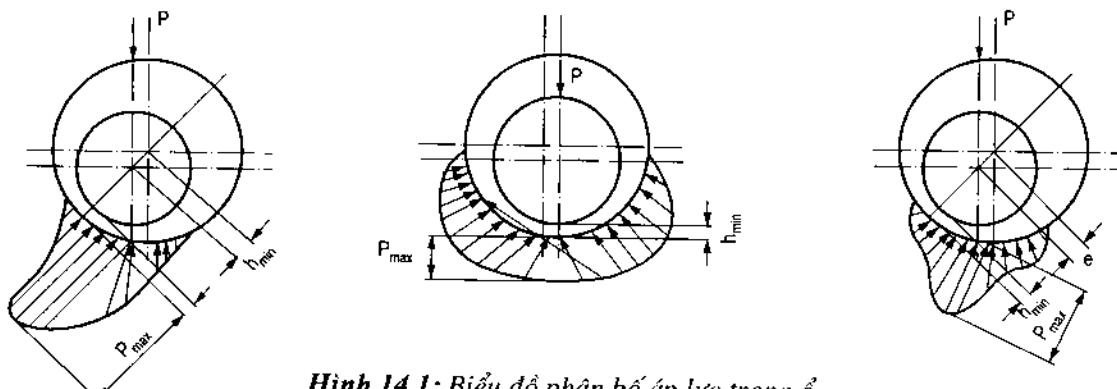
C	B <sub>n</sub>	$\frac{P_n}{P_{OKB}}$
1	0	1,076
	9	25,900
	15	164
20	0	4,32
	7	18,35
0,5	15	286,9

## Chương 14

# BÔI TRƠN Ổ THỦY TĨNH

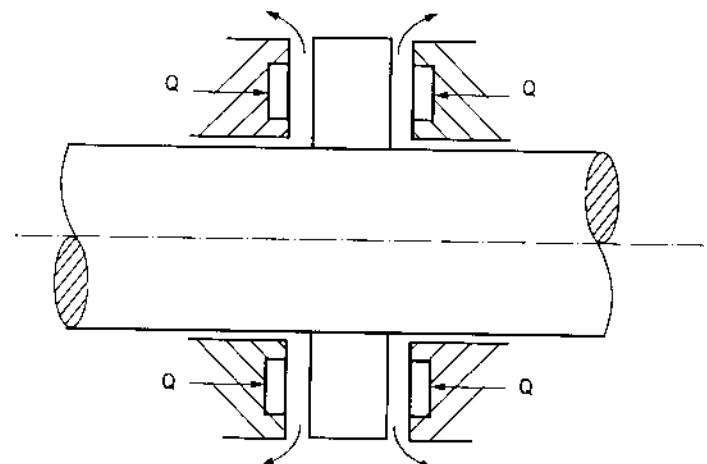
### 14.1. KHÁI NIỆM CHUNG

Ổ thủy tĩnh là loại ổ làm việc ở chế độ bôi trơn uớt. Đặc điểm cơ bản của nó là: trong quá trình làm việc, ngõng trực luôn luôn được đặt trên một nêm dầu có áp lực cao, không có hiện tượng tiếp xúc trực tiếp giữa trực và bạc, ma sát xảy ra giữa các lớp dầu rất nhỏ  $1 \cdot 10^{-5} \div 6 \cdot 10^{-5}$ . Chính đặc điểm này đã nâng cao tuổi thọ và độ tin cậy của thiết bị.

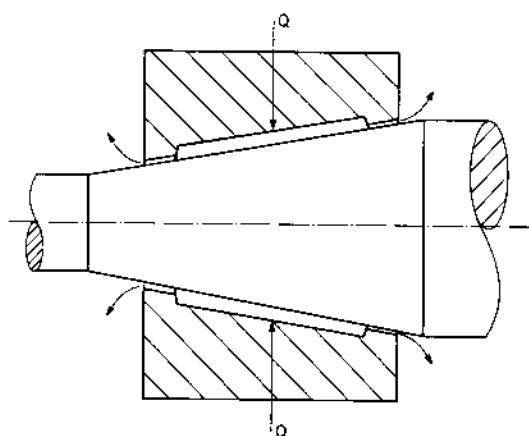


**Hình 14.1:** Biểu đồ phân bố áp lực trong ổ  
a) Ổ thủy động; b) Ổ thủy tĩnh; c) Ổ thủy tĩnh và thủy động

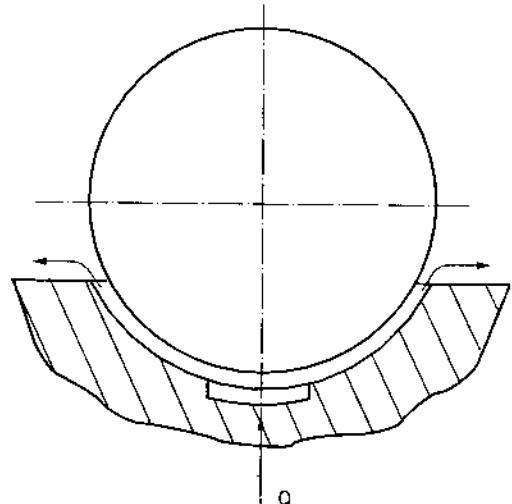
Kết cấu ổ thủy tĩnh khác hẳn các loại ổ trượt, ổ lăn. Trên ổ được khoét những buồng chứa dầu, có áp lực cao, hình dạng các buồng quyết định chế độ làm việc của ổ, chia làm hai loại chính: ổ đỡ thủy tĩnh và ổ chặn thủy tĩnh.



**Hình 14.2:** Kết cấu ổ chặn thủy tĩnh (loại ổ chỉ chịu lực dọc trực)



**Hình 14.3:** Kết cấu ổ chịu lực dọc trực và hướng kính



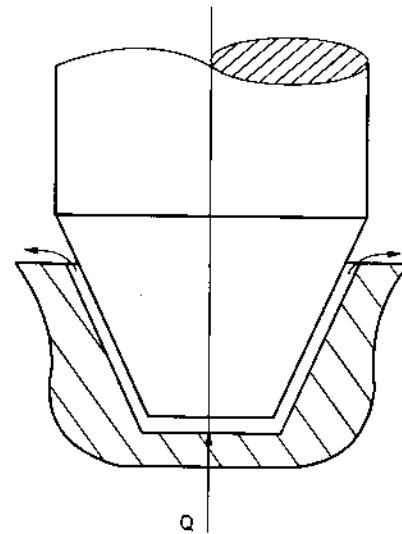
**Hình 14.4:** Kết cấu ổ thuỷ tĩnh hở

Dựa vào kết cấu ổ thuỷ tĩnh còn chia ra: ổ thuỷ tĩnh hướng kính kín là loại ổ bao kín ngõng trực (hình 14.3) và ổ thuỷ tĩnh hướng kính hở (hình 14.4).

Ổ thuỷ tĩnh hướng kính còn chia ra: loại có rãnh dọc trực và loại không có rãnh dọc trực. Đối với ổ chặn thuỷ tĩnh, tuỳ theo bề mặt làm việc, người ta chia ra các loại sau: ổ chặn phẳng, ổ chặn côn (hình 14.5), ổ chặn cầu và ổ chặn trụ. Các loại ổ chặn côn và cầu được sử dụng khi tải trọng thay đổi liên tục.

Ngoài ra người ta còn phân chia ra hai loại ổ có tiết lưu và loại ổ không có tiết lưu. Loại không có tiết lưu là loại mà mỗi buồng dầu có áp suất cao được cung cấp bằng một bơm riêng có lưu lượng không đổi. Loại có tiết lưu là loại mỗi buồng dầu đều có tiết lưu riêng. Nếu bố trí ngay trong ổ gọi là tiết lưu trong, nếu bố trí ngoài ổ gọi là tiết lưu ngoài, dầu được cung cấp từ một bơm chung cho tất cả các buồng.

Ổ thuỷ tĩnh đã được ứng dụng rộng rãi trong ngành chế tạo máy, trong máy cắt kim loại nó đáp ứng được yêu cầu vận tốc cao, tải trọng lớn. Ổ thuỷ tĩnh đã được ứng dụng vào ụ trực chính máy mài, máy tiện, mâm cặp, băng trượt, bàn dao, trực vít me... ổ thuỷ tĩnh làm việc theo nguyên lý sau (hình 14.6).



**Hình 14.5:** Ổ chặn côn

Dầu áp lực cao được bơm 4 cung cấp vào các buồng dầu sẽ nâng ngõng trục 1 lên và giữ nó ở một vị trí nhất định khi có tải. Dầu tràn qua biên mép ổ về thùng chứa 3. Điều chỉnh tiết lưu 6 để giữa ngõng và bạc luôn có một nêm dầu áp lực cao. Khi có tải, ngõng trục di chuyển một lượng nhỏ theo chiều ngoại lực làm thay đổi áp lực trong buồng dầu, nhờ tiết lưu 6 có thể điều chỉnh khả năng thay đổi áp lực trong buồng dầu, để ổ làm việc ở chế độ ma sát ướt.

Ổ thủy tĩnh có những ưu điểm đặc biệt mà các loại ổ khác không có :

- Hệ số ma sát rất nhỏ, khoảng  $1.10^{-5} - 6.10^{-5}$ ;

- Khả năng chịu tải cao, ngay cả ở những vùng có vận tốc thấp (gần bằng không),
- Ống có ma sát khô, hoặc ma sát cục bộ khi khởi động;
- Khả năng chống rung cao, tăng tuổi thọ và độ tin cậy của thiết bị .
- Thiết bị chạy êm khi khởi động và thay đổi tốc độ.

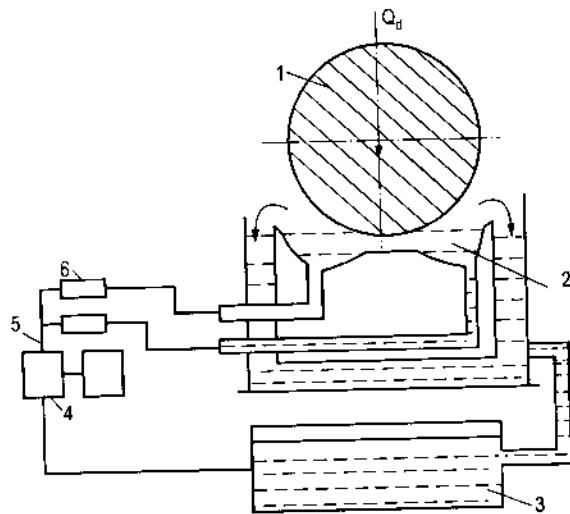
Ổ thủy tĩnh có những nhược điểm sau :

- Kết cấu phức tạp;
- Hệ thống cấp dầu cao áp công kềnh;
- Giá thành cao;
- Yêu cầu chế tạo chính xác cao.

## 14.2. CÁC HIỆN TƯỢNG CHÍNH TRONG Ổ THỦY TĨNH

### 14.2.1. Hiện tượng vi xoáy

Hiện tượng vi xoáy là hiện tượng đặc biệt trong ổ thủy tĩnh. Khi ngõng trục quay, áp lực dầu trong ổ thay đổi đáng kể. Khi trục ở vị trí nhất định, tần số thay đổi áp lực bằng tần số quay của trục chính. Người ta gọi sự mất ổn định của tâm trục chính là chuyển động vi xoáy bán vận tốc. Nguyên nhân xuất hiện vi xoáy là do độ nghiêng không thể tránh khỏi của bề mặt ngõng trục, do sai số về hình dạng hình học, do ngõng trục chịu xung lực chu kỳ làm mất cân bằng, hiện tượng vi xoáy có khả năng tăng đến khi ổ mất khả năng làm việc, nó phụ thuộc vào khe hở hướng kính ( $\Delta$ ), khối lượng của trục, tải



**Hình 14.6: Sơ đồ nguyên lý làm việc của ổ thủy tĩnh**

1. Ngõng trục; 2. Buồng dầu; 3. Thùng chứa dầu;
4. Bơm dầu; 5. Ống dẫn; 6. Tiết lưu.

trọng hướng kính và các yếu tố khác. Hiện tượng vi xoáy ảnh hưởng rất lớn đến khả năng làm việc của ổ, ổ và trục bị mòn, giảm độ chính xác, giảm tuổi thọ của thiết bị.

#### 14.2.2. Hiện tượng đảo phức tạp của ổ trục thuỷ tinh

Đặc điểm động lực học của ổ trục thuỷ tinh được biểu thị bằng thời điểm quay ban đầu của trục chính. Thực nghiệm đã chứng tỏ ở thời điểm đầu (khởi động, tăng vận tốc, dừng) trục chính chuyển động theo quỹ đạo xoắn ốc từ mép ổ vào tâm, cho đến khi trục chính ổn định, hiện tượng đó gọi là sự đảo phức tạp, và chỉ xảy ra trong khoảng từ 10 đến 20 vòng quay ban đầu, tiếp đó độ đảo hướng kính giảm từ từ. Nếu dừng, ngõng trục lại trở về vị trí ban đầu, trị số của độ đảo hướng kính và kích thước đường xoắn ốc phụ thuộc vào độ chính xác của các chi tiết trong ổ. Các chi tiết chính xác cao thì độ đảo phức tạp càng nhỏ.

Thực nghiệm chứng tỏ rằng : khi thay đổi trị số vòng quay trục chính, bao giờ cũng gây ra thay đổi vị trí ban đầu của nó. Sự thay đổi này được giải thích bằng sự thay đổi điều kiện chảy của dầu và phân bố áp lực dầu trong buồng dầu, khi ổ làm việc, hình dáng hình học của nó khác hẳn với hình dạng lý thuyết, người ta có thể khắc phục hiện tượng đảo phức tạp bằng cách nâng độ chính xác các chi tiết và lựa chọn rãnh hướng kính thích hợp...

#### 14.2.3. Hiện tượng rung động

Dưới tác dụng của ngoại lực, ngõng trục dịch chuyển, gây ra lực rung động. Để nâng cao độ tin cậy của ổ thuỷ tinh, điều quan trọng là phải xác định lực rung động đó. Thực chất của lực rung động là phản lực của màng dầu bị nén khi hai bề mặt làm việc dịch chuyển vào gần nhau. Với thí nghiệm chuyển dịch gần của hai mặt phẳng trong ổ chặn, phương trình Raynol cho hệ áp lực và đoạn dịch chuyển như sau:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{6\mu Q}{\pi rh^3} \quad (14.1)$$

Trong đó:

p - áp lực dầu;

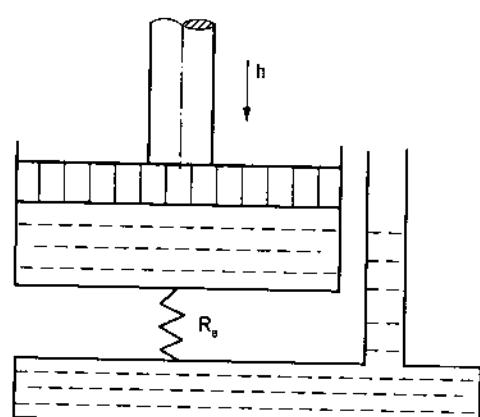
Q - lưu lượng dầu;

$\mu$  - độ nhớt của dầu;

r - bán kính;

h - đoạn dịch chuyển .

Việc tính toán hệ thống chống rung ổ thuỷ tinh dựa vào sơ đồ (hình 14.7)



Hình 14.7: Sơ đồ tính chống rung của ổ thuỷ tinh

$R_e$  - sức cản chảy ra của dầu;  $F_e$  - diện tích pittông bằng diện tích hiệu quả của ổ đỡ tương ứng.

Công thức gần đúng tính lực chống rung là:

$$P = F_e^2 \cdot R_e \cdot h \quad (14.2)$$

### 14.3. NHÂN TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN SỰ LÀM VIỆC CỦA Ổ

Như trên đã nêu, ổ thuỷ tĩnh làm việc phù hợp nhất với tốc độ cao và tải trọng nhỏ, do vậy vận tốc của ngõng trục có thể rất lớn được không?. Thực nghiệm và lí thuyết chứng tỏ rằng: không phải tăng vận tốc lên bao nhiêu cũng được, mà vận tốc đó phải ở giới hạn nhất định. Khi vận tốc ( $v$ ) trong gối đỡ càng cao, nhiệt tỏa ra trong dầu càng nhiều lưu lượng dầu qua ổ càng lớn, có nghĩa là sự bôi trơn nảy sinh càng tăng trên đường cao áp. Ví dụ trong máy 16B20A có gối thuỷ tĩnh ở trục chính ( $v = 9m/s$ ) thì thời gian dầu trên đường cao áp chỉ vài giây. Vì vậy dầu sẽ nóng lên rất nhanh. Garphila đã rút ra kết luận sau đây: khi quay trục với số vòng quay lớn thì nhiệt trong ổ sẽ tăng, làm cho dầu giảm độ nhớt đáng kể, dẫn đến nguy cơ làm giảm khả năng làm việc của ổ. Nhiệt tăng cao làm ngõng trục và các chi tiết trong ổ bị biến dạng, vì vậy các thông số của ổ bị thay đổi, ổ trở nên mất chính xác, độ cứng và khả năng tải của ổ sẽ giảm đi. Để tăng độ cứng tĩnh của ổ, hiệu quả nhất là tăng áp lực trong buồng dầu. Một vấn đề đặt ra là: có thể tăng áp lực lên vô hạn được không? áp lực trong buồng dầu không thể tăng lên vô hạn, vì khi áp lực tăng cao hơn 70 at sẽ gây ra sự biến dạng của các chi tiết trong ổ trục. Như vậy khe hở làm việc của ổ trục thuỷ tĩnh không những phụ thuộc vào tải trọng bên ngoài mà còn phụ thuộc vào áp lực trong buồng mang tải. Đặc tính làm việc của ổ trong nhiều trường hợp bị thay đổi dưới tác dụng của lực, làm biến dạng các chi tiết trong ổ trục chính dẫn đến giảm khả năng tải và độ cứng. Vì vậy trong tính toán thiết kế ổ trục thuỷ tĩnh, người ta chọn áp lực trong buồng dầu khoảng từ  $10kG/cm^2$  đến  $20kG/cm^2$ . Đây cũng là một trong những nguyên nhân khiến ổ thuỷ tĩnh chỉ phù hợp với các máy có yêu cầu tốc độ cao và tải trọng nhỏ.

Nhiệt độ dầu bôi trơn trong ổ thuỷ tĩnh tăng lên cùng với việc tăng tốc độ quay của ngõng trục. Nhiệt độ tăng làm thay đổi khe hở trong gối đỡ và độ nhớt của dầu. Sức cản thuỷ lực của gối đỡ bị thay đổi và đặc trưng dầu ra cũng bị thay đổi (độ cứng, khả năng tải, sự tỏa nhiệt...). Trong thực tế, nhiệt tỏa ra nhiều nhất ở trên đoạn đường dầu cao áp.

### 14.4. THIẾT KẾ THỦY TĨNH

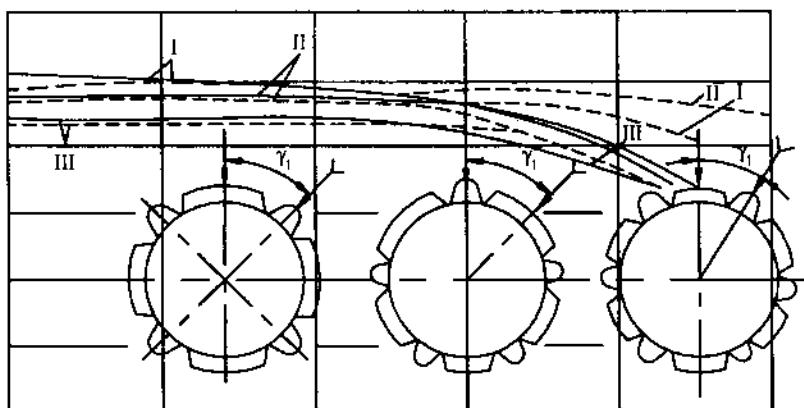
Việc thiết kế ổ thuỷ tĩnh được tiến hành theo các bước sau đây

#### 14.4.1. Đường kính ổ trục

Việc lựa chọn đường kính của ngõng trục phải dựa vào yêu cầu làm việc của trục chính (sức bền, kết cấu...). Đường kính của ngõng trục phải đảm bảo cứng vững. Nếu tăng đường kính trục, có thể nâng cao được khả năng tải của ổ.

#### 14.4.2. Số buồng mang tải

Trong ổ kín hướng kính thoả mãn điều kiện  $z > 3$ . Trong đó  $z$  là số buồng, tại sao số buồng lại lớn hơn hoặc bằng 3. Nếu  $z < 3$ , thì dưới tác dụng của tải trọng, áp lực ở các buồng không đều, khó nâng ngõng trực tách khỏi bạc, tức là số buồng phụ thuộc vào phương tác dụng của tải trọng. Nếu  $z > 4$ , phương của tải trọng không còn phụ thuộc vào số buồng nữa nhưng tổn thất do ma sát ở loại này lớn hơn loại  $z = 4$ . Hình 14.8 trình bày quan hệ giữa độ cứng  $J$  của ổ với số buồng và vị trí của tải trọng bên ngoài.



**Hình 14.8:** Sự thay đổi  $J$  của ổ phụ thuộc vào số buồng  $z$  và vị trí của tải trọng.

- J theo đường là → tải khi  $\gamma = 0$
- - - J theo đường là → tải khi  $\gamma \neq 0 = \gamma_1$

Khi chọn số buồng lớn sẽ có khả năng bù trừ được sai số trục và bạc do gia công gây ra. Lực tác dụng lên ngõng trực đồng đều hơn về mọi phía. Đồng thời nó đảm bảo được độ cứng vững cao, độ lệch tâm nhỏ.

#### 14.4.3. Chiều dài ổ

Chiều dài của ổ được chọn sao cho đạt được độ cứng vững lớn nhất và độ tin cậy của ổ cao nhất. Kinh nghiệm đã chỉ ra là : chiều cao của bạc phù hợp nhất là trong khoảng  $L = (1 - 1,2)D$ . Nếu tăng chiều dài của bạc lên, sẽ xuất hiện các ảnh hưởng xấu đến sai số gia công trục và bạc như : độ elip, độ song song, độ đồng tâm giữa bạc và trục cùng các yếu tố khác. Thực nghiệm chứng tỏ rằng: khi tăng chiều dài của bạc vượt quá  $1,2D$ , độ cứng vững và khả năng tải của ổ tăng lên không đáng kể. Nếu giảm đường kính và chiều dài ổ thì hiệu quả của áp lực buồng dầu giảm đi.

#### 14.4.4 Kích thước các vách ngăn

Khi chọn kích thước vách ngăn, phải đảm bảo sao cho tiết diện buồng mang tải là lớn nhất. Độ cứng các buồng phải đủ lớn và đồng đều, lượng dầu chảy trong ổ là nhỏ nhất. Thực tế cho thấy rằng: chiều rộng của buồng theo hướng trục nên lấy bằng nhau và chiều rộng của thành buồng theo phương tiếp tuyến cần phải giống nhau và là  $I_1 : 0,1D$ .

đối với ổ có rãnh. Nếu giảm chiều rộng của vách ngăn, khả năng tải của trục tăng lên không đáng kể nhưng lượng dầu chảy trong ổ tăng lên nhiều. Nên chọn chiều rộng rãnh thoát dầu  $b = 0,05D$  và chiều sâu  $(1,5 - 2)b$ . Nếu dùng ổ không có rãnh, nên dựa trên quan điểm tiêu hao năng lượng. Tốt nhất là dựa theo dự kiến công nghệ, rãnh có chiều cao  $h$ , và sau đó xác định giá trị tối ưu  $I_1$  phù hợp giới hạn  $0,05D \leq I_1 \leq 0,2D$ .

#### 14.4.5 Khe hở hướng kính

Khe hở hướng kính là một thông số quan trọng trong tính toán ổ. Chọn khe hở hướng kính hợp lý sẽ làm tăng độ cứng của ổ và có khả năng bù trừ ảnh hưởng sai lệch hình dạng của ngõng trục. Để tăng độ cứng vững của ổ và làm giảm lưu lượng dầu, đồng thời tăng ảnh hưởng của hiệu ứng thuỷ động (hiệu ứng này xuất hiện khi quay trục chính, do lệch tâm, do tác dụng của ngoại lực và sai lệch ban đầu của ngõng trục), do đó cần phải chọn khe hở hướng kính thích hợp. Tăng khe hở hướng kính sẽ tăng vùng vận tốc xuất hiện vi xoáy. Ví dụ khi  $\Delta = 0,033$  thì vi xoáy bán vận tốc xuất hiện ở số vòng quay  $n$ : 2800vg/ph; Khi  $\Delta = 0,047$  thì xuất hiện hiện tượng vi xoáy ở vòng quay  $n = 3200$  vg/ph.

Đối với ổ thủy tinh của máy cắt kim loại, làm việc trong giới hạn vận tốc từ 0 đến 15m/s nên áp dụng tỷ số  $\varphi = \frac{\Delta}{D} = 0,0006 - 0,00065$ . Khi đó rãnh sẽ đảm bảo được độ

cứng vững của ổ, và không xuất hiện vi xoáy bán vận tốc. Đối với các ổ chặn, chúng ta cần xác định chiều dày đệm dầu nhỏ nhất khi tải trọng lớn nhất. Chiều dày đệm dầu nhỏ nhất để lưu lượng của ổ là nhỏ nhất, tổn hao công suất ít nhất. Tuy nhiên, phải tính toán để sao cho khe hở không quá nhỏ và bù trừ được sai số do chế tạo. Trong ổ chặn thủy tinh  $\varphi$  thường được lấy từ 0,0025 đến 0,00254,  $\varphi$  nhận giá trị lớn nhất trong các điều kiện sau:

- Ổ trục có kích thước lớn;
- Vận tốc tương đối lớn;
- Độ giật chấn lớn;
- Độ nhẵn bề mặt làm việc thấp, không đảm bảo yêu cầu;
- Tính bôi trơn của dầu kém .

#### 14.4.6 Áp lực trong buồng dầu mang tải.

Áp lực trong buồng dầu máy nên chọn lớn nhất, vì nó tỷ lệ thuận với khả năng tải và độ cứng của ổ. Áp lực bị hạn chế bởi khả năng chảy của dầu và độ tin cậy của thiết bị chịu áp lực. Giảm quá mức của dầu sẽ gây ra hiện tượng dao động của ngõng trục theo dạng vi xoáy bán vận tốc. Áp lực thích hợp nên chọn từ 10 đến 20kG/cm<sup>2</sup>. Áp lực trong buồng ổ kín, cần phải bằng nửa áp lực, trước tiết lưu, tức là bằng nửa áp suất trong rãnh dẫn dầu. Nếu đặt  $m = \frac{P_{bu}}{P_{tl}}$  trong đó  $P_{bu}$  - áp lực buồng dầu;  $P_{tl}$  - áp lực trước tiết lưu, thì

nên lấy  $m = 0,5$ . Dựa vào đồ thị quan hệ giữa khả năng tải, độ cứng và áp lực ứng với  $m$ : 0,5, thì khả năng tải của màng dầu lớn nhất, ổ làm việc trong điều kiện lệch tâm nhỏ nhất. Với ổ chặn nên lấy  $m = 0,65$ . áp lực của dầu không lấy hơn  $10\text{kG/cm}^2$  để tránh gây ra các biến dạng các chi tiết của ổ. Đối với ổ hở, nên lấy áp suất trước tiết lưu càng thấp càng tốt. Nếu áp lực càng thấp, độ tin cậy làm việc của ổ càng lớn, khi đó độ cứng vững đạt cực đại và tổn thất năng lượng đạt cực tiểu (sự nóng của dầu sẽ tăng lên rất ít trong quá trình làm việc). Thời gian khởi động kể từ khi máy bắt đầu làm việc ít nhất với ổ trượt hở nên chọn  $m = \frac{2}{3}$ .

#### 14.4.7. Chọn dầu

Dầu được chọn theo độ nhớt. Do độ nhớt phụ thuộc vào áp suất và nhiệt độ, nên dùng dầu công nghiệp nhẹ đối với ổ trực có vận tốc lớn. Nếu cần chạy êm nên dùng dầu công nghiệp trung bình (CN20 hoặc CN30). Trong các máy chuyên dùng nhẹ và trung bình, máy làm việc trong số vòng quay giới hạn n từ 0 đến 3000vg/ph nên dùng dầu Vazolin có độ nhớt từ 5,1 đến 7CS<sub>t</sub> ở nhiệt độ 50°C. Trong các máy nặng, trực chính quay với vận tốc nhỏ nên chọn dầu công nghiệp 45 hoặc dầu AK15.

#### 14.4.8. Vật liệu làm ổ và trực

Vật liệu của ổ không trực tiếp ảnh hưởng đến đặc tính làm việc của ổ, vật liệu ổ cần phải đủ cứng để tránh biến dạng do áp lực. Tuy nhiên khi khởi động hay lắp ráp không tránh khỏi, ngõng trực tiếp xúc với ổ trực khi chưa có áp lực dầu, do đó bạc của ổ phải đảm bảo được khả năng chịu mòn cao. Vật liệu sử dụng phù hợp nhất là: δ<sub>p</sub> - OIII/C-6-6-3. Đối với ổ tải trọng nhỏ, có thể dùng thép tôi, thép hợp kim hoá tôi. Buồng mang tải được gia công bằng phương pháp điện vật lý, phương pháp thiêu kết. Loại vật liệu này dễ chế tạo và giữ được ổn định các thông số hình học khi thiêu kết, khi lắp ráp và khi vận tốc trượt cao. Ngoài ra người ta còn sử dụng phương pháp phủ polymer - một phương pháp thuận lợi để gia công ổ chặn thủy tinh. Vật liệu làm trực trong ổ thủy tinh thường là: 38XBIOA hoặc thép 38XIO. Với các ổ yêu cầu độ chính xác nâng cao và cao, thường sử dụng thép chất lượng cao kiểu 50, Y8A, ШХ14. Ngõng trực cần phải thấm nitơ để đạt độ cứng HRC 63-68. Đối với đường kính lớn có thể dùng gang C4 15 - 32; C4 21- 40 hoặc gang graphit

#### 14.4.9. Độ nhẵn của bề mặt làm việc

Độ nhấp nhô của bề mặt làm việc ngõng trực và bạc làm thay đổi rãnh hướng kính, dẫn đến thay đổi lưu lượng dầu, độ cứng, khả năng chịu tải của ổ so với tính toán. Để đảm bảo sự thay đổi đủ nhỏ, độ nhẵn của bề mặt làm việc của bạc cần phải không thấp hơn  $\nabla 8$  tức là:  $R_a = 0,6 - 1,0\mu\text{m}$ . Đồng thời ngõng trực phải có độ không tròn không lớn  $R_{\max} = 0,5 - 1,0\mu\text{m}$ .

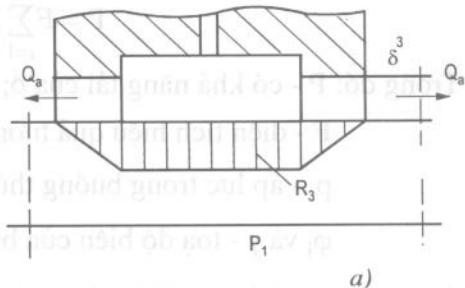
#### 14.4.12. Bơm dầu

Tính toán ống dẫn nước

Trong hệ thống thủy lực của ống thuỷ tĩnh, có thể dùng loại bơm nào cũng được nhưng trước hết phải đảm bảo: áp lực  $p$  và lưu lượng  $Q$ . Vì vậy người ta hay dùng bơm bánh răng và bơm cánh gạt.

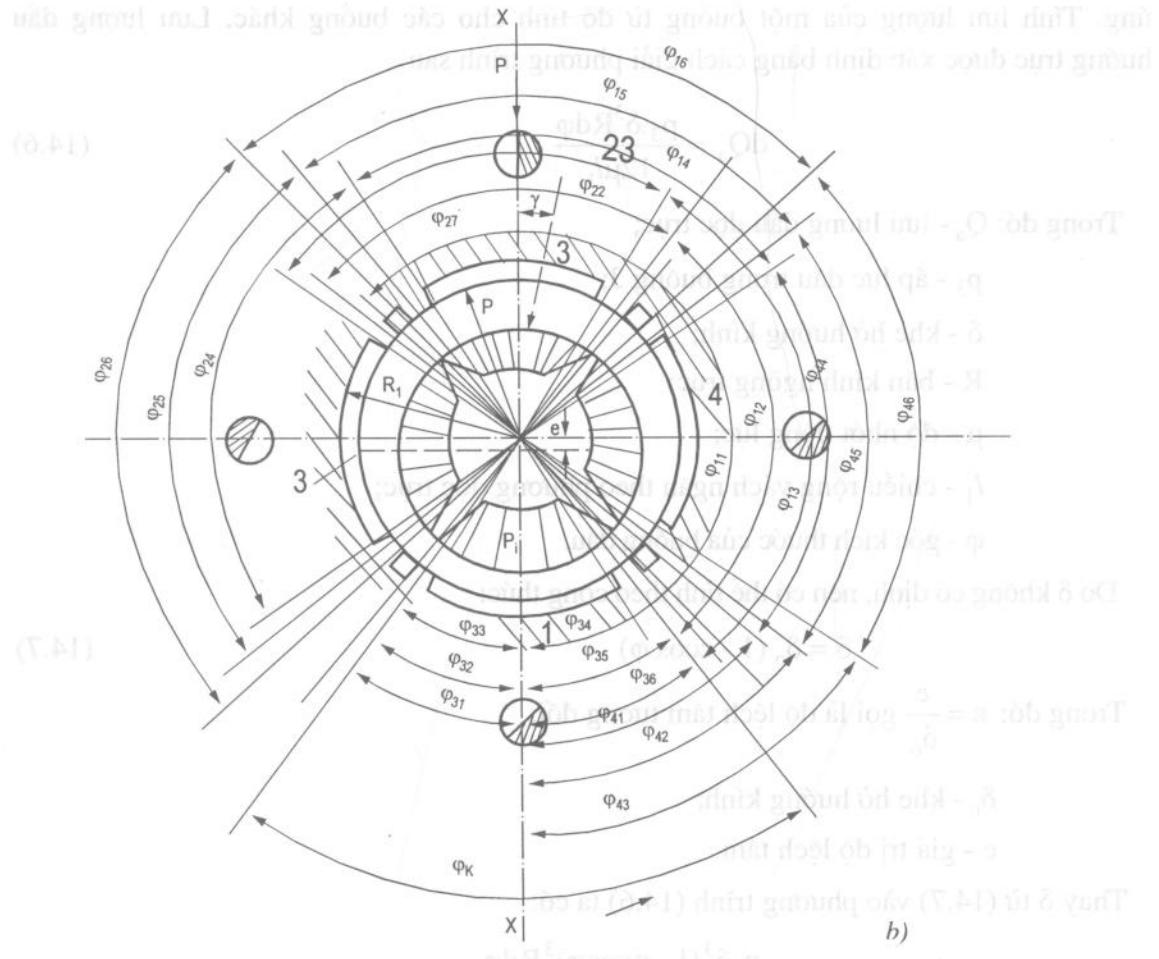
#### 14.5. TÍNH TOÁN ỐNG THỦY TĨNH

Xác định các thông số cơ bản của ống phải dựa vào kết cấu của ống, nếu dầu trong ống chỉ chảy theo hướng trục (ống không có rãnh) hoặc chảy theo cả hướng trục và hướng kính (ống có rãnh). Dưới đây trình bày các công thức tính toán cơ bản cho ống đỡ kín hướng kính có rãnh và không có rãnh (hình 14.9).



a)

Để xác định các thông số cơ bản của ống, ta cần xác định diện tích lumen  $A$ , độ dày ống  $\delta$ , độ rộng  $b$  và độ cao  $h$ .



b)

Hình 14.9: Sơ đồ tính toán ống thuỷ tĩnh

### 14.5.1. Tính toán ổ có rãnh

Việc xác định khả năng tải và độ cứng của ổ có rãnh đã được trình bày ở phần trên. Dầu từ bơm có áp lực  $p_b$  được đưa qua tiết lưu đến các buồng mang tải. Dưới tác dụng của ngoại lực, trục lệch đi so với tâm của bạc ổ. Sự thay đổi khe hở giữa bạc và trục làm thay đổi lưu lượng dầu trong các buồng mang tải và thay đổi áp lực dầu trong buồng dầu. Công thức tính tổng quát là:

$$P = F \sum_{i=1}^z P_i \cos(\varphi_i - \gamma) \quad (14.5)$$

Trong đó:  $P$  - có khả năng tải của ổ;

$F$  - diện tích hiệu quả tương đương;

$P_i$  - áp lực trong buồng thứ  $i$ ;

$\varphi_i$  và  $\gamma$  - toạ độ biên của buồng và đường tác dụng.

Áp lực  $p_i$  có thể xác định bằng cách giải phương trình lưu lượng ở các buồng tương ứng. Tính lưu lượng của một buồng từ đó tính cho các buồng khác. Lưu lượng dầu hướng trục được xác định bằng cách giải phương trình sau:

$$dQ_a = \frac{p_3 \delta^3 R d\varphi}{12 \mu l_1} \quad (14.6)$$

Trong đó:  $Q_a$  - lưu lượng dầu dọc trục;

$p_3$  - áp lực dầu trong buồng 3;

$\delta$  - khe hở hướng kính;

$R$  - bán kính ngõng trục;

$\mu$  - độ nhớt động lực;

$l_1$  - chiều rộng vách ngăn theo phương dọc trục;

$\varphi$  - góc kích thước của buồng dầu.

Do  $\delta$  không cố định, nên có thể tính theo công thức:

$$\delta = \delta_o (1 - \varepsilon \cos \varphi) \quad (14.7)$$

Trong đó:  $\varepsilon = \frac{e}{\delta_o}$  gọi là độ lệch tâm tương đối;

$\delta_o$  - khe hở hướng kính;

$e$  - giá trị độ lệch tâm.

Thay  $\delta$  từ (14.7) vào phương trình (14.6) ta có:

$$dQ_a = \frac{p_3 \delta_o^3 (1 - \varepsilon \cos \varphi)^3 R d\varphi}{12 \mu l_1}$$

$$Q_a = \frac{p_3 \delta_o^3 R}{12 \mu l_1} \int_{\phi_{33}}^{\phi_{34}} (1 - \varepsilon \cos \phi)^3 d\phi \quad (14.8)$$

Tích phân phương trình trên, ta được:

$$Q_a = \frac{p_3 \delta_o^3 R}{12 \mu l_1} (A_{34} - A_{33}) \quad (14.9)$$

$$\text{Với } A_{34} - A_{33} = \left[ \phi - 3\varepsilon \sin \phi + 3\varepsilon^2 \left( \frac{\sin \phi \cos \phi}{2} \right) - \varepsilon^3 \left( \frac{\sin \phi \cos \phi}{3} \right) + \frac{2}{3} \sin \phi \right] \Big|_{\phi_{33}}^{\phi_{34}}$$

Lưu lượng dầu toàn phần dọc trục là:

$$Q_A = 2Q_a = \frac{p_3 \delta_o^3 R}{12 \mu l_1} (A_{34} - A_{33}) \quad (14.10)$$

Lưu lượng dầu theo phương tiếp tuyến (do khe hở rãnh dọc ngõng trục tạo thành khi quay) theo Puarây có dạng:

$$dQ_t = -\frac{\delta^3}{12 \mu R} \cdot \frac{dp}{d\phi} dl \quad (14.11)$$

$Q_t$  - lưu lượng dầu theo phương tiếp tuyến.

Tích phân (14.11) với cận  $l = 0$  và  $l = l_o$  ta có:

$$Q_t = -\frac{\delta^3}{12 \mu R} \cdot \frac{dp}{d\phi} \quad (14.12)$$

Thay  $\delta = \delta_o - \varepsilon \cos \phi$  vào (14.12) ta được:

$$p_\phi = -\frac{12 \mu R}{l_o} Q_t \int_{\phi_{34}}^{\phi} \frac{d\phi}{(\delta_o - \varepsilon \cos \phi)^3} \quad (5.13)$$

$$p_\phi = -\frac{12 \mu R}{l_o} Q_t \cdot \frac{1}{\delta_o^3} \left[ \frac{\varepsilon \sin \phi (4 - \varepsilon^2 - 3\varepsilon \cos \phi)}{2(1-\varepsilon)^2 (1 - \varepsilon \cos \phi)^3} + \frac{2 + \varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2} \arctg \left( \frac{1+\phi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right) \right] \Big|_{\phi_{34}}^{\phi} \text{ đặt:}$$

$$\left[ \frac{\varepsilon \sin \phi (4 - \varepsilon^2 - 3\varepsilon \cos \phi)}{2(1-\varepsilon)^2 (1 - \varepsilon \cos \phi)^3} + \frac{2 + \varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2} \arctg \left( \frac{1+\phi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right) \right] \Big|_{\phi_{34}}^{\phi} = [K_\phi - K_{34}] \quad (14.14)$$

Ta có:

$$p_\phi = \frac{12 \mu R}{l_o} Q_t \cdot \frac{1}{\delta_o^3} [K_\phi - K_{34}] \quad (14.15)$$

Phương trình này cho ta biết quy luật thay đổi áp lực dầu theo chiều rộng rãnh. Tích phân theo cận từ  $\phi_{34}$  -  $\phi_{36}$ , hiệu áp lực giữa các buồng mang tải và van dẫn dầu:

$$p_{\varphi_{36}} - p_{\varphi_{34}} = p_3 = \frac{12\mu R}{l_o} Q_t \cdot \frac{1}{\delta_o^3} [K_{36} - K_{34}] \quad (14.16)$$

Lưu lượng dầu theo phương pháp tiếp tuyến, tính cả hai phía của buồng là:

$$Q_T = 2Q_t = \frac{2p_3 l_o \delta_o^3}{12\mu R (K_{36} - K_{34})} \quad (14.17)$$

Lưu lượng dầu tổng cộng qua buồng 3 là:

$$Q_3 = Q_A + Q_T$$

$$Q_3 = \frac{2p_3 \delta_o^2 R}{13\mu l_1} \left[ (A_{34} - A_{33}) + K_1 \frac{1}{K_{36} - K_{34}} \right]$$

$$\text{Trong đó: } K_l = \frac{l_o l_1}{R^2}$$

Tương tự, ta có công thức tính lưu lượng cho buồng bất kì:

$$Q_i = \frac{2p_i \delta_o^2 R}{12\mu l_i} \left[ (A_{i4} - A_{i3}) + K_1 \frac{1}{K_{i6} - K_{i4}} \right]$$

Lưu lượng chung của dầu qua ổ:

$$Q = \sum_{i=1}^z Q_i \quad (14.18)$$

Để xác định khả năng tải và lưu lượng của ổ ta phải xác định giá trị  $p_i$  trong buồng mang tải. Từ điều kiện chảy liên tục qua ổ và tiết lưu, lưu lượng dầu qua tiết lưu, xác định theo phương trình Puaray:

$$Q_u = \frac{\pi d_u^4}{128\mu l_u} (p_b - p_i) \quad (14.19)$$

Trong đó:  $d_u$  - đường kính rãnh tiết lưu;

$l_u$  - chiều dài rãnh tiết lưu;

$p_b$  - áp lực bơm.

Từ điều kiện chảy liên tục của dòng dầu, ta có:

$$\frac{\pi d_u^4}{128\mu l_u} (p_b - p_i) = \frac{2p_i \delta_o^3 R}{12\mu l_i} \left[ (A_{i4} - A_{i3}) + \frac{K_l}{K_{i6} - K_{i4}} \right]$$

$$\text{Đặt } C = \frac{12\pi d_u^4 l_i}{2.128 l_u \cdot \delta_o^3 R} = 0,147 \frac{d_u^4 l_i}{l_u \delta_o^3 R} \quad (14.20)$$

Áp lực dầu trong buồng bất kỳ:

$$p_i = \frac{C p_b}{(A_{i4} - A_{i3}) + \frac{K_l}{K_{i6} - K_{i4}} + C} \quad (14.21)$$

Khả năng tải và lưu lượng dầu qua buồng mang tải là:

$$P = F_K \sum_{i=1}^z \frac{C p_b (\varphi_i - \gamma)}{(A_{i4} - A_{i3}) + \frac{K_l}{K_{i6} - K_{i4}} + C} \quad (14.22)$$

$$Q_i = \frac{2\delta_o^3 R}{12\mu l} \frac{\frac{C p_b}{C(K_{i6} - K_{i4})}}{(A_{i4} - A_{i3})(K_{i6} - K_{i4}) + K_l} + 1$$

Giá trị trung bình của rãnh  $\delta_{tb}$  được rút gọn:

$$\delta_{tb} = \frac{1}{\varphi_{ki+1} - \varphi_{ki}} \int_{\varphi_{i5}}^{\varphi_{i5}} h d\varphi = \delta_o (1 - \varepsilon K_i) \quad (14.23)$$

Trong đó:  $K_i$  được xác định như sau:

$$K_i = \frac{\sin \varphi_{i5} - \sin \varphi_{i2}}{\varphi_{i5} - \varphi_{i2}} = \frac{2}{\varphi_k} \sin \frac{\varphi_k}{2} \quad (14.24)$$

Thay  $\delta_{tb}$  vào phương trình Puaray, lưu lượng buồng thứ i là:

$$Q_{Ai} = \frac{2}{12} \frac{p_i R \delta_o^3 \varphi_k}{\mu l} (1 - \varepsilon K_i)^3 \quad (14.25)$$

Trong đó:  $\varphi_k = 2\varphi_{i5}$

Công thức lưu lượng tiếp tuyến trong buồng mang tải có thể rút gọn, nếu bỏ qua kích thước của khe hở theo phương tiếp tuyến, và hiệu áp lực theo chiều rộng khi  $p_i - p_o$  kích thước rãnh theo phương tiếp tuyến, lấy giá trị trung bình:

$$\delta = \delta_o (1 - \varepsilon \cos \varphi_{i5}) \quad (14.26)$$

Lưu lượng tiếp tuyến của  $\delta$  sẽ là:

$$Q_{Ti} = \frac{1}{12} p_i \frac{l_u \delta_o^3 (1 - \varepsilon \cos \varphi_{i5})^3}{\mu R (\varphi_{i6} - \varphi_{i4})} \quad (14.27)$$

đặt  $l'_o = l_o + l_1$

Lượng dầu chảy tổng cộng trong buồng là:

$$Q_i = Q_{Ai} + Q_{Ti} = \frac{2}{12} \frac{p_i R \delta_o^3 \varphi_k}{\mu l} (1 - \varepsilon K_i)^3 + \frac{2}{12} p_i \frac{l'_o \delta_o^3 (1 - \varepsilon \cos \varphi_{i5})^3}{\mu R (\varphi_{i6} - \varphi_{i4})} \quad (14.28)$$

Đặt  $C_L = \frac{l'_o \cdot l_1}{R^2 \varphi_k (\varphi_{i6} - \varphi_{i4})}$  ta có:

$$Q_i = \frac{2}{12} \frac{p_i R \delta_o^3 \phi_k}{\mu l_i} \left[ (1 - \varepsilon K_i)^3 + C_L (1 - \varepsilon \cos \varphi_{i5})^3 \right]$$

Lưu lượng tổng của dầu trong ổ là:

$$Q = \sum_{i=1}^z Q_i$$

Áp lực trong buồng được xác định từ điều kiện chảy liên tục của dòng dầu qua buồng hoặc tiết lưu:

$$Q_i = Q_{il}$$

Ta có:

$$\frac{2}{12} \frac{p_i R \delta_o^3 \phi_k}{\mu l_i} \left[ (1 - \varepsilon K_i)^3 + C_L (1 - \varepsilon \cos \varphi_{i5})^3 \right] = \frac{\pi d_u^4 (p_b - p_i)}{128 \mu l_u}$$

$$\text{Đặt } C_h = \frac{128 J_u R \delta_o^3 \phi_k \cdot 2}{12 d_u^4 l_i \pi} = \frac{0,425 \delta_o^3 D l_u \phi_k}{l_i d_u^4}$$

Giải phương trình trên ta được:

$$p_i = \frac{p_b}{1 + C_h \left[ (1 - \varepsilon k_i)^3 + C_L (1 - \varepsilon \cos \varphi_{i5})^3 \right]}$$

Cuối cùng ta được công thức lưu lượng và khả năng tải của ổ thủy tĩnh:

$$Q = \frac{2 P_b \delta_o^3 R \phi_k}{12 \mu l_i} \sum_{i=1}^z \frac{(1 - \varepsilon K_i)^3 + C_L (1 - \varepsilon \cos \varphi_{i5})^3}{1 + C_h \left[ (1 - \varepsilon k_i)^3 + C_L (1 - \varepsilon \cos \varphi_{i5})^3 \right]} \quad (14.29)$$

$$P = F b_b \sum_{i=1}^z \frac{\cos(\varphi_i - \gamma)}{1 + C_h \left[ (1 - \varepsilon k_i)^3 + C_L (1 - \varepsilon \cos \varphi_{i5})^3 \right]} \quad (14.30)$$

Độ cứng của ổ được tính theo công thức:

$$J = \frac{dP}{de} = \frac{dP}{\delta_o d\varepsilon} \quad (14.31)$$

$$J = \frac{3 F P_b}{\delta_o} \sum_{i=1}^z \frac{\cos(\varphi_i - \gamma) C_h \left[ K_i (1 - \varepsilon k_i)^2 + C_L \cos \varphi_{i5} (1 - \varepsilon \cos \varphi_{i5})^2 \right]}{\left\{ 1 + C_h \left[ (1 - \varepsilon k_i)^3 + C_L (1 - \varepsilon \cos \varphi_{i5})^3 \right] \right\}^2}$$

Độ cứng của ổ phụ thuộc vào áp lực bơm  $p_b$  đến tiết lưu và áp lực trong buồng dầu. Cần phải tìm giá trị tương ứng  $p_b$  và  $p_i$  khi độ cứng của ổ là lớn nhất, đặc biệt khi vị trí lệch tâm của trục  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Độ cứng  $J_o$  khi  $\varepsilon = 0$  có dạng:

$$J_o = \frac{3FP_b}{\delta_o} \sum_{i=1}^x \frac{\cos(\varphi_i - \gamma) C_h (1 - C_L)}{[1 - C_h (1 - C_L)]^2} \quad (14.32)$$

Vì phân  $J_o$  theo  $C_h$  và cho bằng không, ta nhận được:

$$C_h = \frac{1}{C_L + 1} \quad (14.33)$$

Dựa (14.33) vào công thức tính  $p_i$  khi  $\varepsilon = 0$ , có:

$$p_i = \frac{p_b}{1 + C_L} = \frac{p_b}{2} \quad (14.34)$$

Bởi vậy  $J = J_{max}$  khi  $\varepsilon = 0$ , lúc đó áp lực trong buồng bằng  $1/2$  áp lực trước tiết lưu. Các thông số cơ bản của tiết lưu được tính như sau:

$$\frac{l_u}{d_{tl}} = \frac{2,35}{(1 + C_L) \Delta^3 D \varphi_k} \quad (14.35)$$

Áp dụng đối với ổ bốn buồng (loại ổ thường hay được áp dụng đối với trực chính) khi  $\varepsilon = 0$ ,  $\gamma = 0$  và sử dụng các giá trị  $(1 \pm \varepsilon K)$ :

$(1 \pm \varepsilon \cos \frac{\varphi_k}{2})$  đối với ổ bốn buồng, tương ứng với các trị số lệch tâm tương đố khác nhau:  $\varepsilon = 0 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,15 ; 0,2 ; 0,25 ; 0,30$ . Ta thu được các công thức cơ bản để tính toán ổ trực thủy tĩnh bốn buồng loại có rãnh:

$$Q = 1,74 \cdot 10^{-2} \frac{P_b \delta_o^3 R \varphi_k}{\mu l_1} \left\{ \frac{(1 - \varepsilon K_3)^3 C_L (1 - \varepsilon \cos \varphi_{35})^3}{1 + C_h [(1 - \varepsilon k_3)^3 + C_L (1 - \varepsilon \cos \varphi_{35})^3]} + \right. \\ \left. + \frac{(1 - \varepsilon K_1)^3 C_L (1 + \varepsilon \cos \varphi_{15})^3}{1 + C_h [(1 - \varepsilon k_1)^3 + C_L (1 + \varepsilon \cos \varphi_{15})^3]} + 2 \frac{1 + C_L}{2 - C_h} \right\} \text{cm}^3/\text{ph} \quad (14.36)$$

Áp lực ở buồng 3 là :

$$p_3 = \frac{p_b}{1 + C_h [(1 - \varepsilon k_3)^3 + C_L (1 - \varepsilon \cos \varphi_{35})^3]}, \text{kG/cm}^2$$

Áp lực ở buồng 1 là:

$$p_3 = \frac{p_b}{1 + C_h [(1 + \varepsilon k_1)^3 + C_L (1 + \varepsilon \cos \varphi_{15})^3]} \text{kG/cm}^2$$

Khả năng tải sẽ là:

$$Q = FP_b \left\{ \frac{1}{1 + C_h [(1 + \varepsilon k_3)^3 + C_L (1 + \varepsilon \cos \varphi_{35})^3]} + \frac{1}{1 + C_h [(1 + \varepsilon k_1)^3 + C_L (1 + \varepsilon \cos \varphi_{15})^3]} \right\}, \text{kG} \quad (14.37)$$

Độ cứng của ống sẽ là:

$$J = \frac{3FP_b}{\delta_0} \left\{ \frac{C_h \left[ (1 - \varepsilon K_3)^2 + C_L \cos \varphi_{35} (1 - \varepsilon \cos \varphi_{35})^2 \right]}{(1 + C_h \left[ (1 - \varepsilon k_3)^3 + C_L (1 - \varepsilon \cos \varphi_{35})^3 \right])^2} + \frac{C_h \left[ (1 - \varepsilon K_1)^2 + C_L \cos \varphi_{15} (1 + \varepsilon \cos \varphi_{15})^2 \right]}{(1 + C_h \left[ (1 - \varepsilon k_1)^3 + C_L (1 + \varepsilon \cos \varphi_{15})^3 \right])^2} \right\}, \text{kG}/\mu\text{m} \quad (14.38)$$

Trong công thức này  $\varphi_{15} = \varphi_{35} = \frac{\varphi_k}{2}$

Giá trị  $(1 \pm \varepsilon K)$  và  $(1 \pm \varepsilon \cos \frac{\varphi_k}{2})$  đối với ống bốn buồng được cho theo bảng

Bảng 14.1

$\varepsilon$	$1 - \varepsilon k$	$1 - \varepsilon \cos \frac{\varphi_k}{2}$	$1 + \varepsilon k$	$1 + \varepsilon \cos \frac{\varphi_k}{2}$
0,00	1,0	1,0	1,0	1,0
0,05	0,953	0,9595	1,047	1,0405
0,10	0,906	0,9091	1,094	1,0809
0,15	0,859	0,8665	1,141	1,1335
0,20	0,812	0,8220	1,188	1,1780
0,25	0,765	0,7977	1,235	1,2028
0,30	0,718	0,7573	1,282	1,2427

Để đơn giản, khi tính toán các thông số của ống đỡ bốn buồng trong máy công cụ, ta xem như độ lệch tâm tương đối  $\varepsilon \rightarrow 0$  hay  $\varepsilon = 0$ , lúc đó ống sẽ có lưu lượng lớn nhất và độ cứng cao nhất. Công thức cơ bản để thiết kế ống thuỷ tĩnh bốn buồng như sau:

a) Lưu lượng dầu Q:

$$Q = 2,15 \cdot 10^{-6} \frac{P_b \Delta^3 D \varphi_k (1 + C_L)}{\mu l_1}, \text{cm}^3/\text{ph} \quad (14.39)$$

b) Khả năng tải P:

$$P_{\varepsilon \rightarrow 0} = P_b \cdot F \left[ \frac{1}{1 + (1 - \varepsilon k)^3} - \frac{1}{1 + (1 + \varepsilon k)^3} \right], \text{kG} \quad (14.40)$$

Trong đó:  $\varepsilon = \frac{23}{\Delta}$ ;  $K = \frac{1}{\varphi_k} \sin \frac{\varphi_k}{2}$

c) Độ cứng J:

$$J = \frac{6PF_K}{\Delta} \left\{ \frac{(1 - \varepsilon K)^2}{\left[ 1 + (1 - \varepsilon k)^3 \right]^2} + \frac{(1 + \varepsilon K)^2}{\left[ 1 + (1 + \varepsilon k)^3 \right]^2} \right\}, \text{kG}/\mu\text{m} \quad (14.41)$$

Khi  $\varepsilon \rightarrow 0$  độ cứng được tính theo công thức:

$$J_{\varepsilon \rightarrow 0} = \frac{3P_b \cdot F}{\Delta}, \text{ kG}/\mu\text{m} \quad (14.42)$$

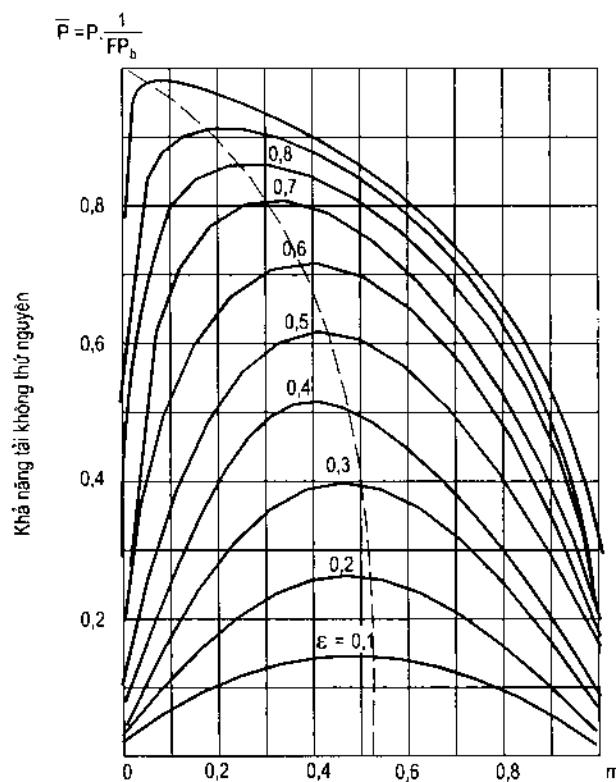
Các thông số tiết lưu ma sát được xác định theo công thức:

$$\frac{l_u}{d_u^4} = \frac{2,35 \cdot 10^{12} l_1}{(1+C_L) \Delta^3 D \varphi_k}, \quad d_u = \frac{4F_u}{U_u} \quad (14.43)$$

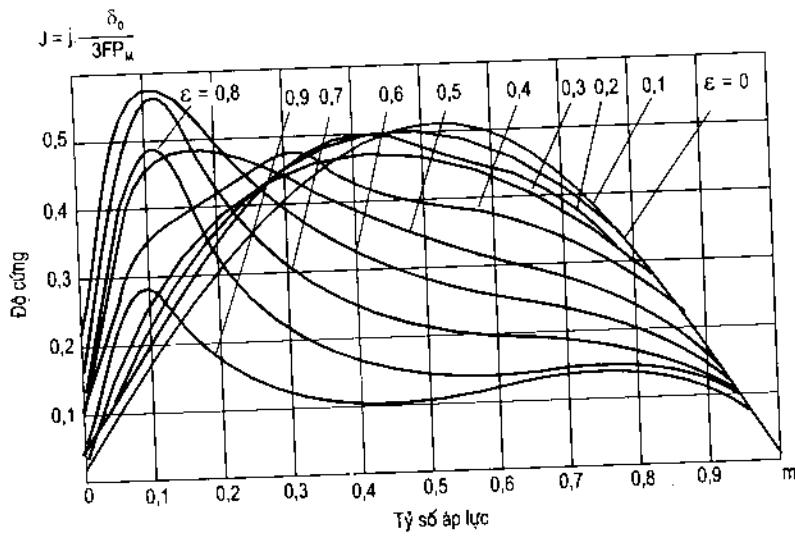
$U_u$  - chu vi diện tích ngang của rãnh tiết lưu.

Nếu đặt  $\frac{p_i}{p_b} = m = \frac{1}{1+C_h(1+C_L)}$

Ta có thể biểu thị bằng đồ thị quan hệ giữa độ cứng, khả năng tải qua m. Qua đồ thị (hình 14.10) ta thấy rằng, độ cứng và khả năng tải phụ thuộc vào độ lệch tâm tương đối  $\varepsilon$  và m. Nếu tăng giá trị  $\varepsilon$ , thì trị số khả năng tải lớn nhất sẽ dịch về phía m nhỏ.



**Hình 14.10:** Thay đổi khả năng tải và độ cứng của màng dầu trong ổ trục thuỷ tĩnh phụ thuộc vào tỉ số áp lực  $m$  và  $\varepsilon$ .



**Hình 14.11:** Biểu đồ độ sự phụ thuộc độ cứng vào tỉ số áp lực

#### 14.5.2. Tính toán ở không rãnh

Từ phương trình lưu lượng dọc trực của rãnh thứ i:

$$Q_{Ai} = \frac{1}{12} \frac{p_i R \delta_o^3 \varphi_k}{\mu l} (1 - \varepsilon K_i)^3 \quad (14.44)$$

Trong đó:  $\varphi_k = 2\varphi_{is}$ .

Vì không có rãnh giữa các buồng dầu nên dầu chỉ thoát ra phía dọc trực và có thể sử dụng phương trình của Rêsetôp, áp suất trong buồng được xác định từ điều kiện chảy liên tục. Lưu lượng qua buồng bằng lưu lượng qua tiết lưu:  $Q_{Ai} = Q_u$

Rút ra:

$$\frac{2}{12} \frac{p_i R \delta_o^3 \varphi_k}{\mu l} (1 - \varepsilon K_i)^3 = \frac{\varphi d_u^4}{128 \mu l_u} (p_b - p_i)$$

$$p_i = \left[ \frac{2}{12} \frac{R \delta_o^3 \varphi_k}{\mu l} (1 - \varepsilon K_i)^3 + \frac{\pi d_u^4}{128 \mu l_u} \right] \cdot \frac{\pi d_u^4}{128 \mu l_u} \quad (14.45)$$

Thay giá trị  $C_h$  vào phương trình trên, ta có:

$$p_i = \frac{p_b}{C_h (1 - \varepsilon K_i)^3 + 1} \quad (14.46)$$

Lưu lượng dầu buồng thứ i sẽ là:

$$Q_i = \frac{2}{12} \frac{p_b R \delta_o^3 \phi_k}{\mu l_i} \cdot \frac{(1-\varepsilon K_i)^3}{C_h (1-\varepsilon K_i)^3 + 1} \quad (14.47)$$

Lượng dầu qua ổ sẽ là:

$$Q_o = \frac{2}{12} \frac{p_b R \delta_o^3 \phi_k}{\mu l_i} \sum_{i=1}^z \frac{(1-\varepsilon K_i)^3}{C_h (1-\varepsilon K_i)^3 + 1} \quad (14.48)$$

Khả năng tải của ổ:

$$\begin{aligned} P &= F \sum_{i=1}^z p_i (\varphi_i - \gamma) \\ P &= F p_b \sum_{i=1}^z \frac{\cos(\varphi_i - \gamma)}{C_h (1-\varepsilon K_i)^3 + 1} \end{aligned} \quad (14.49)$$

Độ cứng của ổ:

$$\begin{aligned} J &= \frac{dP}{de} = \frac{dP}{\delta_o d\varepsilon} \\ J &= \frac{F p_b}{\delta_o} \sum_{i=1}^z \cos(\varphi_i - \gamma) \frac{\left[ C_h (1-\varepsilon K_i)^3 + 1 \right]'}{\left[ C_h (1-\varepsilon K_i)^3 + 1 \right]^2} \end{aligned}$$

Thành phần đạo hàm:

$$\left[ C_h (1-\varepsilon K_i)^3 + 1 \right]'_e - 3 C_h (1-\varepsilon K_i)^2 K_i$$

Ta có: khi  $\varepsilon \rightarrow 0$

$$J_o = \frac{3 F p_b}{\delta_o} \sum_{i=1}^z \frac{\cos(\varphi_i - \gamma) C_h (1-\varepsilon K_i)^2 K_i}{(C_h + 1)^4} = 0$$

Từ đó suy ra:  $(C_h + 1)^2 = 2 (C_h + 1) \rightarrow C_h = 1$

Sau khi thay thế và biến đổi ta tìm được:

$$p_i = \frac{p_b}{2} \quad (14.50)$$

Điều đó chứng tỏ, độ cứng vững lớn nhất khi  $\varepsilon = 0$  lúc đó áp lực trong buồng dầu bằng một nửa áp lực trước tiết lưu. Các thông số của tiết lưu được tính theo công thức sau.

Từ:

$$C_h = \frac{0,425 \Delta^3 D l_u \phi_k}{l_j d_u^4} = 1$$

Có

$$\frac{l_u}{d_u^4} = \frac{2,35l_1}{\Delta^3 D \varphi_k} \quad (14.51)$$

Đối với ống thủy tinh có bốn buồng (thông dụng hơn cả) khi  $\varepsilon = 0$  với buồng 2 và 4 và khi  $\gamma = 0$  ta có công thức cơ bản sau:

Lưu lượng:

$$Q = 1,74 \cdot 10^{-12} \frac{P_b \delta_o^3 R \varphi_k}{\mu l_1} \left\{ \frac{(1-\varepsilon K_3)^3}{1+C_h(1-\varepsilon k_3)} + \frac{(1-\varepsilon K_1)^3}{1+C_h(1+\varepsilon k_1)} + \frac{2}{1+C_1} \right\}; \text{cm}^3/\text{ph} \quad (14.52)$$

Áp suất trong buồng thứ 3 là:

$$P_3 = \frac{P_b}{C_h(1-\varepsilon K_3)^3 + 1}; \text{kG/cm}^2 \quad (14.53)$$

Áp suất trong buồng thứ 1 là:

$$d P_1 = \frac{P_b}{C_h(1-\varepsilon K_1)^3 + 1}; \text{kG/cm}^2 \quad (14.54)$$

Khả năng tải:

$$P = p_b \cdot F \left[ \frac{1}{1+C_h(1-\varepsilon k)^3} - \frac{1}{1+C_h(1+\varepsilon k)^3} \right]; \text{kG} \quad (14.55)$$

Độ cứng vững:

$$J = \frac{3P_b F_K}{\delta_o} \left\{ \frac{C_h K_3 (1-\varepsilon K_3)^2}{[1+C_h(1-\varepsilon k_3)^3]^2} + \frac{C_h K_1 (1-\varepsilon K_1)^2}{[1+C_h(1+\varepsilon K_1)^3]^2} \right\}; \text{kG}/\mu\text{m} \quad (14.56)$$

Ta có thể sử dụng công thức rút gọn sau cho trường hợp  $\varepsilon = 0$  hay  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

Lưu lượng:

$$Q = 2,15 \cdot 10^{-6} \frac{P_b \Delta^3 D \varphi_k}{\mu l_1}; \text{cm}^3/\text{ph}$$

Khả năng tải:

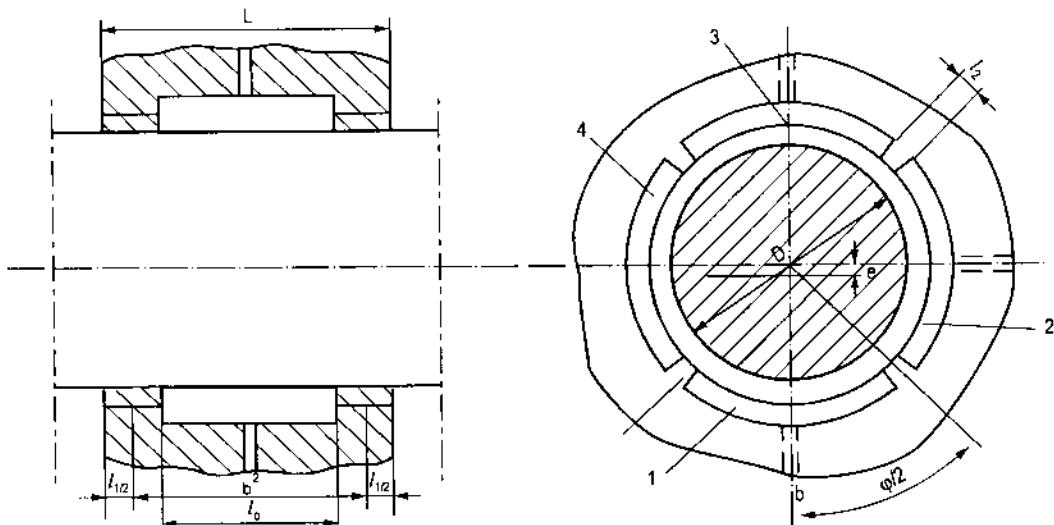
$$P = p_b \cdot F \left[ \frac{1}{1+(1-\varepsilon k)^3} - \frac{1}{1+(1+\varepsilon k)^3} \right]; \text{kG.}$$

Độ cứng vững:

$$J = \frac{6P_b F}{\Delta} \left\{ \frac{K(1-\varepsilon K)^2}{[1(1-\varepsilon K_3)^3]^2} + \frac{K(1-\varepsilon K)^2}{[1+(1+\varepsilon K_1)^3]^2} \right\}; \text{kG}/\mu\text{m}$$

Khi  $\varepsilon \rightarrow 0$  có:

$$J_{\varepsilon \rightarrow 0} = \frac{3P_b F_k}{\Delta}; \text{ kG}/\mu\text{m} \quad (14.57)$$



**Hình 14.12: Ố dỡ thủy tĩnh không rãnh, bốn buồng**

### 14.5.3. Xác định măt măt do ma st trong 

Măt măt do ma sát gồm: măt măt trong buồng mang tải, bờ dọc, bờ ngang. Trong thực tế giả thiết đó đúng khi  $\varepsilon = 0 - 0,4$ . Tn tht măt măt  $N_k$  trong buồng có thể tìm được bằng lực ma st trên ngõn trục quay trên đầu:

$$T = \frac{2\mu R_1^2 \omega}{R_1^2 - R^2} \quad (14.58)$$

Trong đó:  $\omega$  - vận tốc trục;

$R_1$  - bán kính trong của buồng mang tải;

$R$  - bán kính cổ trục;

Công suất sẽ là:

$$N_k = 1,36 \cdot 10^{-12} \frac{\mu n^2 R_1^2 R^2 l_o z}{R_1^2 - R^2} \cdot \frac{\Phi_k}{360^\circ} \quad (14.59)$$

Theo Petrova ta tính được tn tht trên vch dc:

$$N_T = 0,17 \cdot 10^{-9} \mu_0 D^3 \frac{\pi^2}{\Delta} \cdot \frac{\Phi_{truc}^0}{360^\circ}, \text{ kW} \quad (14.60)$$

Tn tht trên vch ngang:

$$N_o = 0,34 \cdot 10^{-9} \mu' D^3 \frac{n^2}{\Delta} \cdot \frac{\Phi_o}{360^\circ}, \text{ kW} \quad (14.61)$$

Tổn thất ma sát tổng cộng là:

$$N_n = N_k + N_T + N_o \quad (14.62)$$

Tổn thất công suất để đẩy dầu trong ổ tính như sau:

$$N_Q = \frac{P_b Q}{612}, \text{ kW}$$

#### 14.5.4. Tính toán ổ chặn

Ổ chặn làm nhiệm vụ chịu lực chiều trực, cần phải có kết cấu thích hợp với điều kiện làm việc kiểu buồng dầu hình chữ nhật, hình vành khăn, hay được sử dụng nhất, cũng có thể kết cấu dùng kiểu một buồng hay nhiều buồng dầu. Trong thực tế, dùng loại hình vành khăn, đảm bảo khả năng tải và độ cứng vững ít phụ thuộc vào vị trí của tải trọng bên ngoài.

Khi tính toán thiết kế ổ chặn thuỷ tĩnh ta phải tính khả năng tải, độ cứng vững, lưu lượng dầu và sự mất mát do ma sát của ổ. Khả năng tải được tính theo công thức sau:

$$P = P_b \cdot F_{hq} \left[ \frac{1}{1+(1-\chi)^3} - \frac{1}{1+(1+\chi)^3} \right], \text{ kG} \quad (14.63)$$

Trong đó:  $F_{hq}$  - diện tích hiệu quả,  $\text{cm}^2$  (buồng dầu mang tải);

$$\chi = \frac{l}{h_o} - \text{khe hở giữa bề mặt ổ trực};$$

$l$  - sự dịch chuyển của ngõng trực khi có tải trọng bên ngoài;

$\chi$  - được gọi là độ dịch chuyển tương đối của ngõng;

$F_{hq}$  - được tính theo công thức sau:

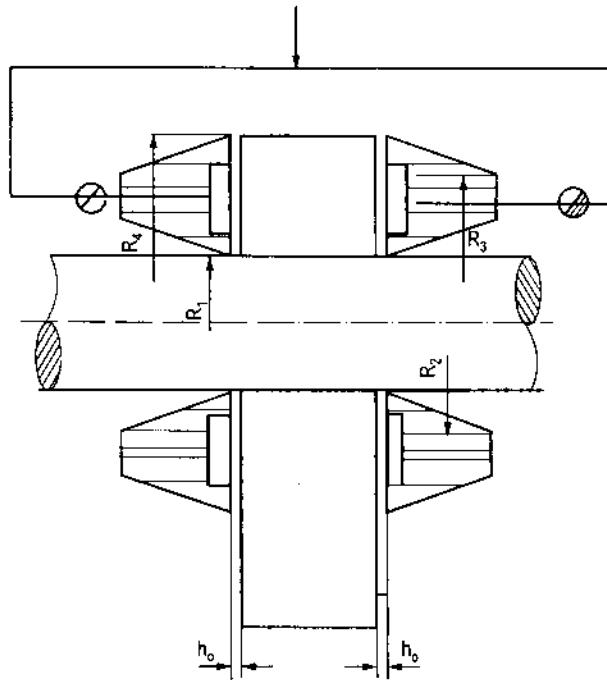
$$h_{hq} = \pi \left( \frac{R_4^2 - R_3^2}{2 \ln \frac{R_4}{R_3}} - \frac{R_2^2 - R_1^2}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}} \right) \quad (14.64)$$

$R_4$  - bán kính lớn nhất của vòng ngoài, cm;

$R_3$  - bán kính nhỏ nhất của vòng ngoài, cm;

$R_2$  - bán kính lớn nhất của vòng trong, cm;

$R_1$  - bán kính nhỏ nhất của vòng trong, cm (hình 14.13).



**Hình 14.13:** Sơ đồ tính toán ổ chặn

Lưu lượng dầu qua ổ chặn được tính theo công thức sau:

$$Q = 3,14 \cdot 10^{-3} \frac{p_b \cdot h_o^3}{\mu} \left( \frac{1}{\ln \frac{R_4}{R_3}} - \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right), \text{cm}^3/\text{ph}$$

Nếu bờ buồng 2 phía bằng, sẽ tính theo công thức:

$$Q = 3,14 \cdot 10^{-3} \frac{p_b \cdot h_o^3}{\mu l} (R_4 - R_1), \text{cm}^3/\text{ph} \quad (14.65)$$

*l* - chiều rộng bờ buồng dầu.

Độ cứng vững được tính theo công thức:

$$J = \frac{3p_b \cdot F_{hq}}{h_o} \left[ \frac{(1-\chi)^2}{\left[ (1-\chi)^3 - 1 \right]^2} - \frac{(1+\chi)^2}{\left[ (1+\chi)^3 + 1 \right]^2} \right] \quad (14.66)$$

Khi độ lệch tâm do tải trọng bên ngoài  $e_i \rightarrow 0$  thì độ cứng sẽ được tính theo công thức sau:

$$J_o = 1,5 \frac{p_b \cdot F_{hq}}{h_o}, \text{kG}/\mu\text{m} \quad (14.67)$$

Các thông số làm việc của tiết lưu:

$$\frac{d_u^4}{l_u} = 21,6 \cdot 10^{-12} h_o^3 \left( \frac{1}{\ln \frac{R_4}{R_3}} - \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right) \quad (14.68)$$

$$d_u = \frac{4F_u}{U_u}$$

Trong đó:  $F_u$  - diện tích cắt ngang của rãnh tiết lưu,  $\text{cm}^2$ ;

$U_u$  - chu vi tiết diện ngang của rãnh tiết lưu.

Mất mát do ma sát trong ổ chặn là:

$$N = 0,33 \cdot 10^{-9} \frac{\mu \cdot n^2}{h_o} \left[ (R_4^4 - R_3^4) + (R_2^4 - R_1^4) \right] \quad (14.69)$$

$n$  - số vòng quay của trục trong một phút

## PHẦN V BÔI TRƠN KHÍ

### Chương 15 GIỚI THIỆU CHUNG VỀ Ổ KHÍ

#### 15.1. VỊ TRÍ VAI TRÒ CỦA BÔI TRƠN KHÍ TRONG KỸ THUẬT

Trong công nghiệp hiện nay, các thiết bị máy móc hiện tại cần phải đảm bảo đơn giản về kết cấu công nghiệp. Với xu hướng không ngừng nâng cao chất lượng gia công và ổn định các đặc tính khác của chúng; Trong một số thiết bị đòi hỏi thực hiện tốc độ vòng quay rất cao từ 10 vạn vòng/phút trở lên, hoặc các yêu cầu phải làm việc trong các điều kiện đặc biệt như: nhiệt độ rất cao hoặc rất thấp; trong điều kiện áp lực thay đổi trong phạm vi rộng; trong yêu cầu giảm đến mức tối thiểu tiêu hao công suất do ma sát hoặc với yêu cầu không được rò rỉ dầu bôi trơn vào sản phẩm như trong lĩnh vực lương thực, thực phẩm v.v. Đa số các yêu cầu này được thỏa mãn nhờ việc ngày càng hoàn thiện các kết cấu cơ bản của ổ trực, thông thường là do việc nghiên cứu cải tiến chất bôi trơn. Các chất bôi trơn có thể ở dạng rắn, lỏng hoặc khí. Mỗi dạng có những ưu nhược điểm riêng và được sử dụng tuỳ theo yêu cầu cụ thể.

Đối với một số trường hợp riêng biệt kể cả các thiết bị làm việc ở nhiệt độ cao người ta dùng chất bôi trơn rắn như: graphit, moliip đen, wolfram v.v. Ở các điều kiện làm việc bình thường, dầu bôi trơn thường được sử dụng rộng rãi hơn cả.

Dùng khí để bôi trơn có những ưu việt độc đáo mà chất rắn hay chất lỏng không thể có được như: độ nhớt nhỏ, sự ổn định các tính chất của khí trong phạm vi thay đổi nhiệt độ và áp lực tương đối rộng, giảm được tiêu hao dầu do chảy ra ngoài, khí dùng để vừa bôi trơn và làm nguội, điều kiện làm việc được cải thiện v.v. Về mặt kết cấu, cho phép các ổ khí có thể làm liền trong thân máy khiến cho kết cấu máy có thể gọn hơn, trong điều kiện sử dụng, bảo dưỡng đơn giản, độ bền cao. Do có các ưu điểm đó mà ổ khí đã đáp ứng được các yêu cầu về: làm việc trong môi trường có nhiệt độ rất cao hoặc rất thấp, môi trường phong xà, áp suất cao, tốc độ vòng quay rất lớn hoặc rất nhỏ, không ma sát, tính ổn định và chính xác cao; trong môi trường hoạt tính ăn mòn hay trong trường hợp đòi hỏi sản phẩm phải sạch.

Cũng chính vì bôi trơn khí đã đáp ứng được các yêu cầu trên nên trong thực tế kỹ thuật luôn đề ra nhiệm vụ sử dụng rộng rãi hơn nữa trong công nghiệp các ổ bôi trơn bằng khí.

Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của khoa học và kỹ thuật, trong những năm gần đây ổ khí được nghiên cứu chế tạo và sử dụng rộng rãi, nhất là trong các lĩnh vực chế tạo máy công cụ, chế tạo máy công nghiệp và máy lạnh, chế tạo thiết bị đo, máy điện và máy turbin đã đạt được nhiều thành tựu rực rỡ.

Tuy nhiên, vấn đề bôi trơn khí cũng có những nhược điểm tồn tại mà sau này chúng ta sẽ nghiên cứu kỹ hơn. Thí dụ: không ổn định bằng các ổ tương tự bôi trơn bằng chất lỏng; các ổ khí thường chịu tải nhỏ v.v điều đó hạn chế phạm vi sử dụng của ổ khí. Hơn nữa việc nghiên cứu tính toán ổ khí cũng đang trong thời kỳ nghiên cứu và thực nghiệm, cũng có những khó khăn nhất định. Khó khăn lớn nhất vẫn là vấn đề khắc phục những dạng mất ổn định do hiện tượng chuyển động vi xoáy của chất khí trong ổ biểu hiện ở xoáy bán vận tốc, xoáy đồng bộ v.v.

Mặc dù việc nghiên cứu sử dụng bôi trơn khí đã được tiến hành từ cách đây nhiều năm với sự tham gia của hàng trăm nhà bác học nổi tiếng thế giới và phạm vi sử dụng ổ khí đã đạt được những thành tựu trong một số lĩnh vực, song trên thực tế việc áp dụng ổ bôi trơn khí hiện nay vẫn chưa vượt ra khỏi phạm vi đơn lẻ. Để đáp ứng yêu cầu phát triển của khoa học kỹ thuật là nghiên cứu chế tạo và sử dụng ổ khí rộng rãi trong công nghiệp hiện đại, hiện nay lĩnh vực sử dụng bôi trơn khí ngày càng được phát triển và hoàn thiện.

## 15.2. CÁC DẠNG CƠ BẢN CỦA Ổ TRỤC BÔI TRƠN BẰNG KHÍ

Tương tự như ổ trực bôi trơn ướt, ổ trực bôi trơn bằng khí được chia thành 2 nhóm cơ bản là ổ khí tĩnh và ổ khí động.

*Ổ khí tĩnh:* để làm việc được đòi hỏi một nguồn khí nén. Còn ổ khí động, trong đó hiệu ứng tự xuất hiện nhờ sự trượt tương đối của các bề mặt cuốn theo chất bôi trơn trong khe hẹp của bề mặt quay của trực. Trong ổ khí tĩnh, áp lực được tạo nên nhờ bơm khí. Cả hai dạng ổ này đều có thể chịu tác dụng của tải trọng dọc trực hay hướng kính hoặc đồng thời cả hai dạng tải trọng tác dụng trong hệ thống rõ to quay.

Trong phạm vi làm việc của tốc độ, ổ trực có thể làm việc như ổ khí tĩnh hay khí động đơn thuần, bắt đầu làm việc ở một chế độ và theo mức độ phát triển sẽ chuyển sang chế độ khác hoặc ở chế độ hỗn hợp; trong đó áp lực được tạo nên đồng thời bởi hiệu ứng khí tĩnh hay khí động. Trong cả hai dạng ổ này dòng chảy của khí thường là chảy tầng, nhưng có thể xuất hiện trạng thái chảy rối.

Đối với ổ bôi trơn bằng khí từ ngoài vào (ổ khí tĩnh) có nhược điểm nổi bật là cần thiết bị bơm khí và kết cấu đường nạp, đường thải do đó phạm vi sử dụng của nó bị hạn chế. Khả năng tải của loại ổ này không phụ thuộc vào tốc độ, trừ một số trường hợp đặc biệt xảy ra khi tốc độ lớn vì khi ấy xuất hiện hiệu ứng khí động. Ổ dạng này có thể sử dụng ngay cả khi tốc độ bằng không. Tải trọng của ổ khí tĩnh không phụ thuộc vào độ nhớt của khí bôi trơn, không phụ thuộc vào áp suất khí bơm vào và môi trường xung

quanh. Tải trọng riêng của ổ khí tinh bị hạn chế bởi áp lực cung cấp và có thể áp lực lớn chừng nào thì tải lớn chừng ấy. Đối với loại ổ này không đòi hỏi chế tạo chính xác cao.

*Ổ khí động:* chỉ chịu tải trọng rất nhỏ vài trăm N/cm<sup>2</sup>, trong một số trường hợp có thể lớn hơn nhưng khi ấy thường kèm theo các lực động học và các lực khác tác dụng lên ổ. Khả năng tải của dạng ổ này phụ thuộc vào tốc độ: khi trị số nén nhỏ nó phụ thuộc tỷ lệ thuận với tốc độ, khi trị số nén lớn nó trở nên không phụ thuộc vào tốc độ. Khả năng tải của ổ khí động còn phụ thuộc vào độ nhớt của khí, khi trị số nén nhỏ; khi trị số nén lớn khả năng tải phụ thuộc vào áp lực bên ngoài, dĩ nhiên nó không phụ thuộc vào áp lực bên ngoài khi trị số nén nhỏ. Độ chính xác lắp ráp và chế độ của dạng ổ này đòi hỏi khá cao và chúng chỉ sử dụng cho gối tựa có bề mặt luôn chuyển động tương đối dưới tác dụng của tải trọng. Ưu điểm nổi bật của nó so với ổ khí tinh là không cần thiết bị phụ và không xuất hiện vi xoáy hay trang bị điều chỉnh áp lực trong buồng công tác.

Tương tự như ổ trực bôi trơn ướt, tuỳ theo dạng chịu tải là dọc trục hay hướng kính mà ổ khí cũng chia ra ổ đỡ và ổ chặn. Ổ khí tinh có các ổ đỡ khí tinh và ổ chặn khí tinh, ổ khí động cũng phân ra ổ đỡ khí động và ổ chặn khí động.

Tuỳ theo kết cấu của mỗi loại ổ mà phương pháp tính khả năng tải của nó cũng khác nhau. Các dạng ổ đỡ và ổ chặn cụ thể cùng với phương pháp tính toán nó, chúng ta sẽ đề cập rõ hơn ở các chương sau. Tuy nhiên lý thuyết điển hình nhất vẫn là lý thuyết tính toán ổ đỡ khí động kín.

Ngoài hai dạng nguyên lý cơ bản trên là ổ khí tinh và ổ khí động, ngày nay người ta còn sử dụng ổ hỗn hợp (ổ lai) tức là ổ khí động có cấp khí tăng áp từ ngoài vào. Thực chất của ổ này là kết hợp của 2 dạng ổ trên, vừa có tăng áp từ bên ngoài, vừa có khe hở hướng kính nhỏ và phần lớn khả năng tải của nó được bảo đảm nhờ các lực khí động. Ưu điểm cơ bản của ổ này có thể đạt được từ ưu điểm của cả hai loại trên như sau:

- Tải trọng của ổ lai có thể được duy trì ngay cả khi tốc độ quay bằng không;
- Cùng với việc tăng tốc độ, khả năng tải cũng tăng;
- Ổ làm việc ổn định trong vùng tốc độ rộng lớn.

Khả năng chịu tải trong khi vận tốc bằng không đảm bảo tuổi thọ của ổ lai rất cao.

Các ổ lai sử dụng thuận tiện và đặc biệt thuận lợi trong các trường hợp có hệ thống cung cấp khí nén, dùng với những mục đích khác nhau. Lưu lượng khí mà hệ thống đạt được không lớn. Những ổ như thế đảm bảo tốc độ cao và các ổ cỡ nhỏ có thể làm việc tới vận tốc lớn hơn 500.000 vòng/phút; ở tốc độ như thế, ổ lai thể hiện các tính ưu việt như: hiệu suất rất cao, giảm ôn và dao động, tỏa nhiệt nhanh.

Tuy nhiên nhược điểm chung của tất cả các dạng ổ khí là khả năng tải nhỏ.

Ưu điểm chung của chúng sẽ được trình bày kỹ hơn ở các chương sau.

## 15.3. PHÂN TÍCH ƯU, NHƯỢC ĐIỂM CỦA Ổ BÔI TRƠN KHÍ

Ổ khí có những ưu điểm đặc biệt mà các loại ổ khác không thể có được, từ phân tích hai đặc điểm khác nhau cơ bản của chất khí và chất lỏng ở trong phạm vi thay đổi nhiệt độ rộng.

- Các chất khí có tính chất hóa học ổn định hơn so với chất lỏng ở trong phạm vi thay đổi nhiệt độ rộng.

Vì vậy, cũng chính do các tính chất này mà ổ khí cũng còn tồn tại một số nhược điểm nhất định.

### 15.3.1. Ưu điểm của ổ bôi trơn khí

#### 15.3.1.1. *Khả năng làm việc trong khoảng nhiệt độ rộng*

Đây là ưu điểm nổi bật nhất của khí dùng để bôi trơn. Ở nhiệt độ cao, không làm biến dạng các chi tiết máy và không phải thay chất bôi trơn mới, kết cấu hệ thống bôi trơn rất đơn giản. Nhiệt độ cao không ảnh hưởng đến sự làm việc của ổ trực trong khoảng thời gian dài.

Thí dụ: Khi sử dụng vật liệu tráng gốm sứ cho kết quả rất tốt đối với động cơ điện ở nhiệt độ  $500^{\circ}\text{C}$  trong một thời gian dài. Ở nhiệt độ thấp cũng không ảnh hưởng tới sự làm việc của ổ bôi trơn khí.

Thí dụ: Turbin làm lạnh cao tốc cỡ nhỏ để hoá lỏng hêli có tốc độ 350.000v/ph làm việc trong khoảng nhiệt độ  $50^{\circ}\text{K} \div 13^{\circ}\text{K}$ .

#### 15.3.1.2 *Ma sát trong ổ rất nhỏ*

Ưu điểm này có được là do chất khí có độ nhớt nhỏ, ma sát nhỏ dẫn đến khả năng làm việc liên tục của máy tăng lên, tuổi thọ của ổ cao. Nhiệt sinh ra trong quá trình làm việc rất nhỏ, do đó việc làm nguội ổ cũng đơn giản. Cũng chính vì vậy, mà độ bền của các chi tiết ở trong điều kiện làm việc được bảo đảm.

Thí dụ: các máy nén khí hêli - nitơ làm việc không có hiện tượng hỏng hóc gì trong 6500 giờ trong khi tuổi bền động cơ đến 25000 giờ.

#### 15.3.1.3. *Khả năng làm việc với tốc độ rất cao*

Do ít bị mòn, ít sinh nhiệt và cho phép thay đổi nhiệt độ trong phạm vi rộng nên ổ khí được sử dụng trong nhiều trường hợp tốc độ rất cao. Thí dụ đầu khoan cao tốc dùng ổ khí do Viện È. Nhim chế tạo đạt tới vận tốc 500.000 v/ph.

#### 15.3.1.4. *Ổ khí ít rung động nhỏ*

Ổ khí có tính chất chống rung tốt nếu chọn vật liệu bọc lót phù hợp. Sự rung động trong quá trình làm việc của ổ khí ít hơn so với ổ lăn do vậy mà trong thiết kế để khắc phục rung động thì ổ khí đơn giản hơn nhiều so với ổ lăn.

#### **15.3.1.5. Kết cấu hệ thống phụ đơn giản**

Các hệ thống bôi trơn trên máy, làm nguội, các bộ điều chỉnh, bộ lọc v.v đơn giản hơn nhiều so với bôi trơn bằng dầu. Bôi trơn khí có ý nghĩa quan trọng trong trường hợp khi cần ngăn ngừa chất bẩn quanh ổ trực của môi trường xung quanh, do các sản phẩm bốc hơi của chất bôi trơn thông thường. Trong nhiều thiết bị với độ kín khít thông thường có thể không đảm bảo, không kinh tế và sự thoát ra ngoài của chất bôi trơn và phát sinh bẩn, do đó dùng ổ bôi trơn khí khiến cho thiết bị bớt công kềnh và đảm bảo kinh tế.

#### **15.3.1.6. Kích thước và trọng lượng máy nhỏ gọn**

Các ổ khí có kích thước nhỏ, các ổ khí lại có thể tạo ra ngay trong thân máy khiến cho kết cấu máy nhỏ gọn, đỡ công kềnh. Hơn nữa như phần trên đã phân tích kết cấu hệ thống phụ đơn giản.

#### **15.3.1.7. Độ tin cậy và hiệu suất của máy cao**

Do các ưu điểm đã nêu ở trên mà ổ khí trong các thiết bị và máy móc sẽ cải thiện được chất lượng gia công khiên cho đạt được độ chính xác khá cao, đảm bảo kinh tế, tăng tuổi thọ v.v, dẫn đến độ tin cậy và hiệu suất của máy cao.

### **15.3.2. Nhược điểm của ổ khí**

Nhược điểm tổng quát, nổi bật của ổ khí như đã biết là *khả năng tải nhỏ*. Nhược điểm này chủ yếu do độ nhót của khí nhỏ so với dầu. Trong ổ khí tĩnh khả năng tải bị hạn chế bởi hệ thống bơm khí, trong ổ khí động là do việc hạn chế khe hở làm việc nhỏ nhất (hay độ lệch tâm cho phép lớn nhất). Tuy nhiên ở các gối đỡ ma sát nhỏ thì nhược điểm này thành ưu điểm căn bản.

Do nhược điểm này mà dẫn đến sự hạn chế việc sử dụng ổ khí trong những trường hợp mà tải trọng của ổ đòi hỏi lớn.

Nhược điểm nữa của ổ khí là có khuynh hướng không ổn định hơn so với các ổ tương tự bôi trơn bằng dầu. Các chế độ không ổn định đặc biệt xảy ra trong các ổ khí tĩnh. Để khắc phục nhược điểm này người ta đã nghiên cứu nguồn gốc mất ổn định và loại trừ chúng bằng các dạng kết cấu mới. Các ổ tăng áp từ ngoài đòi hỏi phải cung cấp nguồn khí nén khô và sạch, điều này dẫn đến đòi hỏi thiết bị lọc khí cần thận và đặc biệt, như vậy các thiết bị lọc khí đơn giản sẽ không thể đảm bảo được.

Các ổ khí động còn có những nhược điểm khác đóng vai trò đặc biệt quan trọng khi sử dụng chúng là độ nhạy với tác dụng của tải trọng động lên chúng. Người ta có thể thay đổi dạng kết cấu ổ và sử dụng hệ thống nén hợp lý để tăng độ cứng tĩnh của nó đến giá trị cho phép, song độ cứng động học của ổ rất khó thay đổi. Do không khí có độ nén cao và khả năng chống rung rất nhỏ nên ổ khí có các đặc tính chống rung không cao. Việc hạn chế các dao động tái sinh trong các thiết bị bôi trơn khí đòi hỏi cần sử dụng hệ thống chống rung tốt, có độ cộng hưởng nhỏ, đã trở ngại nghiêm trọng đối với việc sử dụng ổ khí trong các điều kiện của chế độ khác có thể.

## 15.4. PHẠM VI SỬ DỤNG Ổ TRỤC BÔI TRƠN KHÍ

Các ổ trục bôi trơn bằng khí được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau: trong con quay hồi chuyển, trong máy turbin, trong máy công cụ, thiết bị đo và kiểm tra.

### 15.4.1. Ổ khí dùng con quay hồi chuyển

Tính chất cơ bản của con quay là: khả năng giữ hướng cố định trong không gian của trục quay riêng. Khả năng này sẽ càng chính xác khi tốc độ quay riêng của con quay càng lớn. Người ta đã lợi dụng khả năng này để dùng con quay định hướng trên các con tàu vũ trụ, tên lửa, máy bay và tàu biển v.v... Thực tế tốc độ riêng của con quay lớn trong khi khả năng chịu tải của con quay nhỏ, đồng thời nó đòi hỏi chuyển động ổn định và chính xác. Chính vì vậy mà việc sử dụng ổ khí trong con quay là rất phù hợp. Sự khác nhau giữa các ổ khí thông thường và các ổ khí của con quay hồi chuyển được đặc trưng bởi đặc điểm sau:

- Ổ khí trong con quay không cần đảm bảo khả năng tải như ổ khí thông thường.
- Không có sự liên kết giữa các chi tiết chuyển động bên trong với vỏ bên ngoài.
- Có thể dùng một ổ hướng kính cho con quay nên cho phép tránh được những liên quan đến việc đảm bảo độ đồng tâm.

Những ổ dùng cho con quay cũng có những hạn chế nhất định:

- *Hạn chế về kích thước*: Đối với một số con quay chính xác, tải trọng định mức trên ổ không quá 1kG, toàn bộ thể tích của rôto không quá  $50\text{cm}^3$ . Điều này dẫn đến khe hở tương ứng trong ổ cần giảm xuống và yêu cầu về độ chính xác tăng lên rất nhiều. Vì vậy công nghệ gia công và kiểm tra chi tiết cũng đòi hỏi khắt khe.

- *Điều kiện làm việc*: Khác với ổ bôi trơn khí thông thường, ổ khí dùng cho con quay cần thoả mãn chuyển động riêng (chuyển động quay), dao động và va chạm. Tất cả điều này gây ra sự dịch chuyển không bình thường của các chi tiết không cố định và cố định, đồng thời dễ phá huỷ cân bằng động trong ổ.

Nói chung việc áp dụng ổ khí trong con quay cũng là vấn đề mới mẻ. Về mặt lí thuyết và thực tế cần tiếp tục nghiên cứu để kết cấu của nó làm việc được ngay cả trong những điều kiện đặc biệt. Đồng thời những tiến bộ về kỹ thuật đo lường và khả năng công nghệ sẽ làm giảm nhẹ những khó khăn về mặt chế tạo, hạ giá thành và nâng cao độ chính xác.

### 15.4.2. Sử dụng ổ khí trong các máy công cụ

Ổ khí đã được dùng trong các máy công cụ đảm bảo thích hợp với những đặc tính riêng của máy, đồng thời nâng cao năng suất và độ chính xác gia công rất nhiều. Trong các máy công cụ thì ổ khí được dùng trong các cụm trục chính cao tốc như: ụ đá mài, ụ lấp chi tiết, đầu phay, đầu khoan cao tốc và siêu tốc và trong các thiết bị dẫn hướng của máy.

#### *15.4.2.1. Ố khí dùng trong các thiết bị dẫn hướng cho máy công cụ*

Cùng với những thành tựu trong lĩnh vực điều khiển tự động, vấn đề điều khiển máy có một ý nghĩa rất lớn. Các thiết bị dẫn hướng thông thường bôi trơn hạn chế hoàn toàn có thể dùng cho các máy điều khiển bằng tay, nhưng ma sát lớn, và đặc biệt là ma sát tĩnh gây ra sự đột biến khi trượt, còn sử dụng điều khiển tự động sẽ có khó khăn. Giải quyết tốt nhất vấn đề này là bôi trơn thủy tĩnh và một số giới hạn thiết kế gối tựa ở thủy tĩnh, nhằm đạt được mục đích này. Vấn đề nghiên cứu bôi trơn khí cũng được đặt ra với mục đích như thế và người ta cũng nhận thấy các kết quả của bôi trơn khí dẫn đến chất lượng như bôi trơn thủy tĩnh.

Thí dụ trong kết cấu dẫn hướng dùng cho máy phay ngang. Bàn máy này được giữ trên 2 gối tựa khí tĩnh, chiều dài và chiều rộng của chúng tương ứng bằng 800mm và 38mm. Độ đường tâm của gối tựa được phân bố đều các lỗ đường kính 0,5mm để giảm lưu lượng khí và khắc phục sự nguy hiểm của việc kích thích tự chấn. Để giữ bàn máy ở hướng ngang sử dụng 4 gối tựa khí tĩnh không lớn. Tải trọng ngang ở dạng này gây nên bởi ảnh hưởng của dao động xoắn và nó khá lớn. Hệ thống dẫn động này có thể chịu tải 208 kG với khe hở bôi trơn 20 $\mu$ m. Khi áp lực cung cấp là 4,2 kG/cm<sup>2</sup> thì tải trọng giới hạn đạt đến 508 kG (các tải trọng này là trọng lượng của bàn máy), độ cứng tĩnh định lớn nhất là  $2,34 \times 105$  kG/cm<sup>2</sup>; Lưu lượng khí dưới tải trọng 208 kG là 142l/h; tần số cộng hưởng được tính theo độ cứng tĩnh định là 150 Hz. Khi tiến hành phay, bàn máy được dẫn động từ động cơ điện qua hệ thống đai truyền. Hệ thống dẫn động này đã đảm bảo sự dịch chuyển của bàn máy với các tốc độ thay đổi đến 150mm/ph trong quá trình gia công các vật liệu khác nhau dưới chiều sâu cắt tối 6,5mm. Và các tốc độ quay của dao phay khác nhau. Chất lượng gia công nhận được không kém hơn các máy có gối tựa thủy tĩnh cùng một điều kiện làm việc.

Các thiết bị dẫn hướng khí tĩnh cũng được dùng cho các máy doa 2 toạ độ. Bàn trượt dọc của máy này có trọng lượng đến 776 kG được tựa trên 4 gối tựa khí chiều rộng 76mm và chiều dài 600mm; Bàn trượt ngang có trọng lượng 360 kG cũng lắp trên các gối tựa khí kết cấu như gối tựa của bàn trượt dọc, có các lỗ không có buồng phân bố cách nhau 38mm.

Khi các giá trị áp lực khí cung cấp cho các gối tựa này là 4,2 ; 5,6 ; 7 at thì tương ứng các độ cứng lớn nhất đạt được là 0,45; 0,58 và  $1,53 \cdot 10^6$  kG/cm<sup>2</sup>. Chất lượng gia công chi tiết trên máy này rất khả quan.

Những kết quả nghiên cứu và thực nghiệm trên thế giới hiện nay tiến hành trên việc áp dụng gối tựa khí vào thiết bị dẫn hướng của máy chứng tỏ rằng: Có đủ cơ sở để có thể tính đến kết quả khi nghiên cứu lại máy cũ nhỏ mà trong đó tải trọng đặt đối xứng. Các kết cấu máy theo quan điểm chất lượng gia công chỉ cần được thiết kế theo các yêu cầu sau đây:

Khi dùng các gối tựa khí cho hệ thống dẫn hướng bàn máy:

- Đảm bảo độ cứng thiết kế của máy đủ để giữ độ chính xác hình học của thiết bị dẫn hướng được những tải trọng biến đổi.
- Các thiết kế máy tiện lợi để sử dụng các gối tựa khí; các bề mặt chịu tải cần chế tạo rộng để tăng độ cứng và khả năng tải dẫn đến lưu lượng khí nhỏ nhất.
- Các bề mặt gối tựa tùy khả năng tải cần phải bố trí thế nào để tránh đặt tải không đối xứng, gây ảnh hưởng có hại đến đặc tính ổ.

Việc áp dụng các thiết bị dẫn hướng khí tĩnh trong các máy phay, mà ở đó nó cần chịu tải trọng tĩnh và động, thì trong các máy khoan và khoan doa тоạ độ các gối tựa khí tĩnh có thể được sử dụng để cần thiết giữ bàn máy khi nó dịch chuyển từ vị trí làm việc này đến vị trí làm việc khác. Trong các máy như vậy, khi thực hiện các nguyên công, bàn máy cần phải kẹp chặt. Việc không có ma sát trong các ổ đỡ khí tĩnh của các thiết bị dẫn hướng ở mức độ lớn tạo điều kiện tháo lắp chính xác bàn máy tự động hay bằng tay, đồng thời độ cứng của gối tựa dưới tải trọng động không có ảnh hưởng đến chất lượng gia công cơ.

#### *15.4.2.2. Ổ khí dùng trong các cụm trục chính cao tốc*

Lĩnh vực sử dụng triển vọng nhất cụm trục chính cao tốc trong chế tạo máy công cụ là đầu mài trong đế gia công lỗ đường kính nhỏ. Các ổ khí dùng trong cụm trục chính máy mài điều kiện của chúng khác với điều kiện làm việc của gối tựa của thiết bị dẫn hướng cho máy. Trong quá trình mài, tải trọng nói chung nhỏ và lại không phải là tải trọng có chu kỳ; do đó tác dụng của đá mài lên chi tiết cơ bản có đặc tính ngẫu nhiên. Cả hai nhân tố này chứng tỏ là có thể áp dụng ổ khí. Thực vậy, những năm đầu của thập kỷ 60, ở Mỹ đã chế tạo máy mài trong tốc độ không lớn có ổ khí dùng cho trục chính; Trục chính quay với tốc độ 100.000v/ph từ turbin khí. Các đặc trưng chất lượng của ổ này đảm bảo. Song do họ dùng turbin khí với lưu lượng lớn nên không kinh tế.

Đầu mài hoàn chỉnh là đầu mài có động cơ công suất là 1,12 kW, quay với tốc độ 15.000v/ph, ổ hướng kính có đường kính 127mm, chiều dài ổ 100mm; đường kính bánh mài 63,5mm, rộng 38mm; có những ổ chặn. Độ cứng hướng kính và dọc trục của gối tựa trục chính máy mài này cho trị số 23.400 và 43.200 kG/cm, tần số cộng hưởng tương ứng bằng 200 và 250 Hz, lưu lượng khí được đo dưới áp lực cung cấp bình thường 4,2 at là 70 l/ph. Không khí này được sử dụng để làm lạnh vỏ rôto động cơ. Nhờ việc làm lạnh này và không có cách nhiệt trong ổ, sự quá nhiệt lớn nhất tạo thành ở vỏ là xấp xỉ bằng 8°C.

Khác với sự quá nhiệt trong phương án của đầu mài có ổ bôi trơn dầu.

Độ bóng chi tiết gia công đạt được bằng mài trên máy này cao hơn với các máy có đầu mài dùng ổ bôi trơn ướt. Hơn nữa sự quá nhiệt nhỏ cho phép loại trừ hao phí thời gian điều chỉnh đầu mài cho nên năng suất cao; và vì không có mài mòn thì ở mức độ lớn nên giảm thấp yêu cầu việc chăm sóc, bảo dưỡng máy.

Việc sử dụng ổ bôi trơn khí cho trục mài trong cao tốc cho phép tăng độ cứng và khối lượng trục chính bằng cách tăng đường kính ngõng trục, điều đó cho phép mài với lượng chạy dao lớn, tốc độ vòng của trục đá lớn ( $> 30\text{m/s}$ ) do đó năng suất cao. Chất lượng mài đạt được độ chính xác gia công lỗ đến cấp chính xác 1 và độ nhẵn bóng bề mặt đạt  $\nabla 10 \div \nabla 13$ . Việc không tiếp xúc giữa ngõng trục và ổ được ngăn cách bằng các lớp không khí, thực tế loại bỏ sự mài mòn của chúng.

Viện En.Nhim đã nghiên cứu và đưa vào áp dụng trong công nghiệp ụ mài trong dùng ổ bôi trơn khí được phân biệt bởi đặc tính kỹ thuật của nó và dạng truyền dẫn là động cơ điện cao tần hay turbin khí nén.

Trục trong dùng để mài tinh bằng hạt mài và bằng dụng cụ kim cương, trong điều kiện sản xuất hàng khối. Trục chính khí nén dùng trong sản xuất loạt nhỏ, khi đó cùng một ụ phái mài các lỗ có chất lượng, đường kính và hình dạng bên ngoài khác nhau.

Cả hai loại này, trục chính được tựa trên 2 ổ hướng kính lai cấp khí vi sai, dùng vật liệu bạc lót là graphit và ổ chặn phẳng xốp. Nếu kết cấu cụm trục chính ổ khí có thể đạt tốc độ vòng quay trục chính từ  $150$  đến  $300.10^3\text{v/ph}$ , ổ khí có thể sử dụng cho trục chính nặng hơn: Thí dụ như kết cấu của đầu phay có công suất  $7\text{ kW}$ , vận tốc đồng bộ là  $12000\text{v/ph}$ , dùng ổ bôi trơn khí. Toàn bộ trục chính khoảng  $25\text{ kG}$  được đỡ bởi ổ chặn xốp vòng (đầu phay làm việc ở vị trí thẳng đứng). Việc thử nghiệm đầu phay này ở trường Đại học Bách khoa Gorki đã chỉ ra rằng công suất của hành trình không vượt quá  $0,65\text{kW}$ ;

Trong khi đó đầu phay đồng nhất về khuôn khổ và công suất như trên nhưng đặt trên ổ bôi trơn ướt, công suất chạy tăng không quá  $6\text{kW}$ .

Các Thí dụ trên chứng tỏ rằng : áp dụng ổ khí trong các cụm trục chính đã bảo đảm được năng suất, chất lượng gia công cũng như không ảnh hưởng của nhiệt, mài mòn ít và hạ thấp dao động. Nhưng do trở ngại cơ bản của việc áp dụng ổ khí là tải trọng thấp, và khả năng tải nhỏ do vậy lĩnh vực sử dụng cụm trục chính dùng ổ khí là đầu mài, máy doa tọa độ và các máy phay, máy khoan công suất nhỏ.

### 15.4.3. Sử dụng ổ khí trong dụng cụ đo

#### 15.4.3.1. Thiết bị khí nén dùng để đo độ tròn

Dụng cụ đo này được chế tạo ở hãng "ORT - LBN". Trong dụng cụ này sử dụng ổ khí, dùng để đo tính năng bôi trơn của ổ hướng kính và ổ chặn bôi trơn khí, các chi tiết hình trụ. Độ chính xác cao của các ổ của dụng cụ đo này ( $0,1\mu\text{m}$ ) dẫn đến có thể đo độ chính xác quay trong ổ khí là  $0,25\mu\text{m}$ . Các dụng cụ này rất tin cậy khi làm việc và hoàn toàn không bị mài mòn trong ổ khí bảo đảm sự làm việc trực tiếp với độ chính xác cao trong khoảng chu kỳ dài.

#### **15.4.3.2. Dụng cụ đo kiểu quay**

Khi kiểm tra chất lượng sản phẩm, do độ đồng tâm, đồng trục, độ không tròn của chi tiết gia công còn có bàn quay rất chính xác. Hãng "Ro le - Pois" đã thiết kế và chế tạo loại bàn quay này, đường kính của bàn 152,4 cm để giữ các chi tiết cần đo có dạng khác nhau trọng lượng tới 226,8 kG, nó cần có ma sát trong ổ nhỏ nhất và được đặc trưng bởi độ chính xác dịch chuyển dọc trục và hướng kính không quá 12,7 µm tại điểm bất kỳ nằm trên chu vi bàn. Khi vào ổ được nén dưới áp lực 4,22 kG/cm<sup>2</sup>. Ổ hướng kính dùng cho thiết bị này là ổ khí có đường kính 30,34 cm với độ hở hướng kính 25,4 µm; các lỗ cung cấp khí phân đều trên khoảng cách đều nhau với đường kính lỗ 0,51 mm và chiều dài 2,38 mm. Các ổ chặn bôi trơn khí dùng cho thiết bị có chiều rộng 76,2 mm và đường kính trung bình 121,92 cm ; chỉ sử dụng ổ chặn 1 phía để giữ bàn quay và chi tiết được đo.

Độ chính xác của phép đo khi dùng thiết bị này rất cao, sai số không vượt quá 5 µm.

Hiện nay, ở Mỹ ít nhất cũng có một hãng đã bán những bộ ổ khí dùng với mục đích để chế tạo các loại dụng cụ trên. Theo các tài liệu, độ chính xác làm việc của các ổ này dưới áp lực bơm 11,9 kG/cm<sup>2</sup> có thể là 0,025 µm. Nhưng không tìm thấy chỉ tiêu độ tin cậy của chúng trong các tài liệu này.

#### **15.4.3.3. Đồ gá đo bước của vít**

Cùng với các phương pháp cơ bản đo chính xác các chi tiết của các cơ cấu khác nhau được sử dụng từ lâu, hiện nay tùy theo khả năng mà phần lớn công việc này được thực hiện tự động hoàn toàn và không phụ thuộc vào người điều khiển. Thí dụ : điển hình về điều đó là việc xác định tự động các sai số bước của vít dẫn trên máy. Nếu thực hiện bằng tay thì công việc này rất khó khăn người ta đã chế tạo thiết bị đo tự động. Thiết bị đo tự động này có 1 dầm dẫn hướng dài 5,48 m trên đó có đồ gá đặt vít dẫn. Bàn trượt cùng thiết bị đo dịch chuyển dọc dầm, việc điều khiển độ chuyển dịch của nó được thực hiện từ xa. Không cần mô tả kỹ lưỡng ta cũng có thể đoán được rằng với thiết bị như vậy thì để có tiêu chuẩn đo, mạng nhiều đường sẽ được kẹp vào bàn trượt và sử dụng hệ thống các giải sóng để đo khoảng cách tới bàn trượt, các số đọc được sẽ là kích thước các đỉnh vòng ren của vít dẫn.

Để đảm bảo đạt độ chính xác đo yêu cầu (2,5 µm) và đảm bảo của bàn trượt dọc dầm cần tiến hành tuần tự với những sai lệch nhỏ nhất. Người ta đã thử nghiệm 2 hệ thống ổ cho thiết bị này đó là ổ lăn và ổ khí. Nhưng kết quả thấy rằng: do khuyết tật cục bộ của bề mặt dầm, độ lệch tâm và những sai sót vốn có của ổ bi mà chất lượng đo kém hơn so với hệ thống dùng ổ khí. Nên nó dẫn đến dùng gối tựa khí cho thiết bị này tốt hơn. Hơn nữa hệ thống này đòi hỏi phải không có ma sát , không có mài mòn, dầm dẫn hướng có một ý nghĩa đặc biệt quan trọng.

#### **15.4.3.4. Lực kế truyền động**

Các ổ bôi trơn khí được dùng trong các ổ trục của các lực kế khác nhau. Các lực kế dùng để xác định tổn hao công suất trong truyền động và làm việc theo nguyên tắc đo

mô men phản lực tác dụng lên vỏ động cơ hay bộ phát điện hấp thụ. Trị số mô men này được kể đến trên các tốc độ trực tương ứng cho trị số công suất thiết bị và các hệ số tác dụng cần phải được kể tới.

Để đo mô men phản lực với độ chính xác yêu cầu, trong trường hợp hệ thống thiết bị công suất lớn, cần nhờ các ổ kín chính xác, hay ổ thuỷ tĩnh bôi trơn ướt. Đối với các lực kể 0,37 kGm và ngay cả 3,7kGm hiện nay dùng các ổ hướng kính và ổ chặn bôi trơn khí để có tác dụng của ma sát là nhỏ nhất và tránh sự phức tạp của kết cấu có liên quan tới việc sử dụng ổ thuỷ tĩnh bôi trơn ướt

#### **15.4.3.5. Các thiết bị để thử các ổ bi cao tốc**

Một trong những áp dụng đầu tiên của ổ khí tăng áp từ ngoài là việc sử dụng thiết bị cao tốc để thử các ổ bi. Để đo mô men ma sát và nghiên cứu dao động của ổ bi dưới tốc độ 60.000 v/ph cần tạo 2 dạng của thiết bị này, những kết cấu của máy này nói chung tương tự như một trong những kết cấu khảo sát sau đây

Khi nói về việc áp dụng ổ khí trong các cơ cấu này tất nhiên phải chú ý đến ổ khí động. Trong trường hợp cần phải thay đổi tốc độ quay của trực trong phạm vi 30.000 đến 60.000 v/ph cũng như tiến hành hâm và mờ máy quá thời gian trung gian nhỏ, cả 2 nguyên nhân đã đưa đến khả năng sử dụng ổ khí động với chất bôi trơn là không khí.

Các máy đã được thiết kế để thử các ổ bi có đường kính trong đến 15 mm, chịu tác dụng của tải trọng hướng kính tới 11,3 kG khi thay đổi tốc độ 60.000 v/ph làm việc trên ổ chặn và ổ hướng kính bôi trơn khí, nó làm việc trong 15000 giờ không bị mài mòn rõ rệt, ma sát trong ổ khí nhỏ có thể bỏ qua .

#### **15.4.3.6. Thiết bị để thử dao động**

Cuối cùng, lĩnh vực sử dụng ổ khí trong dụng cụ đo là ổ khí được dùng trong máy thử nghiệm dao động. Trong các bộ cảm ứng biến dạng của máy, có trực thẳng đứng tựa trên các ổ khí tĩnh. Những dao động của ổ khí giữ đồ gá và cảm biến chỉ ở hướng vuông góc với trực.

Tất cả các dụng cụ được nói trong lĩnh vực thiết bị đo dùng ổ khí này là các thí dụ đặc trưng cho việc áp dụng ổ khí trong lĩnh vực kỹ thuật này. Cuối cùng việc lựa chọn liệt kê phạm vi ứng dụng ở đây không phải là kỹ càng và toàn diện. Do đó, không cưỡng điệu có thể nói rằng: Rất ít thấy lĩnh vực chế tạo dụng cụ nào mà ổ khí không quyết định những đặc tính chất lượng cao của các dụng cụ

#### **15.4.4. Sử dụng ổ khí trong máy turbin**

Ổ khí được sử dụng trong các máy turbin khí cho phép đạt được hiệu quả cao nhờ việc tạo ra các ổ trực trong thân máy và giảm lượng dầu do chảy ra ngoài. Kinh nghiệm thiết kế và sử dụng máy turbin chỉ ra rằng: tuỳ thuộc vào vận tốc quay của rô to là cơ cấu chấp hành, tuỳ thuộc vào tải trọng tác dụng lên ổ và tuỳ thuộc vào tải trọng của máy

turbin mà cần phải sử dụng các kiêu kết cấu ổ bôi trơn khí khác nhau, phương pháp tính chúng cũng khác nhau. Hiện nay, đã khảo sát sử dụng các ổ khí hướng kính và ổ chặn hướng dọc trực của các máy turbin có công suất hữu hạn, tốc độ của rôto không vượt quá 3000 rad/s, tải trọng tác dụng lên ổ khoảng vài nghìn Niuton. Trong thực tế gần đây việc sử dụng ổ khí trong máy turbin đã đạt được những thành tựu lớn.

Như đã thấy rõ ở phần trước, ưu điểm cơ bản của ổ khí bôi trơn là giữ được độ bóng không phụ thuộc vào tính chất nhiệt của dầu. Do đó, độ tin cậy của độ bền cao, điều đó cho phép chế tạo các máy turbin có điều kiện sử dụng phức tạp. Nhờ kết cấu đơn giản mà việc bảo dưỡng máy turbin dễ dàng hơn, độ tin cậy nâng cao hơn và thời hạn giữa 2 lần sửa chữa được tăng lên. Thí dụ gần 60 máy turbin bôi trơn bằng khí nén đang hoạt động tại ngoại ô thành phố Moskva với việc tạo ra các vật liệu mới đã làm việc an toàn đến 1 6000 giờ. Các máy nén khí nitơ-hêli làm việc không hỏng đến 6500 giờ khi tuổi bền động cơ 25000 giờ.

### 15.5. KẾT LUẬN

Tuy nhiên ứng dụng của ổ khí vẫn chỉ đang ở trong giai đoạn thực nghiệm, song đã được tiến hành trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật khác nhau. Với đặc điểm của bôi trơn khí mà ổ khí có những đặc tính quý báu, các dạng ổ khác không có được. Với sự phát triển của khoa học kỹ thuật, tương lai ổ khí sẽ được sử dụng rộng rãi trong thực tế ở nhiều lĩnh vực khác nhau của cuộc sống.

## Chương 16

# VẬT LIỆU DÙNG CHẾ TẠO Ố KHÍ

### 16.1. CÁC VẬT LIỆU DÙNG ĐỂ CHẾ TẠO Ố KHÍ

Để chế tạo ống khí cần sử dụng nhiều vật liệu, tính thích hợp của chúng trong mỗi trường hợp cụ thể cần được xác định. Ý nghĩa các tính chất của vật liệu được xác định phụ thuộc vào dạng ống khí. Các vật liệu chế tạo ống có thể được chia thành 3 nhóm sau: kim loại, gốm sứ và sản phẩm của luyện kim bột; các vật liệu dẻo.

#### 16.1.1. Kim loại

Chọn kim loại dùng làm vật liệu cho ống sao cho chúng bền vững, rẻ và có tính chất chịu nhiệt tốt. Vả lại, trong nhiều trường hợp cần có khả năng gia công tốt nhất, nghĩa là chúng được gia công dễ dàng, hoặc khi gia công chúng thường là mài mòn và ma sát cũng như sự ổn định hóa học kém.

##### 16.1.1.1. Các loại kim loại đen

Các kim loại này thường được sử dụng trong kỹ thuật, chúng thích hợp để chế tạo trực. Do có độ bền cao và chúng có tính rèn hàn như với kích thước bất kỳ. Có nhiều biến thể của kim loại đen với nhiều tính chất khác nhau. Diễn hình là các vật liệu sau:

###### a) Thép ít các bon

Thép ít các bon rõ ràng là thích hợp để làm trực, nhưng phối hợp thép này với các kim loại khác sẽ có những đặc tính ma sát và mài mòn quan trọng.

Thép không mạ bề mặt khí chỉ dùng nó trong môi trường không gây ăn mòn. Để tăng tính chất chống mòn và nâng cao độ bền mòn có thể tiến hành phốt phát hoá, mạ bạc thấm các bon và thấm nitơ bê mặt. Cũng có thể thực hiện mạ nó bằng các vật liệu cứng hơn như: Crôm, wolfram và molipđen. Để khử ứng suất dư cần tiến hành ủ dưới nhiệt độ 600 đến 700°C trong khoảng 1 giờ.

###### b) Thép hợp kim thấp

Sử dụng thép này tính chống mòn của chi tiết tăng lên. Các bề mặt của các chi tiết trừ một số loại thép hợp kim thấp (niken, crôm v.v) chịu gia công nhiệt hoá tốt cũng như thấm nitơ, các bon, do đó sức bền tăng nhiều. Các vật liệu này thích hợp để chế tạo trực ống khí. Cần khử ứng suất dư bên trong dưới nhiệt độ 670 đến 780°C trong khoảng 2 đến 3 giờ.

c) *Các thép không gỉ*

Thép này thường sử dụng ở nơi có nhiều nguy hiểm của hiện tượng ăn mòn. Thép không gỉ austenít có tính chất chống mòn kém. Các bề mặt ổ bằng thép này cần thấm crôm hay mạ hợp kim cần khử ứng suất dư bên trong dưới nhiệt độ 800 đến 850°C trong khoảng thời gian 2 giờ.

Các thép chống gỉ mactenxít chịu tải và có tính chất chống mòn tốt hơn, đặc biệt kết hợp với ôxít nhôm.

d) *Thép dụng cụ cao tốc*

Thép này có độ cứng cao và tính chất chống mòn không tồi, ngay cả khi ở nhiệt độ cao. Để nâng cao độ bền bề mặt có thể thấm nitơ cho thép này.

e) *Gang*

Gang xám có tính chất chống mòn rất tốt do hàm lượng grafít cao. Về phương diện này tốt nhất là gang peclít hàm lượng 4% các bon cùng tinh các bon peclít được phân bổ tốt cũng như sức bền cao hơn. Nhược điểm là cấu trúc không ổn định dưới dao động nhiệt có chu kỳ. Gang peclít chất lượng cao có cấu trúc không ổn định thấp hơn. Để khử ứng suất dư cần giữ ít nhiệt độ 430 đến 600°C từ 1/2 ÷ 5 giờ.

Gang graphít cầu có độ bền cao hơn và độ rèn thấp hơn gang xám. Nó có các tính chất chống mòn tốt nhưng nói chung là thấp hơn một chút so với gang xám do graphít ở dạng cầu mà không ở dạng tấm.

#### **16.1.1.2. Kim loại màu**

Nhóm này thường ở trong tất cả các vật liệu, thường dùng trong ổ bôi trơn bằng dầu. Khi sử dụng vật liệu này ở ổ khí thường xuất hiện các vấn đề liên quan đến sự khác nhau của các hệ số giãn nở nhiệt.

a) *Đồng thanh*

Có lẽ đồng thanh có độ bền về phương diện bôi trơn và được sử dụng rộng rãi trong ổ bôi trơn ướt. Tốt hơn cả là đồng thanh chì, đồng thanh nhôm và thiếc kẽm hơn một ít. Có thể dùng vật liệu này trong ổ khí chịu tải trọng nhỏ; khi tải trọng lớn và trong môi trường trung tính chất lượng của chúng tăng dột biến.

Hệ số giãn nở nhiệt cao hơn 5% so với thép.

Đồng thanh đặc biệt được chế tạo bằng phương pháp ép nóng và giữ graphít có tính chất chống mòn tốt, có thể dùng nó để làm việc trong môi trường khí tro. Nó có độ bền thấp một chút so với đồng thanh thông thường, nhưng đủ để sử dụng trong những ổ khí bất kỳ.

#### b) Bạc bít

Các bácbít được dùng rộng rãi trong các ổ bôi trơn bằng dầu, chúng chống kẹt tốt, Bạc bít mềm vì vậy gia công chúng khó có độ chính xác cần thiết cho ổ khí. Mặc dù gia công bằng dụng cụ kim cương có thể đảm bảo độ chính xác chấp nhận được. Bácbít ít chảy vì vậy không thể áp dụng chúng ở chỗ mà năng lượng động học lớn của rôto cần phải khuếch tán nhờ ma sát trong ổ.

#### c) Mônen

Mônen có độ bền hoá cao vì vậy có thể dùng trong khí gây ăn mòn. Độ giãn nở của Mônen hầu như giống thép. Để khử ứng suất dư cần phải giữ ở nhiệt độ từ 270 đến 310°C trong thời gian từ 1 đến 3 giờ.

#### d) Hợp kim Stenlít

Stenlít chống ăn mòn và kẹt tốt. Hợp kim này có thể có nhiều loại khác nhau, chúng được dùng tốt nhất để hàn đắp, phun sương mù và có thể cạnh tranh với nhiều vật liệu trừ grafít và đồng thanh đặc biệt.

#### e) Vật liệu chịu lửa

Một số trong những vật liệu này được dùng dưới dạng mạ bề mặt bằng phương pháp phun sương hay mạ điện. Wolfram và molipđen sương mù làm tăng những đặc tính ma sát và chịu mài mòn của các thép dẻo.

#### g) Nhôm

Nhôm nói chung chống kẹt kém. Các hợp kim nhôm hàm lượng 7% thiếc, về phương diện này cao hơn một chút, độ bền của nhôm tăng nhiều. Nhôm được sử dụng trong các ổ khí khi mà có ăn mòn nên không thể dùng kim loại khác và đồng thanh được.

### 16.1.2. Xêramíc và sản phẩm của luyện kim bột

Bản chất phi kim và độ cứng cao của xêramíc đảm bảo tốt hơn kim loại chỗ chống dính. Xêramíc thường giòn, có hệ số giãn nở khác với hệ số giãn nở của thép và dẫn nhiệt tối.

Trong nhiều ổ lớn làm việc ở nhiệt độ cao, cần dùng phương pháp kết cấu riêng. Thí dụ: bạc xêramíc được ép trong khuôn kim loại. Xêramíc khó gia công hơn kim loại, nhưng có công nghệ gia công thích hợp khi sản xuất xêramíc.

#### 16.1.2.1. Ôxít nhôm

Ôxít nhôm là vật liệu rất cứng, có độ bền và độ dẫn nhiệt cao và tính chống mòn tốt, có hệ số giãn nở thấp hơn so với thép; chống dính tốt hơn nhưng hệ số ma sát cao. Vật liệu này chỉ dùng cùng với vật liệu cứng, thí dụ như các bít titan.

#### 16.1.2.2. Các bít wolfram và các bít titan

Các xêramíc này thường được trộn với cônban có đủ độ bền nhiệt và độ cứng. Phun sương các bít wolfram dưới nhiệt độ cao có thể thực hiện trên nhiều vật liệu, do đó các vật liệu này chống dính và chống xước tốt, nhưng không tự bôi trơn được.

### **16.1.2.3. Các bon và graphít**

Các vật liệu này có tính chất chống mòn bề mặt trong khí ẩm. Trong khí khô tính chất này bị mất nhưng có thể phục hồi do chất phụ molípden. Hệ số giãn nở của vật liệu này thấp hơn khoảng 3 lần so với thép. Vì vậy, khi dùng chúng trong điều kiện nhiệt độ cao cần ghép với bạc tốt trong vỏ kim loại. Khi nhiệt độ đến  $400^{\circ}\text{C}$  ghép các bạc lót vào vỏ thép không gây méo lệch, hoặc cácbon có giới hạn bền cao khi nén và mô đun đàn hồi thấp. Độ dẫn nhiệt của các bon nhỏ, còn của graphít cao.

Có nhiều loại các bon hay graphít, tất cả chúng đều có tính chất chống mòn tốt kết hợp với nhiều kim loại khác.

#### *a) Các bon tinh khiết và graphít*

Ngoài sức bền dính tốt, những ưu điểm cơ bản của các chất này là tính trơ hoá học và độ ổn định nhiệt. Các bon bền và cứng hơn graphít và có thể làm xước trực tiếp. Trong quá trình làm việc liên tục, do đó cường độ mòn tăng lên. Các graphít không có nhiều ưu điểm nhưng có độ dẫn nhiệt cao. Có những vật liệu trung gian là các bon và graphít cá biệt phụ thuộc vào dạng nguyên liệu và dạng gia công nhiệt.

Các bon và graphít tinh khiết được thấm khí đến mức đủ để có thể sử dụng chúng trong ống tự bôi trơn, khả năng tải có thể giảm xuống. Lúc bắt đầu làm việc các vật liệu này thường chịu mài mòn mà trước đó, trong quá trình gia công bề mặt không có đủ độ bền mòn. Khi tải trọng nhỏ trên các ống khí, sự mài mòn này ban đầu có thể nhỏ.

#### *b) Graphít có thấm kim loại*

Thấm kim loại vào graphít làm tăng độ bền và độ dẫn nhiệt của nó và giảm độ lọt khí và giòn. Để đạt mục đích này, người ta dùng đồng, đồng thanh, bácbít và bạc. Thêm kim loại làm giảm sự mài mòn, đặc biệt thấm đồng thanh thiếc.

Tính chất chống mòn của graphít có thấm kim loại trong khí khô mặc dù không cao như trong khí ẩm nhưng cao hơn so với graphít tinh khiết. Thấm kim loại làm giảm độ bền hoá học của graphít, nhưng nó cao hơn tất cả kim loại nguyên chất.

#### *c) Các graphít ngâm dầu*

Thấm dầu làm tăng độ bền là chủ yếu và giảm độ thấm khí của graphít. Nó không làm tăng tính chất chống mòn gây nên việc hạn chế nhiệt độ cho phép xác định bằng độ bền nhiệt của nhựa.

#### *d) Hỗn hợp $\text{MOS}_2$ và cácbon*

Chất phụ gia  $\text{MOS}_2$  và cácbon làm giảm sự mài mòn và hệ số ma sát trong môi trường khí đến mức bình thường ngay cả mức thấp hơn. Cácbon chứa 15%  $\text{MOS}_2$  phân bố đều, làm việc rất tốt trong heli khô. Khi bề mặt của chi tiết tương ứng của ống không bị làm xước bởi các bon cứng, nếu nó được chế tạo từ các bít volphram có cường độ mòn là

nhỏ. Thí dụ các bề mặt tiếp xúc dưới tải trọng  $1,4\text{kG/cm}^2$  và tốc độ trượt  $4,6\text{m/s}$  trong 250 giờ chỉ mài mòn từ 1 đến  $2 \cdot 10^{-3}\text{ cm}$ . Khi tăng tốc độ trượt lên hàng chục lần, cường độ mài mòn chỉ tăng không đáng kể, thêm vào đó mài mòn về cơ bản chỉ xảy ra trong 1 vài giờ làm việc ban đầu. Trong khoảng thời gian ấy, lớp bề mặt  $\text{MOS}_2$  được hình thành vật liệu này làm giảm độ lọt khí.

### 16.1.3. Vật liệu dẻo

Các vật liệu dẻo nguyên chất khó gia công chính xác, cũng khó đảm bảo ổn định kích thước.

Nhưng chất dẻo chứa flo thường có tính chất chống mòn tốt, có thể có dạng thích hợp để dùng ở các ổ. Dựa vào đó người ta sử dụng để ghép vào các vật liệu xốp. Khi đó tính ổn định của kim loại cơ sở sẽ kết hợp với tính chống mòn tốt của chất dẻo chứa flo. Ở đây ta xét đến tephlon có cốt: Là các vật liệu dẻo có độ bền và độ dẫn nhiệt tăng khi đó vẫn giữ được tính chất chống mòn tốt. Các vật liệu này có thể chịu gia công cơ, nhưng khó đảm bảo ổn định kích thước còn hệ số giãn nở cũng cao như tephlon (chất dẻo chứa Flo).

### 16.1.4. Phối hợp các vật liệu

Trong các phần trên chúng ta đã khảo sát tính chất của các vật liệu khác nhau và phẩm chất của chúng trong điều kiện ma sát. Nhưng nó phụ thuộc nhiều vào vật liệu của chi tiết ghép. Vì vậy, cần phân tích phẩm chất của các vật liệu. Thí dụ: Bác bít có tính chống dính tốt nhưng chỉ khi nó làm việc trong một cặp với thép; còn bộ đôi ma sát bác bít - bác bít nói chung làm việc rất ổn định.

#### 16.1.4.1. Crôm cứng mạ mòn - S - mòn

Liên kết này có độ bền mòn cao, đó là nguyên nhân cơ bản để sử dụng nó. Chống dính tốt trong môi trường ăn mòn của các chất khí ít nhất cũng là dưới tải trọng nhỏ và nhiệt độ thấp. Trong khí tro liên kết này là không tốt.

#### 16.1.4.2. Xtellit - Xtellit

Liên kết này chống ăn mòn và chống dính tốt, có thể dùng để tạo bề mặt cứng trên nhiều kim loại, nhưng không thích hợp khi làm việc trong môi trường khí tro.

#### 16.1.4.3. Crôm cứng - gang

Có đặc tính ma sát và mòn rất tốt trong khí ôxy hoá như không khí hay  $\text{CO}_2$ . Sự ăn mòn có thể gây những khó khăn do sự ngưng tụ, không phù hợp để làm việc trong môi trường khí tro.

#### 16.1.4.4. Thép thám C - Gang

Những vật liệu không đắt này liên hợp với nhau có các đặc tính ma sát và mài mòn tốt. Nhờ thổi sạch chi tiết thám C bằng khí với sự đánh bóng tiếp theo bằng xoa  $\text{MOS}_2$ .

bảo đảm chống dính tốt và chi tiết có thể làm việc trong môi trường khí tro một thời gian dài.

#### **16.1.4.5. Thép thấm nitơ - thép thấm nitơ**

Thực ra sự liên kết này chỉ có sức bền dính tốt. Sau khi thổi khí và gia công xoa MOS<sub>2</sub> nó làm việc thoả mãn trong chế độ dùng máy trong môi trường khí tro.

#### **16.1.4.6. Các bề mặt cứng - đồng thanh**

Có thể thấy rằng: Trong một cặp đồng thanh làm việc tốt với xtenlit, thép thấm nitơ, thép thấm cacbon, molipden, các bít titan và nhiều vật liệu khác. Sự thích ứng của hệ số giãn nở là có thể chấp nhận được.

#### **16.1.4.7. Xtenlit - Đồng thanh**

Liên hợp này có lẽ tốt nhất trong số các vật liệu và có thể dùng làm việc trong môi trường khí tro. Các vấn đề xuất hiện có liên quan đến sự giãn nở nhiệt.

#### **16.1.4.8. Thép không gỉ Maxentit - ôxít nhôm**

Liên hợp này chống ăn mòn tốt và chống dính tốt. Các vấn đề xuất hiện có liên quan đến sự giãn nở nhiệt. Sử dụng thích hợp nhất cho các chi tiết không lớn.

#### **16.1.4.9. Ôxít nhôm - ôxít nhôm**

Liên hợp này chống ăn mòn có những đặc tính ma sát và mài mòn rất tốt trong không khí. Sử dụng tốt trong các con quay hồi chuyển. Phù hợp với các chi tiết không lớn và không đảm bảo tốt khi làm việc ở môi trường heli nguyên chất.

#### **16.1.4.9. Các bít titan - ôxít nhôm**

Liên hợp này chống ăn mòn có những đặc tính ma sát và mài mòn rất tốt trong không khí. Có sức bền dính tốt trong môi trường khí tro. Chỉ sử dụng cho chi tiết nhỏ.

#### **16.1.4.10. Thép ít cacbon - Graphit**

Liên hợp này đảm bảo sức bền dính cực tốt và ma sát nhỏ trong không khí ẩm. Khi dùng graphit nguyên chất cần tính đến việc hạ khả năng tải do rò khí. Các vấn đề liên quan đến hệ số giãn nở khác nhau. Có thể giải quyết bằng lắp bạc graphit vào vỏ thép. Đối với ổ chặn, graphit có thể được gắn trên đệm thép. Graphit sử dụng nhiều với phun sương kim loại, chúng có độ bền cao hơn.

#### **16.1.4.11. Các bề mặt cứng - Cacbon hay graphit**

Khi tải trọng lớn và nhiều lần khởi động hoặc khi làm việc liên hợp với cacbon cần sử dụng các bề mặt cứng phù hợp, không bị xước: Nhôm mục đích ấy xtenlit, crôm cứng, thép thấm nitơ, các bít wolfram là thích hợp. Toàn bộ liên kết này có đặc tính rất tốt về liên kết và mài mòn trong khí khô.

#### **16.1.4.12. Các bít wolfram - cacbon CYI32**

Liên hợp này có các tính chất ma sát rất tốt trong khí khô tro, ở đó cacbon và graphit không hợp được. Điều đó chứng tỏ tác dụng dầu bôi trơn chịu được trong cacbon MOS<sub>2</sub>. Đã tìm được các bít wolfram chống xước tốt nhất bằng cacbon. Nhưng trong nhiều trường hợp các kết quả tốt cho thép thấm nitơ, xtenlit thấm nitơ, crôm cứng hoặc ngay cả thép ít cacbon.

Trên các tấm của ổ chặn hay các miếng lót cán dán cacbon CYI32. Nhưng khi đó cần chú ý biến dạng gây ra do đốt nóng.

Sự mài mòn CYI32 không đáng kể trong thời gian làm việc, có thể còn giảm bằng cách chạy rà và rửa ổ trước khi lắp ráp cuối cùng.

#### **16.1.4.13. Crôm cứng - bácbít**

Liên hợp này được sử dụng trong các ổ khí tinh, trong đó gia công bácbít không phải là vấn đề do những yêu cầu nghiêm ngặt về độ chính xác giảm xuống.

Những liên hợp vật liệu trên đây là những liên hợp vật liệu tốt nhất trong hàng loạt áp dụng và đã dùng từ lâu trong các ổ khí.

### **16.1.5. Lựa chọn vật liệu liên hợp**

Trên cơ sở thí nghiệm người ta nhận thấy rằng:

- Nếu đường kính trực không lớn hơn 5 cm thì có thể dùng ổ hướng kính kim loại. Tùy theo độ tăng đường kính, tải trọng riêng hay mô men quán tính của trực mà độ bền ổ kim loại và số lần mở và hầm chung chịu giảm xuống nhanh ngay cả khi có ma sát bề mặt. Đối với mài mòn thì tất cả các kết quả được thực hiện trên một ổ duy nhất, trong đó tải trọng đặt vào ổ tựa trong trực quay. Tuy nhiên thực nghiệm cũng rút ra rằng: Trên thực tế có thể xảy ra sự phân tán đáng kể số lần chịu mở và hầm máy. Trong các máy lớn để tăng bền cần phải bơm khí. Nhưng các ổ cỡ lớn được ốp chặt bằng cacbon CY132 làm việc hoàn toàn tin cậy khi mở và hầm máy.

- Ở kết cấu ổ dọc trực khi mở và hầm máy chỉ quá tải với trọng lượng hình thành không lớn, cũng gây nghiêng đường tâm của trực và có thể bằng lực điện từ dọc trực của động cơ. Trong trường hợp này (đường trực của trực thẳng đứng) thì ổ chặn lúc mở và hầm máy cần mang tải để trọng lượng của các chi tiết máy quay thuận lợi.

- Đối với các ổ làm việc trong khí tro tinh khiết xuất hiện các vấn đề riêng.

Trong trường hợp này các màng ôxit trên bề mặt kim loại có thể bị phá huỷ do ma sát không được khôi phục và vì vậy tính chất bề mặt bị thay đổi thường xảy ra phia kém hơn. Do đó khi tiếp xúc của các bề mặt kim loại thì ma sát rất lớn và có thể bị dính. Trong những môi trường như vậy luôn luôn dùng phù hợp với việc mạ cacbon CY132 hay các vật liệu tự bôi trơn khác.

### **16.1.6. Kết luận**

Trước đây các ổ khí được dùng để sử dụng trên cơ sở khí động học. Do ổ khí sử dụng rộng rãi hơn cả nên việc chọn đúng vật liệu có ý nghĩa đặc biệt.

Trong nhiều trường hợp, việc áp dụng ổ khí không thể hạn chế được sự tiếp xúc giữa các bề mặt trượt trong toàn bộ thời gian làm việc. Sự tiếp xúc ấy luôn xảy ra khi mở và hãm máy trong ổ khí, nhưng lúc ấy thường xuất hiện khó khăn khi gia công và khắc phục giãn nở nhiệt. Tuy nhiên, trong tương lai khi chọn vật liệu làm ổ khí sẽ được chú ý hơn đến những đặc tính ma sát và mài mòn.

Các vật liệu trên cơ sở chất dẻo có chứa flo và cacbon hay graphit là hứa hẹn nhất về phương diện này, thêm vào đó là những ưu điểm về độ bền nhiệt lớn và tính dễ bắt bụi nhỏ.

Phương pháp khác là: có thể dùng chất bôi trơn cứng như grapit, molip den và tephlon. Khi nhiệt độ hạ xuống, tức thời khi vật liệu tổng hợp tốt có thể làm tăng ổn định.

Sử dụng tốt nhất các liên hợp vật liệu cho phép thiết kế xấp xỉ giới hạn cho phép của các ổ như: Phạm vi tốc độ rộng hơn, khả năng tải lớn hơn hay hạ thấp yêu cầu khắt khe về độ chính xác.

Liên hợp của mẫu các bít wolfram - cacbon CY132 nhờ sự làm lạnh phù hợp có thể được dùng làm ổ trượt bôi trơn thiếc hay thay thế cho một số ổ khí hoàn thiện. Nếu ổ này thiết kế như ổ khí thì nó sẽ cho phép quá tải nhiều hay hạ thấp tốc độ xuống khá nhiều, còn độ tin cậy của nó bằng độ tin cậy của ổ có bôi trơn dầu. Trong đó ổ cần có yêu cầu độ tin cậy là hàng đầu.

Trong ổ khí của các cụm trục chính cao tốc thường dùng vật liệu bạc lót là graphit còn áo bạc thì dùng đồng thanh, vật liệu trục là thép gió. Sự liên hợp vật liệu này đã phát huy được các đặc tính quý báu của graphit. Chúng ta sẽ khảo sát vật liệu này ở phần sau đây,

## **16.2. GIỚI THIỆU VỀ GRAPHIT DÙNG LÀM BẠC**

Dựa vào yêu cầu công nghệ, các vật liệu bằng graphit chống ma sát và các tổ hợp của chúng có chứa graphit có thể chia làm 5 nhóm sau:

1. Các vật liệu có tấm graphit hoặc nhựa tráng graphit.
2. Các kim loại có tấm graphit hoặc nhựa tráng graphit.
3. Các phiến graphit và các tổ hợp khác (các dạng kết hợp khác).
4. Các dạng vật liệu gồm chứa graphit.
5. Các vật liệu mạ graphit chống ma sát.

Ta sẽ khảo sát từng loại riêng biệt về các tính chất cơ lý cơ bản của chúng.

### **16.2.1. Các vật liệu bằng graphit không thấm (đã thiêu kết hoặc tráng)**

Nguyên liệu cơ bản để chế tạo các vật liệu này là dầu mỏ đã nhiệt phân. Đó là những sản phẩm thừa sau khi chưng dầu madút, nhựa đường, than đá hoặc chưng dầu mỏ đóng vai trò là vật liệu liên kết. Để cải thiện tính chống ma sát của các vật liệu người ta bổ sung vào một ít graphit tự nhiên (đến 12%) vào lò liệu. Lò liệu trải qua một quá trình công nghệ lâu dài, đầu tiên biến thành dạng bột mà từ đó người ta sẽ ép thành những khuôn ép của các phôi liệu graphit.

Ưu điểm lớn nhất của các vật liệu graphit là tính chất cơ lí của chúng không thay đổi trong khí, nhiệt độ thay đổi trong phạm vi rộng (- 200°C ÷ +800°C). Ngoài ra chúng có độ cứng cao khi nhiệt độ ít thay đổi. Các tính chất cơ lí chủ yếu của các vật liệu graphit chống ma sát không thấm tra bảng (16.1).

### **16.2.2. Các vật liệu graphit được tẩm kim loại hoặc nhựa**

Trong quá trình nhiệt luyện các phôi ép, một phần của chất liên kết hữu cơ được tách ra dưới dạng dễ bay hơi và khô nằm trong vật liệu, chúng hình thành các bọt khí kích thước gần bằng 1μm và độ rỗng tổng cộng trong một số vật liệu có thể đến 25%. Do đó khi có sự chênh áp suất nhất định, môi trường làm việc có thể hở thông qua graphit. Các nhược điểm này vẫn tồn tại khi thêm chúng vào các loại hợp kim (chì, thiếc, bạcbit, bạc...) vào nhựa hữu cơ hay silic hữu cơ vào luyện hay các vật liệu polime.

Việc tẩm các vật liệu graphit làm tăng đáng kể cơ tính và đôi khi cải thiện được tính chống ma sát của chúng. Các tính chất cơ lí của các vật liệu tẩm graphit tra trong bảng (16.2). Khi so sánh bảng này với bảng (16.1) ta thấy việc tẩm graphit bằng kim loại đã làm tăng độ bền đến 1,5 ÷ 2 lần.

### **16.2.3. Graphit tẩm và các vật liệu tổ hợp khác**

Trong một số vật liệu graphit chống ma sát, graphit tẩm và các vật liệu tổ hợp khác chiếm một vị trí đặc biệt. Các vật liệu tổ hợp thu được do ép nóng hỗn hợp bột của graphit nhân tạo và phenol-foocmal.

Các graphit dạng tấm có thể được gia công một cách dễ dàng bằng cắt gọt hay bào mài. Nó bao gồm 3 kiểu: ATM-1, ATM-10, ATM-1Γ. Các tính chất của vật liệu này tra theo bảng (16.3). Trong đó ATM-1 có cơ tính và tính chống ma sát tốt nhất. Hệ số giãn nở dài của nó tăng theo sự tăng của nhiệt độ. Khi nhiệt độ trong khoảng 140°C ÷ 170°C hệ số này ít thay đổi. Tính giãn nhiệt của ATM-1 giảm rất chậm khi tăng nhiệt độ. ATM-1 được sử dụng trong các ổ trục làm việc ở tải trọng tĩnh đến 30 kG/cm<sup>2</sup> và vận tốc tới 10m/s.

Các tổ hợp của graphit thu được có độ bền mòn cao hơn do hệ số ma sát thấp hơn. Tính hút ẩm tốt hơn.

#### **16.2.4. Các vật liệu xeramic kim loại có chứa graphit**

Các vật liệu xeramic kim loại và sản phẩm của nó được chế tạo bằng phương pháp luyện kim bột. Phương pháp luyện kim bột được áp dụng rộng rãi khi chế tạo các ổ bôi trơn chống ma sát. Đặc điểm của phương pháp luyện kim bột là sử dụng nguyên liệu ban đầu là bột kim và phi kim loại rồi khuấy trộn theo một tỉ lệ nhất định ép và thiêu kết ở nhiệt độ thấp hơn nhiệt độ nóng chảy của các thành phần chủ yếu.

Các vật liệu và sản phẩm của luyện kim bột rất đa dạng. Chúng khác nhau tuỳ theo cách kết cấu kết hợp nguyên liệu ban đầu và công nghệ chế tạo chúng. Luyện kim bột cho phép các vật liệu có độ xốp theo yêu cầu định trước từ 5 ÷ 30% thể tích và có độ thấm tốt.

Các tính chất cơ lí chủ yếu của các vật liệu xốp xeramic cho trong bảng 16.4.

#### **16.2.5. Các vật liệu có tráng graphit chống ma sát**

Hiện nay trong nhiều lĩnh vực của ngành chế tạo máy đã tìm được các vật liệu mới để chế tạo các ổ trục và cụm ma sát, chúng có tính bền nhiệt cao hơn, tính chống ma sát và độ bền cao hơn so với các vật liệu khác. Chẳng hạn các chi tiết có bề mặt ma sát được tráng (mạ) graphit pirol. Trong chế tạo máy lí tưởng nhất là chế tạo ra pirol graphit bằng phương pháp nhiệt độ thấp.

Trong quá trình thực nghiệm đã xác nhận được rằng tính chất chống ma sát của pirol graphit cao nhất chỉ có được ở dạng phẳng.

**Bảng 16.1. Các tính chất cơ lí chủ yếu của vật liệu chống m� sát**

Đặc tính công nghệ của vật liệu	Mác vật liệu	Khoi lượng rieng (g/cm <sup>3</sup> )	Giới hạn bền (kG/mm <sup>2</sup> )	Modun dan hoi E (kG/cm <sup>2</sup> )	Dộ cứng xốp	Hệ số giãn nở nhiệt	Hệ số dẫn nhiệt	Dộ xốp (%)	Hút nước theo trọng lượng
Thiếc kết	AO-1500	1,65 ÷ 1,7	15 ÷ 18	6,0 ÷ 8,0	15.10 <sup>4</sup>	60 ÷ 65	2,5	80	20
	AO - 600	1,50 ÷ 1,60	10 ÷ 15	5,0 ÷ 7,0	14.10 <sup>4</sup>	55 ÷ 60	2,5	75	20
	ПК-0	1,50 ÷ 1,60	12 ÷ 15	5,0 ÷ 6,0	16.10 <sup>4</sup>	70 ÷ 75	2,5	75	20 ÷ 30
	2Н1000	1,65 ÷ 1,70	16 ÷ 17	6,0 ÷ 7,5	14.10 <sup>4</sup>	70 ÷ 75	2,5	80	8 ÷ 10
Graphit hoá	AГ - 1500	1,70 ÷ 1,80	8 ÷ 10	4,0 ÷ 5,0	13.10 <sup>4</sup>	45 ÷ 50	2,7	160	10 ÷ 20
	AГ - 600	1,60 ÷ 1,65	6 ÷ 8	3,5 ÷ 4,0	10.10 <sup>4</sup>	43 ÷ 45	2,7	160	10 ÷ 20
	ЭГ - 2A	1,60 ÷ 1,65	5,0 ÷ 5,5	2,0 ÷ 3,0	9,5.10 <sup>4</sup>	55 ÷ 60	2,6	160	10 ÷ 20
	Э - 46	1,60 ÷ 1,62	3,5 ÷ 4,5	1,5 ÷ 2,0	7.10 <sup>4</sup>	43 ÷ 45	2,6	140	10 ÷ 20
	МГ - 1	1,54	5,42	1,5 ÷ 2,0	7.10 <sup>4</sup>	30 ÷ 40	2,6	90 ÷ 110	13 ÷ 32

Bảng 16.2. Các tính chất cơ lý cơ bản của vật liệu graphit được tẩm kim loại hay nhựa

Đặc tính công nghệ của vật liệu	Mác vật liệu	Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	Giới hạn bên (kG/mm <sup>2</sup> )		Modun dàn hồi E(kG/cm <sup>2</sup> )	Độ cứng xốp	Hệ số giãn nở nhiệt	Hệ số dẫn nhiệt
			$\sigma_c$ (nén)	$\sigma_u$ (uốn)				
Tẩm bằng nhựa	AO-1500Ø	1,75 ÷ 1,80	30 ÷ 35	14 ÷ 17	16,5.10 <sup>4</sup>	70 ÷ 75	2,5	80
	AO-1500K	1,70 ÷ 1,75	23 ÷ 25	9 ÷ 10	15.10 <sup>4</sup>	70 ÷ 72	2,5	80
	PK-0Ø	1,70 ÷ 1,75	21 ÷ 22	8 ÷ 10	17,5.10 <sup>4</sup>	75 ÷ 80	2,5	75
	AT-1500Ø	1,70 ÷ 1,80	16 ÷ 18	7 ÷ 8	13,5.10 <sup>4</sup>	55 ÷ 60	2,7	100
	AT-1500K	1,75 ÷ 1,75	10 ÷ 12	5 ÷ 6	13.10 <sup>4</sup>	50 ÷ 60	2,7	100
	Thẩm kim loại	2,7 ÷ 3,0	26 ÷ 28	10 ÷ 12	16.10 <sup>4</sup>	70 ÷ 75	3,7	90
	AO-1500b83	2,6 ÷ 2,9	25 ÷ 27	9 ÷ 10	16.10 <sup>4</sup>	70 ÷ 75	3,7	90
	AT-1500CO5 b83	2,5 ÷ 3,1	15 ÷ 5,6	6 ÷ 7,5	13,5.10 <sup>4</sup>	65 ÷ 70	3,8	180
	AT-15005PC30	2,4 ÷ 2,8	14 ÷ 15	5 ÷ 6	13,5.10 <sup>4</sup>	70 ÷ 72	3,8	180
	AT-1500A	2,2 ÷ 2,5	15 ÷ 16	6 ÷ 7	13,2.10 <sup>4</sup>	70 ÷ 75	3,7	175
		2,3 ÷ 2,6	13 ÷ 14	5 ÷ 6	14,5.10 <sup>4</sup>	60 ÷ 70	3,8	180

**Bảng 16.3. Tính chất cơ lí chủ yếu của tám graphit**

Mác vật liệu	Trọng lượng riêng g/cm <sup>3</sup>	Giới hạn bền kG/mm <sup>2</sup>		Hệ số nhiệt dẫn dài $\lambda_{\text{đ}_i}$	Hệ số dẫn nhiệt kcal/m.giờ.độ	Tính thấm đối với không khí
		$\sigma_c$ (nén)	$\sigma_u$ (uốn)			
ATM-1	1,8	1000 ÷ 1200	400 ÷ 500	$0,85 \cdot 10^{-5}$	30 ÷ 35	Khi chiều dày 5mm không thấm ở áp suất đến 5 at
ATM-10	1,74	550	260	$0,25 \cdot 10^{-5}$	80 ÷ 85	
ATM1-Γ ΑΓ∅	1,74 $1,9 \div 1,98$	450 $300 \div 560$	200 $160 \div 260$	$0,22 \cdot 10^{-5}$ $1,7 \cdot 10^{-5}$	90 ÷ 120 10	Khi chiều dày 5mm Không thấm ở áp suất đến 3 at

**Bảng 16.4. Tính chất cơ lí cơ bản của vật liệu xốp xeramic kim loại**

Tính chất cơ bản	Graphit + sắt	Graphit + thiếc + đồng
Nồng độ g/cm <sup>3</sup>	6,5 ÷ 7,5	5,8 ÷ 6,4
Độ cứng HB	50 ÷ 80	80 ÷ 120
Giới hạn bền kG/mm <sup>2</sup> :		
- $\sigma_c$ (nén)	40 ÷ 50	50 ÷ 90
- $\sigma_u$ (uốn)	20 ÷ 40	30 ÷ 50
Thấm dầu %	1,5 ÷ 3,0	1,5 ÷ 3,5
Hệ số ma sát (theo thép)	0,04 ÷ 0,07	0,08 ÷ 0,12

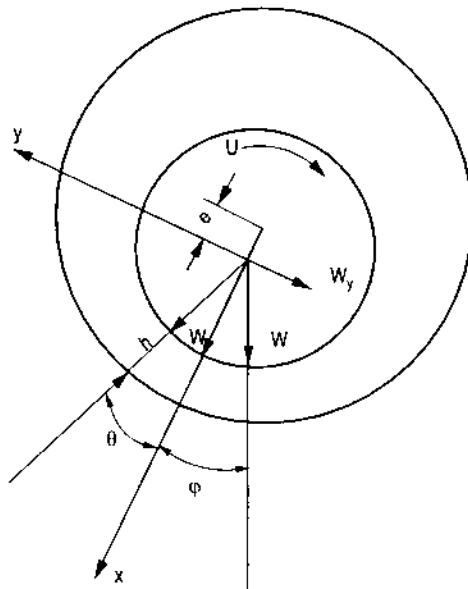
## Chương 17

# CƠ SỞ LÍ THUYẾT BÔI TRƠN KHÍ

### 17.1. MỞ ĐẦU

Theo sự phân tích ở phần trước chúng ta biết rằng: Vị trí dừng của ngõng trực là cục bộ được lý tưởng hoá từ các trường hợp chung. Thực tế do sai số hình dáng không tránh được và vấn đề tồn tại mất cân bằng nên tâm ngõng trực chuyển động theo quỹ đạo xoáy đồng bộ đến khi mất ổn định xuất hiện xoáy bán vận tốc. Để xác định điều kiện ổn định và quỹ đạo chuyển động thực tế của ngõng trực, chúng ta cần giải phương trình không dừng bôi trơn khí, tính toán sự phụ thuộc của tâm ngõng trực và sự phân bố áp lực khí trong khe hở bôi trơn với thời gian. Nhằm xác định các lực phân tán  $T$  và lực phục hồi  $N$  (như đã phân tích) tức là tương ứng với khả năng mang tải của ổ khí động, độ cứng lớp bôi trơn và mô men ma sát trên ngõng trực khi làm việc để ổn định dưới tác dụng của tải trọng không đổi (tức là tâm ngõng trực có vị trí không đổi với ổ). Vị trí này được xác định bởi độ lệch tâm tương ứng là  $\zeta$  và góc tương ứng là  $\varphi$  giữa tải trọng và hướng của đường tâm (hình 17.1), vị trí này là vị trí dừng.

**Hình 17.1:** Tọa độ và tham số khe hở bôi trơn của ổ trực

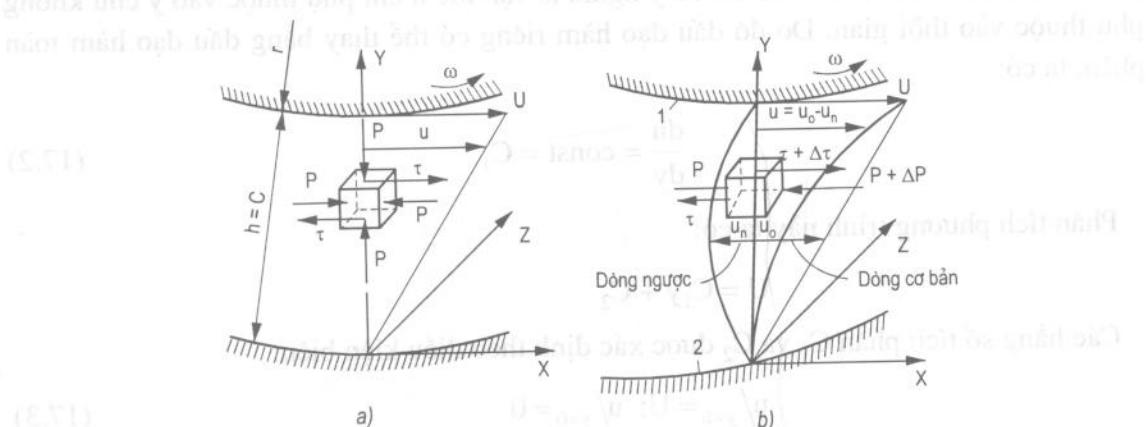


Việc giải bài toán bôi trơn bằng khí không dừng gặp rất nhiều khó khăn, các khó khăn này có thể không khắc phục được bằng phương pháp giải theo giải tích. Do vậy chúng ta sẽ tiến hành theo trình tự từ đơn giản đến phức tạp. Việc nghiên cứu tính toán tính năng động lực học của ổ trước tiên phải xây dựng các phương trình cơ bản: Phương trình bôi trơn khí trong trường hợp tổng quát chung và trường hợp riêng. Phương trình vi phân chuyển động ở chế độ làm việc không dừng của ngõng trong ổ.

## 17.2. PHƯƠNG TRÌNH BÔI TRƠN KHÍ TRONG TRƯỜNG HỢP TỔNG QUÁT VÀ TRƯỜNG HỢP RIÊNG

Phương trình bôi trơn khí có thể nhận được từ phương trình cơ bản của Navie-Stoc đối với dòng chảy tầng của chất lỏng nhớt. Chúng ta sẽ sử dụng hệ quả của phương trình khí khảo sát trực tiếp hiện tượng chảy trong lớp bôi trơn khí.

Trước hết chúng ta khảo sát sự phân bố vận tốc theo chiều cao của khe hở trong lớp bôi trơn. Bề mặt ngõng trục chuyển động với vận tốc không đổi  $U = r\omega$  (hình 17.2a) mang theo chất bôi trơn trong khe hở.



Hình 17.2

Khi trục không chịu tải thì đường tâm của ngõng và ổ trùng nhau. Khi đó tiết diện khe hở không đổi theo hướng của dòng chảy và khí không bị nén, không bị đẩy ra phía 2 đầu ổ. Do đó trong khe hở bôi trơn không có hiện tượng tăng áp lực của khí và thành phần vận tốc theo phương z của dòng chảy bằng không. Thành phần vận tốc  $u$  của phần tử bôi trơn dọc theo trục x thay đổi dần từ  $u_{y=h} = U$  (trên bề mặt ngõng trục) đến  $u_{y=0} = 0$  (trên bề mặt ổ) theo chiều cao  $h$  của khe hở dưới tác dụng của lực ma sát nhớt.

Phần tử bôi trơn ở thời điểm khảo sát có thể tích  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  chuyển động với vận tốc không đổi theo đường tròn bán kính  $r = (h-y)$ .

Trong đó:  $r$  - bán kính của ổ.

$h$  - khe hở giữa ngõng và ổ;

$y$  - tọa độ trọng tâm của phần tử bôi trơn.

Điều này là thực tế vì trong chảy tầng không có sự xáo trộn giữa các lớp như chảy rối, mà thực tế luôn xảy ra chảy tầng.

Các lực tác dụng lên phía trên và phía dưới của phần tử cân bằng lẫn nhau. Các lực này tỷ lệ với ứng suất trượt  $\tau$  xuất hiện do các phần tử bôi trơn phía trên chuyển động

nhanh hơn các phần tử bôi trơn phía dưới. Vì áp lực p ở mọi chỗ đều như nhau nên áp lực lên mặt trái và mặt phải của phần tử bôi trơn cũng cân bằng nhau. Vậy trị số ứng suất trượt  $\tau$  không đổi theo chiều cao khe hở.

$$\tau = \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = \text{const} \quad (17.1)$$

Trong đó:  $\mu$  - độ nhớt động lực học của khí.

Do đó khi đường tâm của ngõng trục và ổ trùng nhau thì gradien vận tốc không đổi. Vận tốc  $u$  không đổi theo thời gian và phân bố giống nhau tại mọi điểm có cùng chiều cao dọc theo chiều dài ổ. Điều đó có ý nghĩa là vận tốc  $u$  chỉ phụ thuộc vào  $y$  chứ không phụ thuộc vào thời gian. Do đó dấu đạo hàm riêng có thể thay bằng dấu đạo hàm toàn phần, ta có:

$$\frac{du}{dy} = \text{const} = C_1 \quad (17.2)$$

Phân tích phương trình này ta có:

$$U = C_1 y + C_2$$

Các hằng số tích phân  $C_1$  và  $C_2$  được xác định theo điều kiện biên:

$$u|_{y=h} = U; \quad u|_{y=0} = 0 \quad (17.3)$$

Khi đó:

$$U = C_1 h + C_2$$

$$0 = 0 + C_2$$

$$\text{Vậy} \quad C_1 = U/h; \quad C_2 = 0.$$

Thay  $C_1$ ,  $C_2$  vào phương trình trên ta có:

$$u = \frac{y}{h} \cdot U; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{U}{h} \rightarrow \tau = \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \cdot \frac{U}{h} \quad (17.4)$$

Vì phần tử bôi trơn bị lớp dưới giữ lại lớp trên kéo đi nên  $\tau$  ở mặt trên của phần tử sẽ hướng theo chiều ngược lại. Dòng bôi trơn được coi là chuyển động liên tục xuống quanh ngõng trục với vận tốc trung bình bằng  $U/2$ . Do đó lưu lượng khí đi qua tiết diện khe hở trên một đơn vị chiều dài ổ là:

$$q_x = \int_0^h u dy = \frac{U \cdot h}{2} = \frac{U \cdot C}{2} \quad (17.5)$$

Khi đường tâm ngõng trục và ổ trùng nhau thì khe hở h bằng khe hở trung bình C nên ta có:  $q_x = \frac{U \cdot C}{2}$ .

Dễ nhận thấy rằng lưu lượng thể tích khí qua tiết diện khe hở trên một đơn vị chiều dài ống bằng tiết diện của tam giác vận tốc.

Khi trục chịu tải quá trình bôi trơn trở lên phức tạp, lúc này đường tâm của ống trục và của ống không trùng nhau. Do đó khe hở hướng kính h biến đổi theo đường tròn từ giá trị:  $h = C - e \div C + e$ .

Khi ống trục quay thì khí đi vào khe hở hình nêm, giữa ống trục và ống gây ra hiện tượng nén khí, áp lực bôi trơn tăng lên, hợp lực của các áp lực khí động trên ống trục sẽ cân bằng với tải trọng ngoài, do đó xuất hiện gradien áp lực khí dọc trục theo khe hở. Cho nên xuất hiện dòng bôi trơn ngược, có cùng chiều với dòng bôi trơn cơ bản khi  $\frac{\partial p}{\partial x} < 0$  và ngược chiều với dòng bôi trơn cơ bản khi  $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$ .

Khi đó vận tốc tổng cộng  $U$  sẽ thay đổi theo quy luật phi tuyến ( $U$  là tổng hợp 2 thành phần vận tốc của dòng bôi trơn cơ bản và dòng bôi trơn ngược). Ứng suất trượt  $\tau$  trên mặt trên của phân tử sẽ lớn hơn ở mặt dưới một giá trị  $\Delta\tau$ .

$$\Delta\tau \frac{\partial t}{\partial t} \cdot \Delta y = \frac{\partial}{\partial y} (\mu \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \Delta y) = \mu \cdot \Delta y \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (17.6)$$

Trên mặt  $\Delta x$ ,  $\Delta r$  của phân tử  $C$  có toạ độ  $y + \Delta y$ , ứng suất phụ  $\Delta\tau$  sẽ sinh ra một lực  $\mu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  cân bằng với lực tăng áp:

$$\Delta p \cdot \Delta y \cdot \Delta x = \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (17.7)$$

$\frac{\partial \tau}{\partial y} \cdot \Delta y$  và  $\frac{\partial p}{\partial x} \cdot \Delta x$  là các lực tăng của  $\tau$  và  $p$  ứng với các giá số  $\Delta y$  và  $\Delta x$ . Đạo hàm

$\frac{\partial p}{\partial x}$  là lượng tăng tương đối của  $p$  theo hướng  $x$ , nó là đạo hàm riêng của  $p$  theo  $x$  (khác với trường hợp không chịu tải). Đồng thời  $p$  cũng biến đổi theo hướng  $z$  và có thể phụ thuộc vào thời gian. Đây là quá trình bôi trơn không dừng, tức là khi  $x$  và  $z$  cố định thì  $\frac{\partial p}{\partial t} \neq 0$ . Điều này cũng đúng cho  $\tau$  và các thành phần vận tốc  $u$ ,  $w$ . Nhưng sự biến đổi của  $u$  và  $w$  theo trục  $x$  và  $z$  nhỏ hơn nhiều so với trục  $y$ . Do đó khi lập phương trình vi phân chuyển động ta có thể bỏ qua đạo hàm bậc nhất và đạo hàm bậc 2 của  $u$  và  $w$  theo trục  $x$  và  $z$ .

Thực tế trên các phân tử đang khảo sát còn có tác dụng của lực quán tính và trọng lực. Song các lực này nhỏ không đáng kể so với áp lực và  $\tau$  nên có thể bỏ qua chúng. Do đó vectơ của áp lực và lực trượt phải bằng không. Từ đó có thể dẫn đến phương trình Raynol đối với dòng chảy trong tiết diện hướng kính:

$$\left( \mu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial p}{\partial x} \right) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = 0$$

$$\mu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (17.8)$$

Đối với dòng chảy theo hướng đường tâm của ố phương trình Räynol có dạng:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (17.9)$$

Do khe hở  $h$  rất nhỏ nên có thể coi áp lực  $p$  không đổi theo chiều cao khe hở, tức là các đạo hàm  $\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial z}$  không phụ thuộc vào trị số của nó, không thay đổi theo  $h$  của tiết diện khảo sát.

Tích phân phương trình (17.8) theo  $y$  hai lần ta có:

$$u = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot y^2 + C'_1 \cdot y + C'_2 \quad (17.10)$$

Các hằng số tích phân  $C'_1, C'_2$  được xác định theo điều kiện biên:

$$u|_{y=h} = U; \quad u|_{y=0} = 0$$

Khi đó:

$$U = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot h^2 + C'_1 \cdot h + C'_2 \quad (17.11)$$

$$0 = 0 + 0 + C'_2$$

$$\text{Vậy } C'_1 = \frac{1}{2} \cdot (u \cdot \frac{h^2}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}); \quad C'_2 = 0$$

Thay  $C'_1, C'_2$  vào các phương trình trên, ta có phương trình phân bố áp lực theo chiều cao khe hở:

$$u = \frac{U}{h} \cdot y - \frac{h^2}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot y \cdot (h - y) \quad (17.12)$$

Làm tương tự như vậy đối với phương trình (17.9) nhưng với điều kiện biên:  $w|_{y=h} = w|_{y=0} = 0$ .

Ta có:

$$w = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \cdot (h - y) \cdot y \quad (17.13)$$

Trong phương trình (17.12) ta thấy rằng thành phần  $\frac{U}{h}$  là vận tốc của dòng bôi trơn cơ bản. Dòng cơ bản được ngõng trực chuyển động với  $U = \omega \cdot r$  mang theo còn vận tốc dòng ngược  $u_n = -C \cdot y \cdot (h - y)$ , toạ độ  $\left( y = \frac{h}{2}; u_{n1} = -C \frac{h^2}{4} \right)$  là toạ độ đỉnh của đường cong vận tốc ngược. Nếu chuyển gốc toạ độ tới điểm đó thì chúng ta sẽ thấy đồ thị  $u_n$  là đường parabol bởi vì trong gốc toạ độ mới sẽ có:

$$y = y_1 + \frac{h}{2}; u_n = u_{n1} - C \cdot \frac{h^2}{4} \quad (17.14)$$

Do đó:

$$u_{n1} - C \cdot \frac{h^2}{4} = -C \left( \frac{h}{2} + y_1 \right) \cdot \left( \frac{h}{2} - y_2 \right) \rightarrow y_1^2 = \frac{1}{C} \cdot u_{n1}$$

Đây là phương trình chính tắc của đường parabol.

Trong quá trình dừng, vận tốc thanh phân v dọc theo trục y nhỏ không đáng kể so với các thành phần vận tốc u và w, khi coi các mặt của phần tử bôi trơn là cố định nên có thể coi v = 0.

Chúng ta tìm hiểu lưu lượng thể tích khí theo hướng x và z chảy qua một đơn vị chiều rộng của dòng chảy (có chiều cao h). Nếu chọn  $\Delta x = 1$ ,  $\Delta z = 1$ , ta có:

$$\begin{aligned} q_x &= \Delta z \cdot \int_0^h u dy = \int_0^h \left[ \frac{u}{h} \cdot y - C \cdot y \cdot (h - y) \right] dy \\ &= \frac{u \cdot y^2}{2 \cdot h} \Big|_0^h - \frac{C \cdot h \cdot y^2}{2} \Big|_0^h - \frac{C \cdot y^3}{3} \Big|_0^h = \frac{U \cdot h}{2} - \frac{C \cdot h^3}{6} = \frac{U \cdot h}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \quad (17.15)$$

Tương tự ta có:

$$q_z = \Delta x \cdot \int_0^h w dy = -\frac{h^3}{12\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (17.16)$$

Từ (17.15) ta thấy rằng lưu lượng thể tích  $q_x$  là hiệu của diện tích hai biểu đồ sau:

- Diện tích của biểu đồ dòng bôi trơn cơ bản.
- Diện tích của biểu đồ dòng bôi trơn ngược.

Điều này chính xác rằng: Nguyên lý cộng tác dụng cũng đúng với 2 dòng bôi trơn thành phần. Do đó chúng ta có thể xác định các thành phần lưu lượng một cách độc lập với nhau sau đó rồi cộng chúng lại.

Nếu ngõng trực ngoài chuyển động quay với vận tốc U còn chuyển động dọc theo đường tâm của nó với vận tốc w > 0 có thể là vận tốc dòng chảy là:

$$w = \frac{W}{h} \cdot y - \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \cdot (h - y) \cdot y \quad (17.17)$$

Phương trình (17.12) và (17.14) biểu diễn quan hệ các thành phần áp lực vận tốc và lưu lượng thể tích theo hướng x và z, chúng như nhau đối với chất lỏng và chất khí.

Khi nghiên cứu các hiện tượng xảy ra ở tất cả các điểm dọc theo chiều cao của khe hở chúng ta thấy rằng áp lực bôi trơn là không đổi.

Đặc tính quý báu của bôi trơn khí là tính chất đàn hồi. Điều này đặc biệt quan trọng trong khi xác định mối quan hệ giữa các thông số biểu diễn trong phương trình liên tục của dòng chảy. Nó chính là hệ quả của định luật Bảo toàn khối lượng.

Sau đây chúng ta khảo sát trường hợp đơn giản nhất của dòng chảy dừng. Ta tách trường lượng trong dòng chảy một phần không gian cố định có thể tích  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  (không nên nhầm với phần tử động trên hình 17.2). Do đã biết các thành phần vận tốc u, v, w về cả chiều và trị số nên chúng ta có thể coi như dòng bôi trơn chảy qua phần tử với vận tốc đã biết. Trong quá trình dừng các thành phần vận tốc u, v, w không đổi tại điểm có toạ độ (x, y, z) đã biết. Trong thời gian  $\Delta t$  thể tích chất bôi trơn chảy vào phần tử qua các mặt của nó là:

$$(u \cdot \Delta y \cdot \Delta z + v \cdot \Delta x \cdot \Delta z + w \cdot \Delta x \cdot \Delta y) \cdot \Delta t \quad (17.18)$$

Tại các điểm có toạ độ  $(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$  các vận tốc thành phần có số ra tương ứng là:  $\Delta u, \Delta v, \Delta w$ . Khi đó vector vận tốc của dòng chảy sẽ biến đổi cả về trị số và phương. Khi đó thể tích bôi trơn chảy ra khỏi phần tử qua các mặt đối diện sẽ là:

$$[(u + \Delta u) \cdot \Delta y \cdot \Delta z + (v + \Delta v) \cdot \Delta x \cdot \Delta z + (w + \Delta w) \cdot \Delta x \cdot \Delta y] \cdot \Delta t \quad (17.19)$$

Ta xác định quan hệ giữa 2 biểu thức (17.18) và (17.19) có thể coi phần không gian  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  như một bể chứa và coi các thể tích chất bôi trơn chảy vào bể qua 3 ống và chảy ra theo 3 ống khác nhau cùng một thời gian  $\Delta t$ . Thể tích chất bôi trơn trong bể là cố định nên lượng chảy vào và chảy ra của chất bôi trơn không phải bằng nhau, đó chính là điều kiện liên tục của chất bôi trơn. Nếu lượng chảy ra nhỏ hơn lượng chảy vào thì sẽ bị gián đoạn. Ngược lại sự tích tụ chất bôi trơn thừa (tức là lượng chảy vào nhiều lượng chảy ra ít) thì sẽ làm tăng áp lực trong phần tử. Cả hai trường hợp này cần phải loại trừ theo điều kiện của dòng chảy dừng. Khi đó các toạ độ x, y, z các số gia vô cùng bé thì các vận tốc thành phần sẽ có các số gia tương ứng  $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}$ .

Từ điều kiện của dòng bôi trơn dừng ta có phương trình liên tục của dòng chảy dừng:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \text{ hoặc ở dạng div } \vec{v} = \operatorname{div}(u, v, w) = 0$$

Cần chú ý rằng số gia  $\Delta u$  được xác định bằng cách khai triển dây Taylor:

$$\Delta x \cdot u = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \cdot \Delta x^2 + \dots$$

Trong đó vi phân  $d_x u = \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \Delta x$  là phần chính của số gia  $\Delta x \cdot u$

Khi thành lập phương trình liên tục của dòng chảy chúng ta cho  $\Delta x, \Delta y, \Delta z \rightarrow 0$ , do đó có thể bỏ qua các vô cùng bé có bậc lớn hơn 2, tương tự với các số gia  $\Delta v, \Delta w$ .

Khi khảo sát dòng chảy không dừng của khí ta thấy điều kiện liên tục phức tạp hơn. Khi đó thay cho các điều kiện bảo toàn thể tích là điều kiện bảo toàn khối lượng của dòng bôi trơn. Có thể giải thích điều đó như sau:

Đối với chất chảy không nén được thì sự bảo toàn về khối lượng tương đương với sự bảo toàn về thể tích vì tỉ trọng  $\rho$  không phụ thuộc vào áp lực. Nhưng tổng quát của dòng chảy không dừng thì bài toán lại càng phức tạp thêm. Vì khi đó áp lực khí trong dòng thay đổi theo không gian và thời gian. Sự thay đổi khối lượng chất bôi trơn trong phân tử tương ứng với sự khác nhau của lượng chảy vào và lượng chảy ra.

Chúng ta tách một thể tích khí  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  ra khỏi dòng chảy và khảo sát sự biến đổi khối lượng trong phân tử đó khi cho khí chảy vào các mặt của nó. Đỉnh của thể tích đó ở gần gốc toạ độ và có toạ độ  $(x, y, z)$ . Tại điểm này có các thành phần vận tốc chuyển động của khí tương ứng bằng  $u, v, w$  còn khối lượng riêng của chúng là  $\rho$ .

Khối lượng khí đi qua mặt song song với mặt  $yz$  (tức là chuyển động theo phương  $x$ ) trong một đơn vị thời gian là  $\rho \cdot u \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ .

$$\text{Khối lượng khí đi qua mặt đối diện là: } [\rho \cdot u + \Delta x \cdot \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u)] \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (17.20)$$

Ta thấy rằng khối lượng khí đi ra lớn hơn khối lượng khí đi vào do đó tạo ra độ hụt khối lượng. Độ hụt này chỉ là quy ước vì nó có thể là độ dôi khi  $\frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u) < 0$ .

Sau khi tính độ hụt khối lượng khí chảy qua các mặt còn lại chúng ta xác định được độ hụt tổng cộng của khối lượng khí chảy qua thể tích  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  trong một đơn vị thời gian là:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w) \right] \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (17.21)$$

Khối lượng khí chứa trong phân tử là:  $\rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  mà thể tích  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \text{const}$ . Do đó lượng tăng quy ước của khối lượng trong một đơn vị thời gian chỉ có thể là lượng tăng của khối lượng riêng khí. Nếu chọn  $\Delta t = 1$  thì lượng tăng của khối lượng riêng khí được xác định như sau:

$$\Delta \rho = \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \Delta t = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Do đó sự tăng khối lượng do sự biến đổi của khối lượng riêng là:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (17.22)$$

Lượng tăng của khối lượng bằng độ hụt của khối lượng nhưng trái dấu. Nếu độ hụt khối lượng khí chảy qua các mặt nhỏ hơn không thì độ tăng khối lượng khí tính theo (17.22) sẽ lớn hơn không. Do đó tổng các biểu thức (17.21), (17.22) phải bằng không và thể tích  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  bị co hẹp lại.

Do nhiệt độ của lớp bôi trơn tăng không đáng kể cho nên chúng ta có thể coi quá trình bôi trơn khí là quá trình đẳng nhiệt. Khi đó quan hệ giữa khối lượng riêng  $\rho$  và áp lực  $p$  (áp lực tuyệt đối) của lớp bôi trơn được biểu diễn bởi tỉ số đẳng nhiệt:

$$\frac{p}{\rho} = \text{const} \quad (17.23)$$

Theo biểu thức (17.23) chúng ta có  $p = c \cdot \rho$ , trong đó  $c$  là một hằng số. Ta rút ra phương trình của dòng khí đẳng nhiệt:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(p \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y}(p \cdot v) + \frac{\partial}{\partial z}(p \cdot w) = 0$$

Để loại bỏ biến  $y$  chúng ta tích phân phương trình sau theo  $y$  và nhận được phương trình liên tục của dòng bôi trơn khí giữa hai bề mặt:

$$\frac{\partial p}{\partial t} \int_0^h dy + p \cdot \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u dy + p \cdot \frac{\partial}{\partial y} \int_0^h v dy + p \cdot \frac{\partial}{\partial z} \int_0^h w dy = 0$$

Ta nhận thấy rằng:

- Tích phân thứ 2 và thứ 4 là lưu lượng thể tích  $q_x, q_z$  xác định theo công thức (17.15) và (17.16).

- Thành phần thứ 3 có dạng  $p/v \Big|_0^h$  vì tích phân và vi phân theo  $y$  thì khử lẫn nhau.

Trong quá trình dừng thành phần đó bằng không vì  $v_0 = v_h = 0$ .

Trong trường hợp bài toán dừng tổng quát thì điểm có toạ độ  $y$  nằm trên bề mặt ngõng trực dịch chuyển với vận tốc  $v_h = \frac{\partial h}{\partial t}$  (v tương ứng với sự tăng khe hở) nên không thể bỏ qua.

Do đó:  $p/v \Big|_0^h = p \cdot v_h = p \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$ . Thành phần thứ nhất có thể biểu diễn như sau:

$$\frac{\partial p}{\partial t} \int_0^h dy = \frac{\partial p}{\partial t} \cdot h$$

Vậy phương trình liên tục của dòng bôi trơn khí đẳng nhiệt có dạng đơn giản:

$$\frac{\partial}{\partial t}(p.h) + \frac{\partial}{\partial x}(p.q_x) + \frac{\partial}{\partial z}(p.q_z) = 0 \quad (17.24)$$

Giả sử tại thời điểm nào đó khối lượng khí chứa trong thể tích  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  là  $p.h.\Delta x.\Delta z$  trong trường hợp tổng quát thì sau một 1 thời gian  $\Delta t$  chiều cao  $h$  và tỉ trọng  $p$  đều thay đổi. Do đó lượng tăng của khối lượng hiện có trong thể tích phân tử bằng:

$$\frac{\partial}{\partial t}(p.h).\Delta t.\Delta x.\Delta z = C \cdot \frac{\partial}{\partial t}(p.h).\Delta x.\Delta z$$

Theo định luật Bảo toàn khối lượng (điều kiện liên tục) thì lượng tăng đó do lượng thừa tạo ra. Lượng thừa này xuất hiện khi lượng chảy vào lớn hơn lượng chảy ra. Giá trị của nó tính theo công thức sau:

$$\begin{aligned} & (\rho.q_x.\Delta z + \rho.q_x.\Delta x) - \left[ \rho.q_x.\Delta z = \frac{\partial}{\partial x}(\rho.q_x).\Delta x.\Delta z \right] - \\ & - \left[ \rho.q_z.\Delta x + \frac{\partial}{\partial z}(\rho.q_z).\Delta x.\Delta z \right] = -C \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial x}(p.q_x) + \frac{\partial}{\partial z}(p.q_z) \right].\Delta x.\Delta z \end{aligned} \quad (17.25)$$

Lượng tăng và lượng thừa phải bằng nhau điều đó dẫn đến phương trình (17.24), bùn chất vật lí này là: *Hiệu của khối lượng khí chảy vào phần tử bôi trơn và chảy ra khỏi nó trong cùng một thời gian phải bằng không.*

Phương trình (17.24) là dạng tổng quát cho mọi loại ống khí như ống phẳng, trụ, cầu. Khi sử dụng chỉ cần đưa vào hàm số của khe hở  $h$  và các thông số đặc trưng cho dạng ống được khảo sát cũng như điều kiện làm việc của ống.

**Đối với quá trình dừng:** Thành phần đầu tiên của phương trình (17.24) tiến đến không vì thành phần  $p$  và  $h$  chỉ phụ thuộc vào khe hở của vị trí đang khảo sát chứ không phụ thuộc vào thời gian, do đó phương trình phân bố áp lực đối với ống có kích thước hữu hạn là:

$$\frac{\partial}{\partial x}(p.q_x) + \frac{\partial}{\partial z}(p.q_z) = 0 \quad (17.26)$$

Trong trường hợp đơn giản hơn của chảy phẳng dừng với ống chiều dài vô tận thì lưu lượng chảy theo một trong các trục tiến đến không. Giả sử là lưu lượng chảy theo trục  $z = 0$  ta có:

$$\frac{\partial}{\partial x}(p.q_x) = 0 \rightarrow p.q_x = \text{const} \quad (17.27)$$

Ý nghĩa vật lí của phương trình (17.27) là: *Khi dòng khí đang nhiệt chảy qua khe hở bôi trơn thì tích của lưu lượng thể tích với áp lực là một đại lượng không đổi với mọi tiết diện bất kì.*

Tất cả các phương trình đã trình bày ở trên đều có thể sử dụng cho dòng bôi trơn chảy tầng. Giới hạn chảy tầng và chảy rối được xác định theo vận tốc tối hạn. Khi đó trị số Raynal cũng đạt được trị số giới hạn. Vận tốc tối hạn cũng được xác định theo công thức sau:

$$U_{th} = \frac{R_{eth}}{4} \cdot \frac{1}{h} \cdot \frac{\mu \cdot g}{\gamma} \quad (17.28)$$

Trong đó:

$R_{eth} = 2000$ ;

$h$  - chiều dày của lớp bôi trơn. Đối với khí  $h < 0,02\text{mm}$ ;

$\mu$  - độ nhớt của khí ở  $30^\circ\text{C}$ .  $\mu = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ kG.s/m}^2$ ;

$g$  - gia tốc trọng trường,  $g = 9,8\text{m/s}^2$ ;

$\gamma$  - trọng lượng  $1\text{m}^3$  khí ở  $30^\circ\text{C}$ . Khi áp lực  $p = 4\text{kG/cm}^2$  thì  $\gamma = 4,75 \text{ kG/m}^3$

Thay các trị số đó vào công thức (17.28) chúng ta tính được trị số giới hạn của vận tốc.

$$U_{th} = \frac{2000}{4} \cdot \frac{1}{0,02 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1,9 \cdot 10^{-6} \cdot 9,8}{4,75} = 100 \text{ m/s}$$

Nếu chú ý rằng vận tốc trượt gấp đôi vận tốc trung bình của dòng chảy thì vận tốc tối hạn không nhỏ hơn  $200\text{m/s}$ . Vận tốc thực tế hầu như luôn nhỏ hơn trị số đó. Tuy nhiên trong các trường hợp khe hở lớn đáng kể và vận tốc quay cao hơn  $200.000$  vòng/phút và áp lực cao hơn thì  $R_e$  tăng quá trị số tối hạn.

### 17.3. PHƯƠNG TRÌNH BÔI TRƠN KHÍ DẠNG CÓ CHÚA CÁC THAM SỐ KHÔNG THÚ NGUYÊN

Phương trình tổng quát bôi trơn khí như đã trình bày ở (17.24):

$$\frac{\partial}{\partial t}(p.h) + \frac{\partial}{\partial x}(p.q_x) + \frac{\partial}{\partial z}(p.q_z) = 0$$

Giải phương trình này là việc rất khó khăn, cũng như trong trường hợp bôi trơn dừng ta đưa nó về dạng rút gọn liên tục với ô chiều dài vô tận và có phương trình ngắn gọn của dòng phẳng dừng:

$$\frac{\partial}{\partial t}(p.h) + \frac{\partial}{\partial x}(p.q_x) = 0 \quad (17.29)$$

Sau khi giải phương trình này ta thêm vào giả thiết của ô có chiều dài hữu hạn (17.28)

$$q_x = \frac{U.h}{2} - \frac{h^3}{12.\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \text{ và đưa vào các biến không thứ nguyên:}$$

$$- \text{Khe hở tương đối } H: H = \frac{h}{c} \quad (17.30)$$

$$- \text{Áp lực tương đối } P: P = \frac{p}{p_a} \quad (17.31)$$

Chú ý đến quan hệ  $x = r.\theta$ ;  $U = r.\omega$  thấy được từ hình 17.1 ta có phương trình (17.29) ở dạng như sau:

$$\frac{\partial}{\partial x}(p \cdot q_x) = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{w \cdot p_a \cdot C}{2} \cdot (P \cdot H) - \frac{p_a^2 \cdot C^3}{12 \cdot \mu \cdot f \cdot r^2} \cdot \left( P \cdot H^3 \cdot \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) \right] \quad (17.32)$$

Biến đổi thành phần thứ nhất của (17.29) bằng cách đưa vào thời gian không thứ nguyên  $T = \frac{w}{2} \cdot t$  (17.33).

Ta có:  $\frac{\partial}{\partial t}(p \cdot h) = \frac{w \cdot p_a \cdot C}{2} \cdot \frac{\partial(P \cdot h)}{\partial T}$  (17.34)

Vì  $T < t$  là  $w/2$  lần nên vận tốc góc mới  $w_1$  là đại lượng không đổi.

$w_1 = w \cdot \frac{2}{w} = 2$ . Còn vận tốc góc của xoáy bán vận tốc  $\Omega_1 \leq 1$ . Điều này tương ứng với tính toán sau này.

Sau khi chia (17.33) và (17.34) cho  $\frac{w \cdot p_a \cdot C}{2}$  chúng ta được đặc tính của  $\delta$ :

$$L_1 = \frac{6 \cdot \mu \cdot w \cdot r^2}{p_a \cdot C} \quad (17.35)$$

Sau một loạt các biến đổi, phương trình bô tròn không dừng có dạng:

$$\frac{\partial}{\partial \theta}(P \cdot H^3 \cdot \frac{\partial P}{\partial \theta}) = L \cdot \left[ \frac{\partial(P \cdot H)}{\partial \theta} + \frac{\partial(P \cdot H)}{\partial T} \right] \quad (17.36)$$

Một dạng khác của phương trình này nhận được khi biểu diễn  $P$  qua biến không phụ thuộc  $\psi = P \cdot H$ .

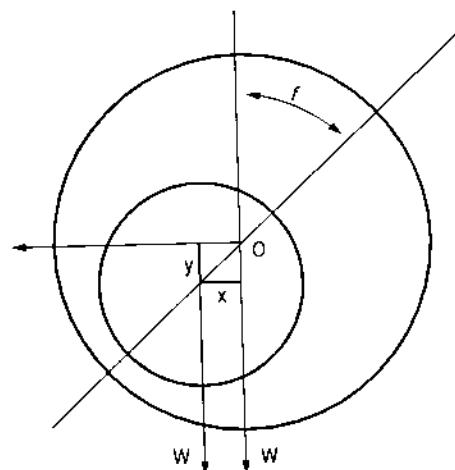
Vì  $\frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{\partial(\psi)}{H} = \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot H - \frac{\partial H}{\partial \theta} \cdot \psi$  (17.37)

Phương trình (17.37) thuận lợi cho việc tính tích phân số trên máy tính điện tử IBM.

#### 17.4. PHƯƠNG TRÌNH CHUYỂN ĐỘNG TRONG BÔI TRÒN KHÍ

Sơ đồ hệ toạ độ của phương trình chuyển động của quá trình không dừng trình bày trên hình (17.3).

Trong trường hợp này đường  $oc$  thay đổi (di động), chỉ có hướng của tải trọng là không đổi. Trong trường hợp này tải trọng chỉ tham gia vào 1 trong 2 phương trình chuyển động của tâm ngõng trực:



Hình 17.3

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} &= r \cdot \int_0^{2\pi} p \sin \theta d\theta \\ m_1 \cdot \frac{d^2y}{dt^2} &= r \cdot \int_0^{2\pi} p \cos \theta d\theta + w_1 \end{aligned} \quad (17.38)$$

Trong đó:  $m_1$ : khối lượng riêng của rôto trên một đơn vị chiều dài  $\delta$ ;

$w_1$  - tải trọng ngoài trên một đơn vị chiều dài  $\delta$ .

Thay  $x, y$  trong (17.38) bằng các tọa độ không thứ nguyên:  $X = \frac{x}{C}, T = \frac{y}{C}$  và tích phân theo thời gian không thứ nguyên  $T$  có tính đến  $h, p, x$  và  $U$  trong (17.30), (17.31) thì phương trình (17.38) có dạng:

Vì  $\frac{d^2x}{dT^2} = \frac{d^2x}{dt^2} \cdot \frac{1}{C \left( \frac{w}{2} \right)^2}$ :

Nên  $\frac{d^2X}{dT^2} = B \cdot \int_0^{2\pi} p \sin \theta d\theta \quad (17.39)$

$$\frac{d^2Y}{dT^2} = B \cdot \int_0^{2\pi} p \cos \theta d\theta \quad (17.40)$$

Trong đó:

$$B = \frac{r \cdot p_a}{m_1 \cdot C \left( \frac{w}{2} \right)^2} \quad (17.41)$$

$$K = \frac{w_1}{r \cdot p_a} \quad (17.42)$$

## 17.5. KẾT LUẬN

Dạng tổng quát của phương trình bối tron khí là phương trình (17.24).

Tập hợp các phương trình (17.36), (17.39), (17.40) về phương diện toán học đã mô tả đầy đủ quá trình chuyển động của ngõng trực trong  $\delta$ . Giải bài toán về chuyển động của trực bao gồm 3 giai đoạn:

- Xác định các nghiệm dừng (các trị số cân bằng tại các vị trí dừng).
- Nghiên cứu tính ổn định của nghiệm dừng (tính ổn định của vị trí cân bằng).

- Dựng đồ thị pha của chuyển động. Xác định các nghiệm tuần hoàn (quỹ đạo kín) và nghiên cứu tính ổn định của chúng.

Trong giai đoạn 1, nhiệm vụ cơ bản của bài toán dừng là xác định khả năng mang tải của ổ khí động, độ cứng của lớp bôi trơn và mômen ma sát trên ngõng trực, khi làm việc ổn định dưới tác dụng của tải trọng không đổi; khi đó tâm ngõng ở vị trí không đổi so với ổ.

Qua quá trình phân tích trên ta thấy rằng: Việc khử các thành phần thời gian trong phương trình không dừng dẫn đến phương trình bôi trơn dừng. Sau đó ta loại bỏ thành phần chuyển động bôi trơn theo hướng đường tâm trực dẫn đến bài toán dừng đối với dòng phẳng, phản ánh tính chất vật lí của quá trình bôi trơn khí của ổ có chiều dài vô hạn. Vậy khi giải bài toán bôi trơn khí ta sẽ tiến hành ngược lại từ đơn giản đến phức tạp, thể hiện cụ thể ở các phần tính toán sau.

## Chương 18

# TÍNH Ổ BÔI TRƠN KHÍ

### 18.1. Ổ LÀM VIỆC Ở CHẾ ĐỘ DÙNG

Như đã phân tích ở phần trước, trong việc bài toán bôi trơn khí ở trường hợp tổng quát rất phức tạp và khó khăn có thể không thể giải bằng giải tích được. Do vậy ta xét trên hành trình các nghiệm dừng của nó và sau đó tìm điều kiện ổn định của các nghiệm dừng và đồ thị pha của chuyển động xác định của nghiệm tuần hoàn ở các bước sau.

Nhiệm vụ cơ bản của bài toán bôi trơn khí ở chế độ dừng là xác định khả năng tải, độ cứng vững của lớp bôi trơn và mômen ma sát trên ngưỡng trực.

Để đơn giản hóa bài toán và theo trình tự ổ đỡ đơn giản đến phức tạp, để hiểu rõ bản chất của bôi trơn khí ta tiến hành bắt đầu từ bài toán phẳng đối với ổ chiều dài vô hạn.

#### 18.1.1. Tính toán ổ chiều dài vô hạn ở chế độ làm việc dừng (bài toán phẳng)

Tính toán ở chiều dài vô hạn chỉ là mô hình vật lý nó không tồn tại trong thực tế. Tuy vậy việc khảo sát nó có rất nhiều thuận lợi, vì trong ổ chiều dài hữu hạn thì phải tự bôi trơn khí không chỉ chuyển động vòng mà còn chuyển động theo hướng dọc trực của ổ. Tuy mức độ tăng chiều dài của ổ mà chuyển động hướng trực bị chậm đi (vì sức cản của khe hở tỉ lệ với chiều dài ổ). Khi  $L \rightarrow \infty$  ( $L$  là chiều dài của ổ) thì sức cản rất lớn do đó tại giữa ổ  $\omega \rightarrow 0$  và dòng chảy là dòng phẳng.

Khi thay biểu thức (17.15) vào phương trình (17.27) chúng ta có phương trình phân bố áp lực tổng quát của dòng bôi trơn phẳng.

$$p.U.h - p \frac{dp}{dx} \cdot \frac{h^3}{6\mu} = C = \text{const}$$

Để thuận tiện cho việc nghiên cứu chúng ta đưa phương trình về dạng sau:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6U\mu}{h^2} \left( 1 - \frac{C}{ph} \right) \quad (18.1)$$

Phương trình này vẫn đúng cho cả trường hợp ổ trụ vì khi tính ổ trụ ta có thể bỏ qua các lực quán tính li tâm. Điều đó có nghĩa là: dòng bôi trơn trong khe hở giữa trực và ổ tương đương với dòng bôi trơn trong khe hở được khai triển trên mặt phẳng sao cho bề mặt của ngõng trực (là mặt phẳng  $y = 0$ ) chuyển động dọc theo trực  $x$  với vận tốc  $U = r\omega$ , còn bề mặt ổ là bề mặt cong cố định có chiều dài  $2\pi r$  và chiều rộng bằng  $L$ ; hình dạng và vị trí của nó được xác định bằng đại lượng  $h_0$  và  $e$ .

Ta có quan hệ sau:

$$x = r\theta$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{dp}{d(r\theta)} = \frac{1}{r} \frac{dp}{d\theta} \quad (18.2)$$

Sau khi bỏ qua vô cùng bé bậc hai chúng ta tìm được (hình 18.1) quan hệ sau:

$$h = R - r - e\cos\theta = C - e\cos\theta$$

$$\varepsilon = \frac{e}{c}; H = \frac{h}{c} = 1 - e\cos\theta \quad (18.3)$$

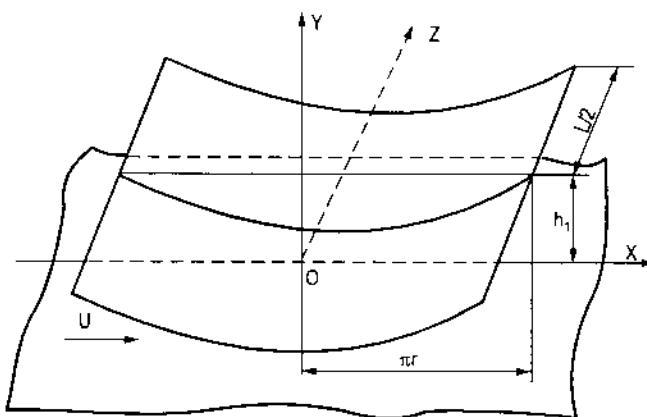
Trong đó:  $\varepsilon$  - độ lệch tâm tương đối và nó bằng tỉ số giữa độ lệch tâm  $e$  với khe hở trung bình  $c$  và  $H$  là khe hở tương đối.

Từ đó suy ra:  $h = H.c = c(1 - e\cos\theta)$

Thế (18.2) và (18.3) vào phương trình (18.1) ta có:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6U\mu r}{C^2(1-\varepsilon\cos\theta)^2} - \left(1 - \frac{C}{ph(1-\varepsilon\cos\theta)}\right) \quad (18.4)$$

Đường cong biểu diễn phương trình trên là một đường cong tuần hoàn với chu kỳ  $2\pi$  có 2 điểm cực trị (hình 18.1). Tại một điểm áp lực đạt giá trị  $P_{\max}$  và một điểm áp lực đạt giá trị  $P_{\min}$ , tại các điểm này  $\frac{dp}{d\theta} = 0$  tức là biểu thức  $\left(1 - \frac{C}{ph(1-\varepsilon\cos\theta)}\right)$  tiến đến 0, do đó chúng ta xác định được hằng số  $C$  chưa biết.



**Hình 18.1: Khe hở ở hình trụ khai triển trên mặt phẳng**

$$C = P_{\max}c(1-\varepsilon\cos\theta_{\max}) = P_{\min}c(1-\varepsilon\cos\theta_{\min})$$

Nếu kí hiệu:

$$P_{\max}c(1-\varepsilon\cos\theta_{\max}) = P_{\min}(1-\varepsilon\cos\theta_{\min}) = P.\varepsilon(1-\varepsilon\cos\theta_{\varepsilon}) \quad (18.5)$$

Khi chúng ta có phương trình phân bố áp lực trong lớp bôi trơn khí của ổ chiều dài vô hạn.

$$\frac{dp}{d\theta} = \frac{6\mu Ur}{C^2(1-\varepsilon \cos \theta)^2} \left[ 1 - \frac{P_0(1-\zeta \cos \theta_e)}{P(1-\varepsilon \cos \theta)} \right] \quad (18.6)$$

Giải phương trình này là việc xác định hàm số  $P = P(\theta)$  nào đó. Vì phương trình này không tuyến tính nên ta chỉ nhận được phương trình  $P = P(\theta)$  ở dạng bảng sau khi tích phân số phương trình 18.5). Khi tích phân phương trình (18.5) gặp trở ngại lớn là chưa biết áp lực  $P_1$  tại điểm khảo sát của đường cong tích phân. Do đó ta thay áp lực tuyệt đối  $P =$  áp lực tương đối  $\bar{P}$ .

$$\bar{P} = \frac{P}{P_1} \quad (18.7)$$

Vì  $\frac{dp}{d\theta} = P_1 \frac{d\bar{P}}{d\theta}$  nên (18.6) có dạng:

$$\frac{d\bar{P}}{d\theta} = \frac{L_o}{(1-\varepsilon \cos \theta)^2} \left[ 1 - \frac{\bar{C}}{\bar{P}(1-\varepsilon \cos \theta)} \right] \quad (18.8)$$

Trong đó:

$$L_o = \frac{6\mu Ur}{C^2 P_1} \quad (18.9)$$

là đặc tính không thứ nguyên của ổ:

$\bar{C}$  - hằng số chưa biết;

$\bar{C} = \bar{P}(1-\varepsilon \cos \theta)$ .

Điều kiện đầu tiên của tích phân phương trình (18.8) được xác định  $P_1 = \frac{P_1}{Pa} = 1$  (18.10) và cố định đối với điều kiện làm việc bất kì của ổ. Tính bất biến liên hệ với tính bất định trong biểu thức  $L_o$ . Ưu điểm của phương trình (18.8) là tính không thứ nguyên nó cho phép loại bỏ trở ngại của phương trình (18.6). Giá trị của tỉ số giữa  $P_1$  với áp lực khí trời  $P_a$  phụ thuộc vào  $L_o$  và  $\varepsilon$  như thế nào? ảnh hưởng của nó đến đặc tính không thứ nguyên là chỉ ảnh đến giá trị trị số của  $L_o$ ; đặc tính này phụ thuộc vào trị số cụ thể của 5 thông số của nó, có thể tiếp nhận giá trị  $0 < L_o < \infty$  do đó việc giải phương trình xác định được bởi các thông số không thứ nguyên  $L_o$  và  $\varepsilon$ . Từ đó đưa đến quy luật tương tự bôi trơn khí của ổ chiều dài vô hạn.

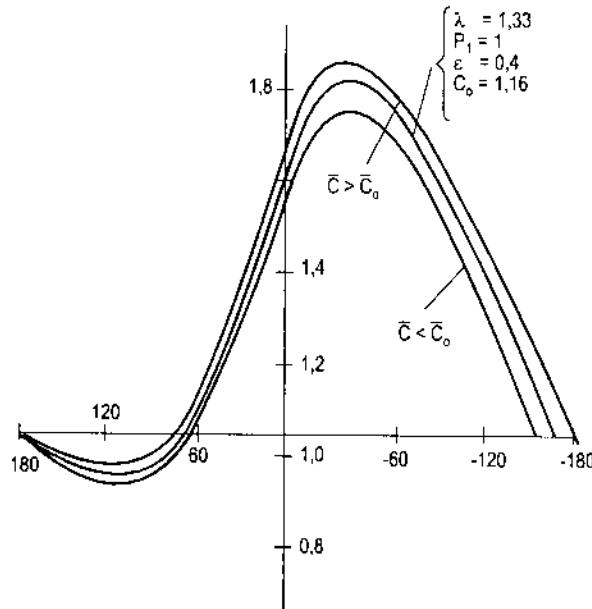
"Các biểu đồ áp lực tuyệt đối trong lớp khí bôi trơn của các ổ làm việc khi đặc tính  $L_o$  và độ lệch tâm tương đối  $\varepsilon$  bằng nhau, đồng dạng".

Quy luật đồng dạng cho phép dẫn đến tích phân bằng số phương trình (18.8) khi biết điều kiện đầu (18.10):  $P_1 = \frac{P_1}{Pa} = 1$  và khi  $\varepsilon$  cố định với một loạt giá trị liên tiếp của  $L_o$ ,

giới hạn  $L_1 = 0$  và  $L_1 < \infty$ . Vì vậy theo biểu đồ tính toán có thể tính được đặc tính không thứ nguyên của lực nâng, mômen ma sát và nhiều yếu tố khác. Việc lập sơ đồ tính toán cho phép xác định các đặc tính đó đối với các giá trị yêu cầu  $L_1, \varepsilon$  bất kỳ.

Trong phương trình (18.8) vẫn còn chưa biết hằng số  $\bar{C}$  vì hiện nay mới chỉ biết tính chất vật lí của nó. Khi không xác định được  $\bar{C}$ , việc giải phương trình phản ánh bởi chùm đường cong có gốc chung  $\bar{P} = 1$  ở điểm  $\theta = +\pi$  giá trị thực tế duy nhất  $\bar{C}_0$  được xác định bằng điều kiện tuần hoàn của áp lực  $\bar{P}$ . Bởi vậy biểu đồ áp lực gián đoạn xung quanh  $\theta = \pi$  nên cần phải có:

$$\bar{P}(-\pi) = \bar{P}(+\pi) = 1 \quad (18.11)$$



Hình 18.2

Ảnh hưởng của đại lượng  $\bar{C}$  đến khoảng chạy của đường cong tích phân chỉ ra trên hình (18.2).

Sau khi chọn giá trị thí nghiệm  $\bar{C}$  và sau khi tích phân chúng ta xác định được hiệu  $\bar{P}(+\pi) - 1$ . Giá trị  $\bar{C}$  được hiệu chỉnh tùy thuộc vào giá trị và dấu của nghiệm, sau khi ngoại suy hoặc nội duy ra  $\bar{C}_0$  thỏa mãn điều kiện (18.11). Trên hình 18.2 giá trị  $\bar{C}_0 = 1,15$ .

Chúng ta xác định liên hệ của áp lực  $P_1$  với áp lực này quy định bằng việc điều chỉnh lưu lượng bôi trơn qua tiết diện tròn của ổ trong quá trình bôi trơn dừng. Trong quá trình dừng tại điểm bất kỳ của khe hở bôi trơn áp lực là không đổi nên theo thời gian thì khối lượng chất bôi trơn không thay đổi. Nhưng áp lực dọc theo đường sinh của ổ bị thay đổi.

Sau khi tách tướng tượng một tiết diện tròn nào đó của lớp bôi trơn có toạ độ  $z$ , chúng ta thấy rằng tại các chỗ bất kỳ trên 2 mép ổ chất bôi trơn chảy hướng ra ngoài mặt đầu còn ở các chỗ khác thì hướng vào giữa ổ. Hướng chuyển động được xác định bằng  $\delta p / \delta z$  trên đoạn nhỏ đã cho. Theo biểu thức (17.16) tính được lưu lượng thể tích chất bôi trơn trên đoạn  $r \cdot \Delta \theta$ :

$$\Delta qt = \frac{h^3}{12\mu} \frac{\delta p}{\delta z} r \Delta \theta \neq 0 \quad (18.12)$$

Tuy nhiên khối lượng tổng cộng của lưu lượng bôi trơn qua tất cả các tiết diện tròn cần phải bằng không vì trong trường hợp ngược lại khối lượng chất bôi trơn trong khe hở thay đổi thời gian, điều đó chỉ không có khi quá trình bôi trơn dừng. Điều kiện này được biểu diễn bằng phương trình:

$$\int_0^{2\pi} dqz \rho r d\theta = 0 \quad (18.13)$$

Sau khi thay thế  $dqz$  bằng biểu thức (18.12) chúng ta có dạng:

(với chú ý  $\frac{p}{\rho} = \text{const}$ )

$$-C \frac{r}{12\mu} \int_0^{2\pi} P \frac{dp}{dz} h^3 d\theta = 0$$

Sau khi dùng quan hệ  $P \frac{\delta p}{\delta z} = \frac{1}{2} \frac{\delta p}{\delta z}$  và rút gọn các hệ số cố định, chúng ta có:

$$\int_0^{2\pi} \frac{\delta P^2}{\delta z} h^3 d\theta = 0$$

Khe hở  $h$  không phụ thuộc vào  $z$ , nó chỉ là hàm số của góc  $\theta$ . Vì vậy có thể đưa nó vào dấu vi phân theo  $z$  và sau đó thay đổi thứ tự của tích phân và vi phân.

$$\int_0^{2\pi} \frac{\delta}{\delta z} (P^2 h^3) dz = \frac{\delta}{\delta z} \int_0^{2\pi} P h^3 d\theta = 0 \quad (18.14)$$

Việc đạo hàm bằng không chứng tỏ rằng tích phân đó có giá trị đáy đối với  $z$  bất kì tức là đối với mọi tiết diện tròn của ống. Về mặt toán học điều đó được biểu diễn bằng phương trình sau:

$$\int_0^{2\pi} P_z^2 h^3 d\theta = \text{const} \quad (18.15)$$

Chỉ số  $z$  biểu thị áp lực thay đổi trên khoảng cách  $z$  tính từ phân giữa của ống. Áp lực  $p$  không đổi và chỉ bằng  $P_a$  ở tiết diện mặt đầu ( $z = \pm \frac{l}{e}$ ) điều đó cho phép xác định hằng số tích phân của phương trình (18.15)

$$\int_0^{2\pi} P_z^2 h^3 d\theta = P_z^2 \int_0^{2\pi} P h^3 d\theta \quad (18.16)$$

Quan hệ (18.16) đúng với ống chiều dài bất kì kể cả chiều dài vô hạn, trong ống chiều dài vô hạn tích phân ở vế trái có thể tính theo bảng giá trị của  $\bar{P}(0)$ . Bảng này được lập khi giải bài toán phẳng đối với  $L_1$  và  $\epsilon$  cho phép xác định tỉ số  $P_1/P_a$ .

Sau khi thay giá trị  $P = \bar{P}P_1$ .

$$\text{và } h = HC = (1 - \varepsilon \cos \theta)c$$

Chúng ta có:

$$\begin{aligned} P_1^2 \int_0^{2\pi} \bar{P}^2 H^3 d\theta &= P_a^2 \int_0^{2\pi} H^3 d\theta = P_a^2 2\pi \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2\right) \\ \text{Do đó: } \frac{P_1}{P_a} &= \left[ \frac{\int_0^{2\pi} H^3 d\theta}{\int_0^{2\pi} \bar{P}^2 H^3 d\theta} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{2\pi \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2\right)}{\int_0^{2\pi} \bar{P}^2 (1 - \varepsilon \cos \theta)^3 d\theta} \right] \end{aligned} \quad (18.17)$$

Vì  $\bar{P}$  và  $H$  là hàm phụ thuộc vào các thông số  $L_1$  và  $\varepsilon$  nên tỉ số (18.17) được xác định đơn tại bằng các giá trị của thông số này.

Đặc tính  $L_1$  có thể thay thế bằng đặc tính đơn trị tương ứng khi cho  $\varepsilon$ .

$$\chi = \frac{1}{\sigma} L_1 \frac{P_1}{P_a} = \frac{\mu Ur}{C^2 P_a} = \frac{\mu \omega}{P_a} \left( \frac{r}{c} \right)^2 \quad (18.18)$$

Đặc tính  $\chi$  có ưu điểm là tất cả các thành phần thông số của nó đều đã biết. Sau khi nhận trung độ của đường cong tích phân (hình 18.2) với tỉ số (18.17) chúng ta có dạng thuận lợi:

$$P = \frac{P_1}{P_a} \bar{P} = \frac{P}{P_a} \quad (18.19)$$

Nếu các biểu đồ đặc tính có dạng bằng các giá trị toạ độ của nó có thể xác định được lực nâng của ổ và mômen ma sát trong ổ.

Lực nâng của ổ bằng tải trọng  $W$  tác dụng lên ngõng (tổng các lực ma sát luôn luôn có thể bỏ qua), được xác định hợp lực của áp lực lớp bôi trơn lên ổ. Sau khi chiếu áp lực  $P$  lên phương tải trọng  $W$  (hình 18.1) chúng ta có công thức để xác định lực nâng có đường kính  $D = 2r$  và chiều dài  $L$ .

$$W = L \int_0^{2\pi} P \cos(\theta + \phi) r d\theta = DLP_a \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} P \cos(\theta + \phi) db \quad (18.20)$$

Trong đó:  $P$  tính theo (18.19)

Nếu cho  $P_a = 1$  thì lực nâng riêng trên một đơn vị diện tích tiết diện hình chiếu của ổ được tính bằng:

$$K_n = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} P \cos(\theta + \phi) d\theta = \frac{W}{DLP_a} \quad (18.21)$$

Vì  $\phi$  chưa biết nên ta không thể tính  $K_n$  theo công thức trên mà phải tính nó qua các hình chiếu liên tục  $x$  và  $y$ .

$$K_n = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (18.22)$$

Trong đó:

$$\begin{cases} X = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} P \cos \theta \cdot d\theta \\ Y = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} P \sin \theta \cdot d\theta \end{cases} \quad (18.23)$$

Đồng thời xác định được góc  $\varphi$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{Y}{X} \quad (18.24)$$

góc này luôn âm bởi vì:

$$C = \frac{W_x}{DLp_a} > 0; Y = \frac{W_y}{DLp_a} < 0 \text{ như thế trên hình vẽ (18.1)}$$

Mômen trên ngõng trục và ống (trên chiều dài L) được xác định theo công thức sau:

$$M = Lr^2 \int_0^{2\pi} \pi d\theta \quad (18.25)$$

Trong đó:

$\tau$  - ứng suất trượt xác định theo (17.4).

Mô men ma sát trên ngõng trục và ống trong trường hợp chung của bài toán không bằng nhau vì trong công thức (17.21) đạo hàm  $du/dy$  có các giá trị khác nhau trên các bề mặt tương ứng. Vì phân biểu thức (18.12) chúng ta có:

$$\frac{du}{dy} = \frac{U}{h} - \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (h - 2y) \quad (18.26)$$

Ứng suất trượt trên ống dương tức là nó hướng theo hướng vận tốc U. Ứng suất trượt trên ngõng trục âm. Vì lúc đó  $\tau = -\mu \frac{du}{dy} / y = h$  thuận tiện hơn cho việc tính toán, chúng ta

xác định.

$$\text{Đối với ngõng trục: } \tau_n = \mu \frac{du}{dy} /_{y=h} = \frac{U\mu}{h} + \frac{h}{2} \frac{dp}{dx} \quad (18.27)$$

Đối với ống:

$$\tau_\delta = \mu \frac{du}{dy} /_{y=0} = \frac{U\mu}{h} - \frac{h}{2} \frac{dp}{dx} \quad (18.28)$$

Sau khi thay các biểu thức này vào phương trình (18.25) và thay  $p = P.P_a$ ;  $x = r\theta$ ;  $h = Hc$  chúng ta có biểu thức tổng quát giá trị tuyệt đối của mô men ma sát trên ngõng trục  $M_n$  (mang dấu +) và trên ống  $M_o$  (mang dấu -).

$$M_{n,o} = \frac{r^2 U \mu L}{c} \left[ \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{H} \pm \frac{C^2 P_a}{2\mu Ur} \int_0^{2\pi} H \frac{dp}{d\theta} d\theta \right] \quad (18.29)$$

Chúng ta sẽ biến đổi phương trình này. Tích phân (từ trái sang phải) thứ nhất bằng  $\frac{2\pi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}$ . Tích phân thứ 2 được đưa về dạng đơn giản hơn để tính toán: (sử dụng tích phân phân đoạn).

$$\int_0^{2\pi} H \frac{dp}{d\theta} d\theta = HP \Big|_0^{2\pi} - \int_0^{2\pi} P \frac{dH}{d\theta} d\theta$$

Trong đó:

$$HP \Big|_0^{2\pi} = 0 \text{ vì } H \text{ và } P \text{ là hàm tuần hoàn và } \int_0^{2\pi} P \frac{dH}{d\theta} d\theta = -\varepsilon \int_0^{2\pi} P \sin \theta d\theta = -2\varepsilon Y \text{ với}$$

$Y$  được tính theo (18.23)

Sau khi so sánh hệ số tích phân của tích phân thứ 2 trong công thức (18.29) với đặc tính  $X$  của ô trong công thức (18.18), chúng ta có biểu thức tính mômen ma sát (khi thay các giá trị tính toán trên vào 18.29):

$$M_{n,o} = \frac{2\pi r^2 \mu UL}{C} \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} (1 \pm K_T) \quad (18.30)$$

Trong đó  $K_T$  là hệ số ma sát của dòng ngược:

$$K_T = -\frac{\varepsilon \sqrt{1-\varepsilon^2}}{2\pi \chi} Y \quad (18.31)$$

Tỉ số mômen trên ngõng và ô:

$$\frac{M_n}{M_o} = \frac{1 + K_T}{1 - K_T} \quad (18.32)$$

Nguồn gốc không bằng nhau của các mô men trên là sự xuất hiện dòng ngược trong lớp bôi trơn khi có độ lệch tâm  $\varepsilon$  (tức là khi chịu tải).

Vì vậy lực nâng riêng  $K_n$ , góc lệch  $\varphi$  và hệ số ma sát dòng ngược  $K_T$  cũng như biểu đồ đặc tính được xác định bằng 2 chuẩn số tương tự  $\chi$  và  $\varepsilon$ .

Bài toán bôi trơn khí của ổ trụ dài vô tận đến việc tính toán cho một loạt cặp chuẩn số đó trong phạm vi  $0 \leq \chi \leq \infty$  và  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  của biểu đồ đặc tính và các đặc tính tính toán  $K_n$ ,  $\varphi$ ,  $K_T$ .

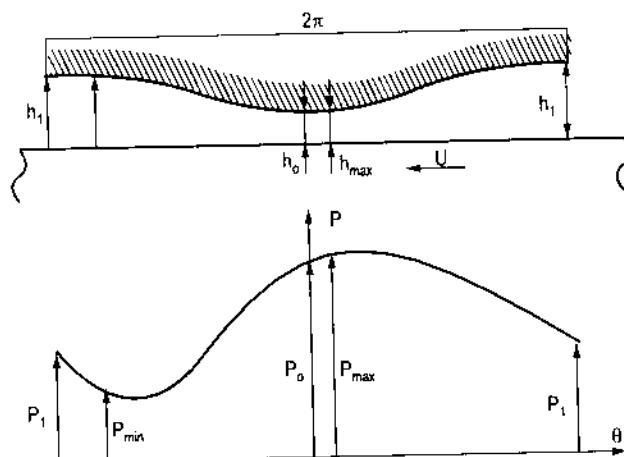
Các bảng quan hệ của đặc tính với chuẩn số được xây dựng theo sơ đồ của chúng cho phép nghiên cứu tổng quát các tính chất bôi trơn khí và tính ổ trong trường hợp giới hạn  $\chi \rightarrow 0$  và  $\chi \rightarrow \infty$ . Việc nghiên cứu bắt đầu từ các giới hạn này, phân tích chúng cho phép phát hiện các khả năng quan trọng của bôi trơn khí.

#### 18.1.1.1. Trường hợp giới hạn $\chi \rightarrow \infty$

Chúng ta khảo sát sự liên hệ giữa biểu đồ áp lực trong lớp bôi trơn của ổ với vận tốc trượt  $U$  khi cho độ lệch tâm  $\varepsilon$  không đổi. Điều đó có thể đạt được bằng cách tăng tải trọng tương ứng tùy độ tăng vận tốc.

Chúng ta theo dõi sự tăng  $U$  là nguyên nhân rõ nhất của tăng  $\chi$ . Từ biểu thức (18.18) ta thấy sự tăng của  $\chi$  không phải chỉ có tăng  $U$  mà còn do giảm khe hở  $C$  hoặc áp lực  $P$ .

Khi vận tốc quay rất nhỏ, áp lực trong lớp bôi trơn gần bằng áp lực khí trời. Khi tăng  $U$ , xuất hiện vùng áp lực cao và vùng áp lực thấp. Trong tiết diện  $h_{\max}$  nào đó có áp lực  $P_{\max}$  (của vùng áp lực cao) và ở tiết diện  $h_{\min}$  của vùng áp lực thấp có áp lực  $P_{\min}$  (hình 18.3). Tỉ số của các áp lực cực trị này tăng khi vận tốc trượt tăng, nhưng chúng không vượt quá tỉ số khe hở lớn nhất của ô.



Hình 18.3

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \leq \frac{h_1}{h_0}$$

Các trị số  $h_1$  và  $h_0$  xác định theo công thức:

$$h_0 = C(1 - \varepsilon)$$

$$h_1 = C(1 + \varepsilon)$$

từ phương trình (18.5) ta có quan hệ sau:

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{h_{\min}}{h_{\max}}$$

Nhưng trị số  $h_{\min}$  và  $h_{\max}$  phải nằm trong khoảng  $h_0 \div h_1$  (hình 18.3)

Kí hiệu  $\Delta_1$  và  $\Delta_2$  là các số dương ta có thể viết:

$$h_{\max} = h_0 + \Delta_1; h_{\min} = h_1 - \Delta_2$$

Do đó:

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{h_1 - \Delta_2}{h_0 + \Delta_1} \leq \frac{h_1}{h_0} \quad (18.33)$$

Thoả mãn yêu cầu trên.

Khi giả thiết rằng: dòng chảy tầng, chúng ta khảo sát sơ đồ hàm  $P(0)$  khi  $U \rightarrow \infty$ . Vì (18.16) đúng khi  $U$  bất kì nên hàm này sẽ bị chặn, đạo hàm  $dp/d\theta$  của nó hữu hạn trong phạm vi  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ .

Tiết diện  $h_{\max}$  và  $h_{\min}$  không thể nằm cùng một độ vì theo điều kiện (18.5) chỉ khi  $U = 0$  thì  $P_{\max} = P_{\min}$ . Vì  $P_{\max} - P_{\min}$  hữu hạn nên trong phạm vi giữa các điểm cực trị phải tồn tại 1 hay một vài khoảng thay đổi của  $\theta$  sao cho  $dp/d\theta$  hữu hạn trên khoảng đó theo phương trình (18.12) và chú ý đến (18.2) chúng ta có:

$$U = \left[ \frac{U}{h} - \frac{1}{2\mu r} \frac{dp}{d\theta} (h - y) \right] y$$

Trong đó  $dp/d\theta$  là đại lượng hữu hạn thành phần  $\frac{1}{2\mu r} \frac{dp}{d\theta} (h - y)$  trở nên rất nhỏ so với thành phần  $\frac{U}{h}$  khi  $U \rightarrow \infty$  do đó

$$U_{U \rightarrow \infty} = U \frac{y}{h} \quad (18.34)$$

Tức là biểu đồ phân bố vận tốc theo chiều cao khe hở suy biến parabol thành đường thẳng. Lưu lượng thể tích qua tiết diện  $h$  được xác định như sau:

$$q_{U \rightarrow \infty} = \int_0^h U dy = U \frac{h}{2}$$

Nhưng đối với bôi trơn đàn hồi cần chú ý đến điều kiện không đổi của khối lượng chất bôi trơn qua tiết diện bất kì (18.13)  $q.p = \text{const}$ . Do đó đối với khoảng bất kì  $dp/d\theta$  là đại lượng hữu hạn, chúng ta có.

$$\left| PH \right|_{U \rightarrow \infty} = \text{const} \quad (18.35)$$

Phương trình này đúng với toàn bộ ống. Nếu biết áp lực Pa tại 1 điểm nào đó xác định bởi góc A thì theo (18.17) chúng ta có dạng quy luật phân bố áp lực là:

$$P/\chi_{\rightarrow \infty} = P_a \frac{hA}{h} = P_a \frac{1 - \varepsilon \cos \theta A}{1 - \varepsilon \cos A} \quad (18.36)$$

Phương trình (18.36) chỉ ra rằng: khi  $\chi \rightarrow \infty$  thì áp lực lớn nhất  $p_{\max} = p_o$  tại tiết diện ho và áp lực nhỏ nhất  $P_{\min} = p_1$  tại tiết diện  $h_1$ . Tỉ số các áp lực cực trị bằng tỉ số khe hở lớn nhất và nhỏ nhất có giá trị bằng:

$$\left. \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right|_{\chi \rightarrow \infty} = \frac{h_1}{h_o} = \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (18.37)$$

Phương trình (18.36) chỉ ra rằng khi  $\chi \rightarrow \infty$  thì sự tăng áp lực (do khối khí) tại một điểm bất kì (xác định bởi góc A) gây ra sự tăng áp lực tỉ lệ tại tất cả các điểm của ống hiều quả lớn nhất là làm tăng áp lực nhỏ nhất  $P_1$  ở tiết diện lớn nhất  $h_1$ . Khi đã cho áp lực  $P_1$ , từ biểu thức (18.36) chúng ta có phương trình phân bố áp lực:

$$P = P_1 \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon \cos \theta} \quad (18.38)$$

Vậy ta nhận thấy rằng:

1. Khi tăng  $\chi$  các điểm có áp lực cực trị gần với các tiết diện lớn nhất và nhỏ nhất của khe hở bôi trơn. Nó trùng nhau khi  $\chi = \infty$ .

Tỉ số giới hạn của các áp lực cực trị đạt được khi  $\chi = \infty$  và nó bằng tỉ số của khe hở lớn nhất với khe hở nhỏ nhất của ống. Lúc đó tại tiết diện bất kỳ của ống, tích của áp lực với khe hở là đại lượng không đổi  $|Ph|_{\chi \rightarrow \infty} = \text{const}$  (18.39)

2. Khi tăng  $\chi$  làm tăng hiệu quả thổi khí lớn nhất ở tiết diện  $h_1$  trong khi áp lực là nhỏ nhất.

3. Khi  $\chi \rightarrow \infty$  tại tiết diện bất kỳ của lớp bôi trơn ta xác định được quy luật phân bố vận tốc là tuyến tính còn dòng bôi trơn ngược nhỏ so với dòng cơ bản.

Để xác định lực nâng của lớp khí bôi trơn khi  $\chi \rightarrow \infty$  chúng ta tìm quan hệ giữa vị trí ngõng trực với tải trọng ngoài tác dụng lên nó dẫn đến phải tìm trị số và hướng của tải trọng này để ngõng ở vị trí cân bằng.

Tại thời điểm bất kỳ xác định bởi góc A trên cung nhỏ do có các lực tác dụng:

+ Áp lực  $p.ds$  hướng đến tâm O

$$p.ds = P_1 \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon \cos \theta} ds$$

$$+ \text{Lực ma sát } \tau_n.ds = \left| \frac{du}{dy} \right|_{y=y} \mu ds$$

Hướng ngược chiều quay và tiếp tuyến với trực.

Trong trường hợp khảo sát U được xác định theo (18.34) nên ứng suất trượt trên ngõng trực và ống như nhau:

$$\begin{aligned} \left| \frac{du}{dy} \right|_{y=0} &= \frac{U}{h} = \frac{U}{C(1 - \varepsilon \cos \theta)} \\ \tau &= \frac{U\mu}{C(1 - \varepsilon \cos \theta)} \end{aligned} \quad (18.40)$$

Tại  $A_1$  đối xứng với A qua đường thẳng OC các lực  $p.ds$  và  $\tau.ds$  như nhau về trị số (vì khe hở h ở các điểm này bằng nhau) và về hướng đối với trực. Tổng hình học của các lực  $p.ds$  hướng thẳng đứng lên trên, còn tổng hình học của các lực  $\tau.ds$  hướng sang phải. Do đó tổng hợp lực có tính cả các lực tác dụng số lệch với OC một góc  $\phi$  nào đó.

Hợp lực  $\Sigma P$  của các lực  $p.ds$  khi chiếu lên phương OC bằng:

$$\sum P = \int_0^{2\pi} p \cdot \cos \theta \cdot r \cdot d\theta = \int_0^{2\pi} p_1 \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon \cos \theta} r \cos \theta \cdot d\theta = p_1 \cdot r \cdot (1+\varepsilon) \cdot J \quad (18.41)$$

$$J = \int_0^{2\pi} \frac{\cos \pi}{1-\varepsilon \cos \varphi} d\theta \quad (18.42)$$

Hợp lực của các lực ma sát tìm theo công thức (18.40) đổi với hướng trượt  $\tau$ .

$$R_\tau = \int_0^{2\pi} \tau \cos \theta r d\theta = \int_0^{2\pi} \frac{U r \mu \cos \theta}{c(1-\varepsilon \cos \theta)} d\theta = \frac{U r \mu}{c} J$$

Chia  $R_\tau$  cho  $\sum P$  chúng ta tìm được góc  $\varphi$ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_\tau}{\sum P} = \frac{U r \mu}{C p_1 (1+\varepsilon)} \quad (18.43)$$

Tỉ số  $1/(1 + \zeta)$  có thể thay đổi trong phạm vi  $0,05 \div 1$ . Do đó khi  $U \rightarrow \infty$  góc  $\varphi = \pi/2$ . Tuy nhiên trong thực tế  $U \leq 200\text{m/s}$ , ngoài ra khi áp lực tại  $h_1$  bằng áp lực khí trời  $p_1 = 104 \text{kG/m}^2$ ; trị số khe hở trong bình  $C = 0,005\text{mm}$  (ít dùng khi vận tốc lớn)  $\varepsilon = 0$ ;  $\mu = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{kG/m}^2 \cdot \text{s}$ ; trị số góc  $\varphi$  lớn nhất trong thực tế: (khi  $U \rightarrow \infty$ ).

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{200 \cdot 1,96 \cdot 10^{-6}}{10^4 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 7,6 \cdot 10^{-3} \rightarrow \varphi = 0^\circ 26' < 0,5^\circ$$

Trị số  $\varphi$  tìm được chỉ ra rằng hợp lực của các lực ma sát  $R_\tau$  không đáng kể so với hợp lực của áp lực trong lớp bôi trơn ngay cả khi vận tốc lớn (khi đó  $\sum P$  thực tế không tăng còn  $R_{\tau \text{tang}}$  tỉ lệ bậc nhất với  $U$ ). Vì vậy khi  $U \rightarrow \infty$  có thể, cho rằng tải trọng  $W$  trùng với  $\sum P$ , cả về hướng và trị số. Vì khi giảm  $U$  thì  $R_\tau$  giảm nhanh hơn so với  $\sum P$  nên kết luận trên càng đúng với trường hợp trung bình.

Khi  $\varepsilon = b$  hợp lực  $R_\tau = 0$  và mômen ma sát hầu như không phụ thuộc vào  $\tau$ .

Trong trường hợp  $\chi \rightarrow \infty$ ,  $R_\tau$  và  $\sum P$  trùng nhau về hướng, lúc đó  $R_\tau$  không ảnh hưởng đến giá trị của góc  $\varphi$  trên biểu đồ áp lực bằng  $90^\circ$ .

Từ đó ta có các kết luận về tính chất của bôi trơn khí nữa là:

4. Ảnh hưởng của lực ma sát đến trị số góc  $\varphi$  có thể loại trừ khi  $\chi$  bất kì và có thể coi tải trọng  $W$  bằng hợp lực của áp lực  $\sum P$  về cả hướng và trị số.

5. Khi tăng vận tốc quay, góc  $\varphi$  thay đổi từ  $90^\circ$  (khi  $\chi \rightarrow \infty$ ) đến  $0^\circ$  (khi  $\chi \rightarrow 0$ )

### 18.1.1.2. Lực nâng giới hạn khi $\chi \rightarrow \infty$

Lực nâng giới hạn ở trên chiều dài  $L$  được tính theo công thức sau:

$$W_{\chi \rightarrow \infty} = P_1 2rL\pi \left[ \sqrt{\frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon}} - (1+\varepsilon) \right] \frac{1}{\varepsilon} \quad (18.44)$$

Biểu diễn  $P_1$  qua  $P_a$  sau khi sử dụng biểu thức (18.17) chúng ta tìm được:

$$\frac{P_1}{P_a} = \frac{\sqrt{(1 + \frac{3}{2}\varepsilon^2)}}{1 + \varepsilon} \quad (18.45)$$

Do đó chúng ta có biểu thức tính lực nâng riêng khi  $\chi \rightarrow \infty$

$$K_n_{\chi \rightarrow \infty} = \frac{W}{P_a L D} = \pi \sqrt{1 + \frac{3}{2}\varepsilon^2} \left( \sqrt{\frac{1}{1-\varepsilon^2}} - 1 \right) \frac{1}{2} \quad (18.46)$$

Khác với trường hợp chung (18.21)

$K_n_{\chi \rightarrow \infty}$  chỉ phụ thuộc vào  $\varepsilon$ . Công thức (18.46) chỉ ra rằng khi có tải trọng trên ngõng trực (ngay cả khi  $U \rightarrow \infty$ ) ngõng trực không thể ở tâm ống vì khi  $\varepsilon \rightarrow 0$  biểu thức (18.46) tiến đến 0.

$$\text{Vì } \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sqrt{1 + \frac{3}{2}\varepsilon^2} = 1 ; \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sqrt{\frac{1}{1-\varepsilon^2}} - 1 \frac{1}{2} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\varepsilon}{2} = 0$$

Khi  $\chi \rightarrow \infty$  trong trường hợp khảo sát, ứng suất trượt trên ngõng trực và ống trùng nhau về giá trị tuyệt đối (theo biểu thức (18.40) do đó giá trị mômen trên ngõng trực và ống được xác định theo (18.30) sẽ như nhau. Thật vậy khi góc lệch  $\phi_{\chi \rightarrow \infty} = 0$  thì thành phần của lực nâng  $Y = 0$ . Do đó hệ số ma sát dòng ngược  $K_t_{\chi \rightarrow \infty} \rightarrow 0$  và như vậy mô men ma sát sẽ bằng:

$$M_{n,o} = \frac{2\pi r^2 \bar{\omega} UL}{C} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \quad (18.47)$$

Chúng ta bổ sung thêm các kết luận sau khi nghiên cứu tính chất ống khí vận tốc quay cao:

6. Khi bôi trơn khí trị số lực nâng giới hạn đạt được khi  $\chi \rightarrow \infty$  tương ứng với mỗi giá trị của độ lệch trên tương đối.
7. Khi có tải trọng ngõng trực không thể ở vị trí tâm ngay cả khi  $\chi \rightarrow \infty$ . Khi  $\chi \rightarrow \infty$  ngõng trực bị dịch chuyển theo hướng của tải trọng ( $\varphi = 0$ ).
8. Lực ngõng trực của lớp bôi trơn khi  $\chi \rightarrow \infty$  tỉ lệ với áp lực môi trường (chính xác hơn là tỉ lệ với áp lực trên 2 mặt đầu của ống) do đó khi  $\chi$  lớn, lực nâng có thể tăng do thời điểm khí nén vào khe hở bôi trơn trên 2 mặt của ống có tác dụng ở tiết diện  $h_1$  vì ở đây áp lực là nhỏ nhất.

9. Khi  $\chi \rightarrow \infty$  mô men ma sát trên ngưỡng trực và Ổ bằng nhau. Hệ số ma sát dòng ngược tiến đến 0.

### 18.1.1.3. Trường hợp giới hạn $\chi \rightarrow 0$

Khi giảm vận tốc trượt (hoặc tăng áp lực  $p_a$ ) biểu đồ áp lực trong lớp bôi trơn trở thành đường thẳng  $p = \text{const}$  bởi vì  $dp/d\theta$  tiến đến 0 cùng với  $\chi$  (phương trình 18.10). Vì vậy  $\chi \rightarrow 0$  tỉ số  $P_{e/p}$  tiến đến 1 phương trình (18.6) do ảnh hưởng của nó đến giá trị của tích.

$(1 - \varepsilon \cos \theta_e)(1 - \varepsilon \cos \theta)$  rất nhỏ so với ảnh hưởng của tỉ số  $\frac{1 - \varepsilon \cos \theta_e}{1 - \varepsilon \cos \theta}$  do đó ta có phương trình (18.6) ở dạng giống với phương trình của bôi trơn lỏng. Điều này có ý nghĩa vật lí là khi giảm độ chênh áp của lớp bôi trơn làm giảm ảnh hưởng của độ đàn hồi của khí cho nên các tính chất của bôi trơn khí và bôi trơn lỏng giống nhau, ta có thể sử dụng kết luận sau:

Khi  $\chi \rightarrow 0$  chỉ  $p_1 = p_a = p_o$  và đường kính  $L_1$  có thể thay bằng  $\chi$  theo quan hệ (18.18) và dẫn đến  $L_1 = G\chi$ . Phương trình biểu diễn quy luật phân bố áp lực có dạng xác định.

$$P = \frac{P}{P_a} = 1 + \chi \frac{6\varepsilon}{2 + \varepsilon^2} \cdot \frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta} \left(1 + \frac{1}{\varepsilon \cos \theta}\right) \quad (18.48)$$

Cũng lí luận tương tự như trường hợp  $\chi \rightarrow \infty$  ta thấy rằng trong trường hợp này  $\sum P_u ds$  hướng vuông góc với đường tâm. Hướng của hợp lực ma sát cũng vậy. Do đó chúng ta không xác định được dạng của vô cùng nhỏ  $R_\tau$ . Tỉ số  $\frac{R_\tau}{\sum P_u ds}$  có bậc c/r.

Lực nâng riêng phần được xác định theo công thức:

$$K_n = \frac{W}{DLP_a} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} P_u \sin \theta d\theta$$

$$K_n = \chi \frac{6\pi\varepsilon}{(2 + 6^2)\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \quad (\text{khi } \tau \rightarrow 0) \quad (18.49)$$

Từ (18.49) ta thấy rằng lực nâng không phụ thuộc vào áp lực vào môi trường. Điều đó dẫn đến kết luận sau:

10. Khi vận tốc quay nhỏ (khi  $\chi \rightarrow 0$ ) việc bôi khí nén vào khe hở bôi trơn không làm tăng lực nâng của Ổ.

Mô men ma sát trong trường hợp  $\chi \rightarrow 0$ . Mômen ma sát trên ngõn trực và Ổ được xác định bằng biểu thức (18.30). Trong trường hợp này  $\varphi = 90^\circ$  nên biểu thức (18.22) có  $Y = K_n$  trong đó  $K_n$  được xác định bằng (18.49) do đó sau khi thế vào (18.31) ta có:

$$K_T /_{x \rightarrow 0} = \frac{3\epsilon^2}{2 + \epsilon^2} \quad (18.50)$$

### 18.1.2. Tính toán đối với ống chiềudài hữu hạn ở chế độ làm việc dừng

Dòng bôi trơn khí phổ biến trong ống có kích thước giới hạn ở chế độ làm việc dừng được biểu diễn bởi phương trình tổng quát (17.26):

$$\frac{\partial}{\partial x}(pqx) + \frac{\partial}{\partial t}(pqz) = 0$$

Sau khi thay biến thức  $q_x$  và  $q_z$  vào phương trình trên ta có:

$$\frac{\partial}{\partial x}(ph^3 \frac{df}{dx}) + \frac{\partial}{\partial t}(ph^3 \frac{\partial p}{\partial t}) - 6\mu u \frac{\partial(ph)}{\partial x} = 0 \quad (18.51)$$

Đây là phương trình tổng quát cho mọi dạng ống cụ thể ta thay  $h =$  các tham số tương ứng với loại ống đó. Đối với ống trục chiềudài vô hạn thì các thông số không thứ nguyên được biểu diễn bằng các biến thức (18.3); (18.4) và (18.7). Đối với ống có chiềudài hữu hạn thì phải bổ sung thêm toạ độ z. Trục z hướng dọc theo đường tròn ống và được biểu diễn qua biến không thứ nguyên  $\zeta$  với:

$$z = \zeta \cdot L / 2 ; \quad 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (18.52)$$

Chọn gốc tinh Z và ở giữa ống và do ống đối xứng nên chỉ khảo sát một nửa ống.

Khi đưa các thông số đó vào phương trình (18.51) chúng ta có phương trình phân bố áp lực trong ống trục:

$$\frac{\partial}{\partial \theta}(PH^3 \frac{\partial P}{\partial gq}) + \chi_1^2 \frac{\partial}{\partial \xi}(PH^3 \frac{\partial P}{\partial \xi}) - 6\chi \frac{\partial(PH)}{\partial \theta} = 0 \quad (18.53)$$

Trong đó:  $\lambda_1$  - đường kính tương đối của ống. Nó giá trị ngược với chiềudài tương đối  $\lambda_1 = \frac{D}{L} = \frac{1}{\lambda}$ ;  $\Rightarrow \lambda = \frac{L}{D}$

Do đó bài toán bôi trơn khí ống chiềudài hữu hạn là biến thức biến đổi phương trình không tuyến tính có tích phân riêng phần dạng elip trong miền chữ nhật:

$$\begin{aligned} 0 < \theta < 2\pi \\ 0 < \zeta < 1 \end{aligned} \quad (18.55)$$

Và có điều kiện biên:

$$\begin{aligned} P(0, \zeta) = P(2\pi, \zeta); \quad \frac{\partial P}{\partial \theta}(0, \xi) = \frac{\partial P}{\partial \theta}(2\pi, \xi) \\ P(\theta, 1) = 1; \quad \frac{\partial P}{\partial \xi}(\theta, 0) = 0 \end{aligned} \quad (18.56)$$

Việc ống hở có góc ôm  $\beta < 2\pi$  sẽ có điều kiện biên là:

$$P(\theta, \xi) = 1; \quad P(\beta, \xi) = 1; \quad P(\theta, 1) = 1$$

$$\frac{\partial P}{\partial \xi}(0, 0) = 0$$

Vì phần này và điều kiện biên trên luôn như nhau nên chúng ta có quy luật đồng dạng. Hình dạng của vùng đặc tính áp lực (biểu đồ không gian) của ống hữu hạn có bôi trơn khí và tất cả các đặc tính tính toán không thứ nguyên của nó được xác định bằng 3 chuẩn số không thứ nguyên, đồng dạng. Ba chuẩn số đó gồm:

- Đặc tính ống:  $\chi = \frac{Mw}{pa} \left( \frac{r}{c} \right)^2$
- Chiều dài tương đối:  $\lambda = \frac{L}{D}$
- Độ lệch tâm tương đối:  $\epsilon = e / c$ .

Bài toán bôi trơn khí trong ống chiều dài hữu hạn dẫn đến việc tính tích phương trình (18.53) đối với các hằng tham biến  $\chi$  và  $\epsilon$  khi  $\lambda$  có các giá trị khác nhau sau đó xây dựng đồ thị tính toán như làm với ống chiều dài vô hạn. Có nhiều phương pháp giải quyết bài toán này. Ở đây trình bày phương pháp của Räynol.

Chúng ta vi phân theo  $\epsilon$  phương trình (18.53) khi cứ mỗi thành phần như tích của 2 hàm số:

$$P(H^3 \frac{\partial P}{\partial \theta}); P(H^3 \frac{\partial P}{\partial \xi}) \text{ và } PH$$

Chúng ta nhận được phương trình:

$$\begin{aligned} & P \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( H^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \lambda_1^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left( H^3 \frac{\partial P}{\partial \xi} \right) - 6\chi \frac{\partial H}{\partial \theta} \right] \\ &= -H^3 \left[ \left( \frac{\partial}{\partial \theta} \right)^2 + \lambda_1^2 \left( \frac{\partial P}{\partial \xi} \right)^2 + 6\chi H \frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \end{aligned} \quad (18.57)$$

Phương trình này chia ra phần tuyến tính và không tuyến tính nên nó thuận tiện cho việc biến đổi được thực hiện tích phân số trên máy tính IBM. Thật vậy chúng ta chia phương trình (18.57) từng vế theo  $P_\chi$  và chú ý là  $\frac{\partial P}{\partial \theta} = \chi \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta}$  thì phương trình (18.53) có dạng vật lí rõ ràng.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \theta} \left( H^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) + \lambda_1^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left( H^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} \right) - 6 \frac{\partial H}{\partial \theta} \\ &= \chi \left\{ - \frac{H}{P} \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial \theta} \right)^2 + \lambda_1^2 \left( \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} \right)^2 \right] + \frac{6H}{P} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right\} \end{aligned} \quad (18.58)$$

Khi  $\chi \rightarrow 0$  các thành phần không tuyến tính trên đến 0, như đã thấy trực tiếp từ

$$(18.58) P_{\chi \rightarrow 0} = 1 \text{ còn đạo hàm } \frac{\delta \bar{P}}{\delta \theta} \dots \text{ là các đại lượng hữu hạn.}$$

Bằng các phương pháp biến đổi và đổi biến Räynol đã giải bằng tích phân số trên máy tính phương trình (18.57) với độ chính xác tính toán bằng 0,005. Thí dụ được chỉ ra trên hình (18.4) là phạm vi áp lực trong ống và  $\lambda = 2$ ;  $\chi = 1$ ;  $\epsilon = 0,4$  (khi áp lực môi trường  $P_a = 1 \text{ kG/cm}^3$ , các đường đẳng áp có thứ nguyên là  $\text{kG/cm}^2$ ).

Khi đã biết phạm vi áp lực trong ống có thể tính lực nâng và mô men ma sát của nó. Lúc này được tính theo công thức (18.21)  $W = D.L.P_a.K_n$  trong đó  $K_n$  là lực nâng riêng phần được xác định bằng các phương trình:

$$K_n = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

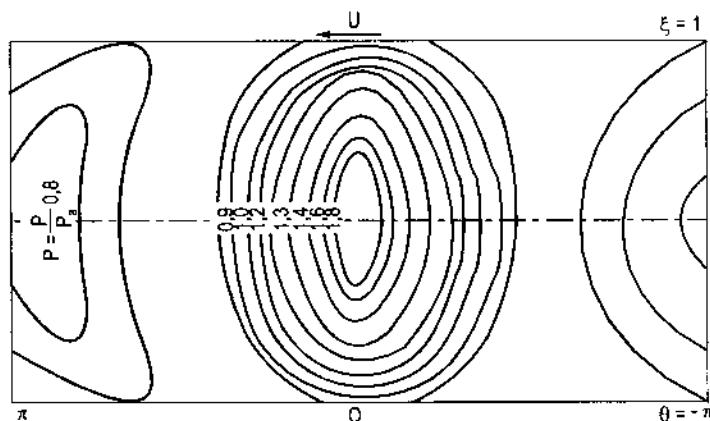
$$\text{Trong đó: } X = \frac{1}{2} \int_0^1 d\xi \int_0^{2\pi} P \cos \theta d\theta; Y = \frac{1}{2} \int_0^1 d\xi \int_0^{2\pi} P \sin \theta d\theta \quad (18.59)$$

Góc lệch  $\varphi$  tính theo (18.24)  $\varphi = \operatorname{atg} Y/X$

Mô men ma sát trên ngõng và ống trực được theo công thức (18.30)

$$M_{n,0} = \frac{2\pi r^2 \mu U L}{C} \frac{1}{\sqrt{1-\epsilon^2}} [1 \pm K_T]$$

$$\text{Trong đó: } K_T = -\frac{\epsilon \sqrt{1-\epsilon^2}}{2\pi x} Y$$



Hình 18.4: Trường áp lực trong ống chiều dài hữu hạn

Để tính X và Y ta sử dụng phương pháp tích phân số, cũng như trong bài toán phẳng chỉ khi tính tích phân kép mới sử dụng tích phân số và để tính toán dưới dấu tích phân.

Ta xét các trường hợp giới hạn khi  $\chi \rightarrow \infty$  và  $\chi \rightarrow 0$

### 18.1.2.1. Trường hợp giới hạn $\chi \rightarrow \infty$

Để khảo sát trường hợp  $\chi \rightarrow \infty$  chúng ta sử dụng phương trình dòng chảy 3 chiều (18.53).

Khi tăng  $\chi$ , sự biến thiên áp lực trong phần giữa của ống tăng. Nhưng nó không lớn hơn sự biến thiên áp lực trong ống chiều dài vô hạn tương tự trong tất cả các trường hợp (khi cùng  $\chi$  và  $\xi$ ). Khi đó biểu đồ áp lực được xác định bằng phương trình (18.39):

$$H.P/\chi \rightarrow \infty = \text{const}$$

$$\lambda \rightarrow \infty$$

Có như vậy là do trong ống chiều dài hữu hạn có dòng chảy chiều trực làm giảm áp lực trong khe hở. Do đó khi  $\chi \rightarrow \infty$  áp lực tại mọi điểm bất kỳ của tiết diện trung bình là hữu hạn. Biểu đồ áp lực dọc theo đường tâm  $\xi$  là đường cong tròn. Trong trường hợp tổng quát có cực trị ở giữa. Do đó các đạo hàm thứ nhất và thứ hai trong phương trình (18.53) là hữu hạn. Từ đó rút ra tại tiết diện bất kỳ các thành phần của phương trình (18.53) có trị số hữu hạn khi  $\chi \rightarrow \infty$  và khi  $\chi \rightarrow \infty$  thì  $\frac{\partial(PH)}{\partial\theta}|_{\chi \rightarrow \infty} \rightarrow 0$ .

Tích phân phương trình trên ta có hệ thức sau:

$$PH|_{\chi \rightarrow \infty} = \text{const} \quad (18.60)$$

Tức là biểu đồ áp lực tại tiết diện bất kỳ của ống (không trùng với 2 mặt đầu) giống như tại phần giữa của ống chiều dài vô hạn tương tự. Sự khác nhau đó được quy ước bằng các tích số khác nhau của áp lực  $P_1$  tại tiết diện  $h_1$ . Nó không thể loại trừ bằng cách xác định tỉ số  $\frac{P_1}{P_d}$  theo công thức (18.45). Từ đó thấy rằng khi tăng  $\chi$ , biểu đồ áp lực dọc đường tâm  $\xi$  có dạng gần giống hình chữ nhật (hình 18.4) tức là tạo phần giữa của ống

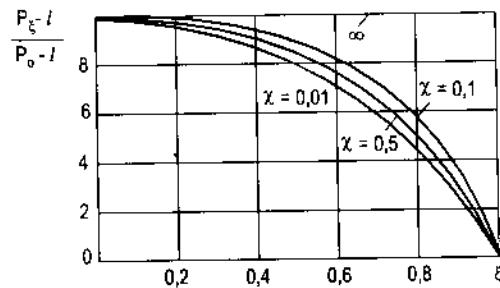
$$\frac{\partial P}{\partial \xi} \Big|_{\xi < 1} \xrightarrow{\chi \rightarrow \infty} 0. \quad (18.61)$$

$$\text{Cũng như trên hai mặt đầu của nó: } \frac{\partial P}{\partial \xi} \Big|_{\xi = 1} \xrightarrow{\chi \rightarrow \infty} \infty \quad (18.62)$$

Phương trình (18.53) duy trì điều đó. Khi  $\xi = 1$ ;  $p = \text{const}$  và  $\frac{\partial H}{\partial \theta} \neq 0$  nên thành phần thứ 3 của phương trình trở thành vô cùng lớn. Điều đó chỉ xảy ra khi thành phần thứ 2 tiến đến vô cùng đến (18.62).

Ý nghĩa vật lí của biểu đồ là dòng bôi trơn dọc trục  $\xi$  trở nên vô cùng nhỏ so với dòng bôi trơn vòng quanh tăng vô hạn. Do đó sự sụt áp do chúng gây ra khi  $\chi \rightarrow \infty$  tiến đến 0. Ta đi đến kết luận rằng:

Tất cả các tính chất của ống chiều dài hữu hạn khi  $\chi \rightarrow \infty$  phù hợp với các tính chất của ống chiều dài vô hạn, do vậy lực nâng cũng riêng phần, hệ số ma sát dòng ngược được tính theo các công thức như ống chiều dài vô hạn.



**Hình 18.5:** Ảnh hưởng của giá trị  $\chi$  đến sự phân bố áp lực theo sự tạo thành của ống

### 18.1.2.2. Trường hợp giới hạn $\chi \rightarrow 0$

Trong trường hợp  $\chi \rightarrow 0$  phương trình các thông số không thứ nguyên của sự phân bố áp lực trong ống trụ chiều dài hữu hạn có dạng:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left( H^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) + \lambda_1^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left( H^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} \right) - 6 \frac{\partial H}{\partial \theta} = 0 \quad (18.63)$$

Người ta đã chứng minh được rằng: hàm số phải tìm  $\bar{P}(\xi, \theta)$  là hàm lẻ của  $\theta$  tức là với  $\xi$  bất kì  $\bar{P}(\xi, \theta) = \bar{P}(\xi, -\theta)$  như mục [2]. Hàm này thoả mãn điều kiện biên (18.56) và điều kiện bổ sung là:

$$\bar{P}(\xi, \theta) = 0; \bar{p}(\pi, \xi) = 0 \quad (18.64)$$

Do đó đơn giản tính tích phân số phương trình (18.63) chỉ cần tích phân trên  $1/2$  đường tròn.

Đồng thời kết quả này cũng thấy rằng khi  $\lambda$  hữu hạn và cả khi  $\lambda = \infty$  góc lệch  $\varphi_\lambda = -90^\circ$ . Do đó trên cơ sở biểu thức này  $\varphi_\lambda = -90^\circ$  (18.65) lực nâng từng phần được xác định theo công thức sau đây:

$$K_n = -Y = - \int_0^1 d\xi \int_0^{2\pi} p \sin \theta d\theta \quad (18.65)$$

Trong đó:  $P = 1 + \chi \bar{P}$

Vì  $\int_0^{2\pi} \sin \theta d\theta = 0$  nên theo biểu thức (18.64) có:

$$\int_0^{2\pi} \bar{P} \sin \theta d\theta = 2 \int_0^\pi \bar{P} \sin \theta d\theta \quad (18.66)$$

Nên  $K_n = \chi \left[ -2 \int_0^1 d\xi \int_0^\pi \bar{P} \sin \theta d\theta \right] \quad (18.67)$

Biểu thức (18.67) có thể khảo sát như phương trình đường thẳng biểu diễn liên hệ tuyến tính  $K_n$  và  $\chi$  khi cho  $\varepsilon$ , đường thẳng này tiếp tuyến với đường cong tương ứng ở điểm  $\chi = 0$  (hình 18.5). Do đó có thể dụng nó và tính toán thuận tiện khi  $\chi$  như hệ số góc của đường thẳng và:

$$\frac{K_n}{\chi} /_{\chi \rightarrow 0} = -2 \int_0^1 d\xi \int_0^\pi \bar{P} \sin \theta d\theta \quad (18.68)$$

Hệ số ma sát giới hạn của dòng ngược:

$$K_T /_{\chi \rightarrow 0} = \frac{\xi \sqrt{1 - \xi^2}}{2\pi} \frac{K_n}{\chi} \quad (18.69)$$

Với  $\frac{K_n}{\chi}$  được tính theo (18.68)

Để nghiên cứu tính ổn định của ống, chúng ta sẽ tiến hành giải bài toán bôi trơn khí không dừng (bài toán ổn định).

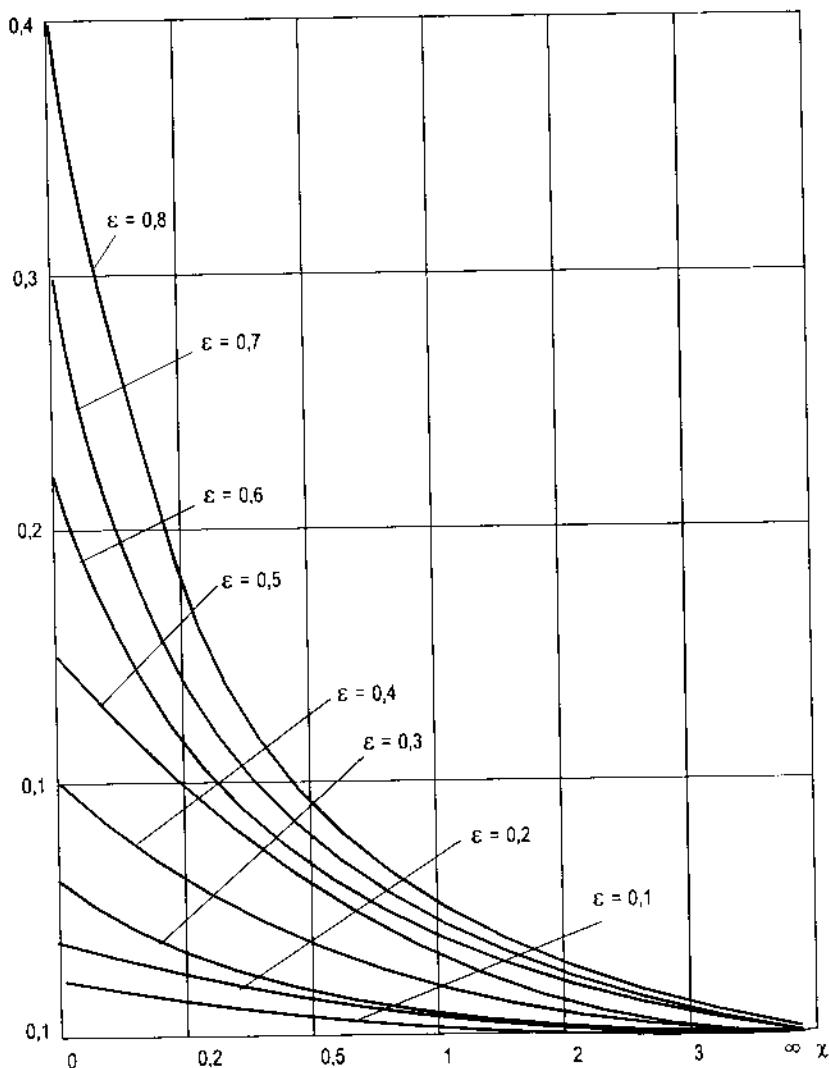
Tất cả các quan hệ giữa các tiêu chuẩn động dạng  $\xi$ ,  $\chi$ ,  $\lambda$  và các đặc tính tính toán của ống  $K_n$ ,  $\varphi$ ,  $K_T$  được tính trên cơ sở tính toán ở trên đã lập thành bảng quan hệ tương ứng cho trong phụ lục. Ứng với trường hợp ( $\lambda = 1,5$ ) theo các số liệu của các bảng đó chúng ta lập được các đồ thị (hình 18.5 và 18.6). Dựa vào các đồ thị này chúng ta xác định được các đặc tính theo các giá trị đã biết của 3 thông số  $\varepsilon$ ,  $\chi$ ,  $\lambda$ . Việc tính toán sau đó sẽ đơn giản hơn.

### 18.1.3. Ảnh hưởng của lực quán tính

Trong tính toán phần trên về lực nâng, chúng ta giả thiết bỏ qua lực quán tính cho nên cho phép thay dòng bôi trơn vòng bằng dòng bôi trơn phẳng. Nay giờ ta sẽ xét xem ảnh hưởng của lực quán tính này như thế nào đến quá trình tính toán lực nâng và ổn định.

Như ta đã biết đối với bôi trơn lỏng, khi làm việc chịu ứng lực với vận tốc quay lớn, nhiệt độ cao của dầu dẫn đến độ nhớt của nó bị giảm nhiều lần, lúc đó vai trò của lực quán tính bị giảm nhiều lần. Nếu số Raynol  $R_e = 5$  và kể đến lực quán tính có thể làm tăng lực nâng lên 10%.

Điều kiện làm việc tương tự cũng có thể xảy ra với các ống khí động làm việc ở vận tốc  $(200 \div 300) \cdot 10^3$  vòng/phút hoặc cao hơn và không những chỉ ở nhiệt độ cao mà cả khi nhiệt độ thấp. Khi đó khí ở trạng thái tiêu chuẩn, độ nhớt của khí  $\mu$  và lực nâng có thể giảm đi hàng chục lần, đồng thời tỉ trọng của khí tăng lên làm tăng lực quán tính trong lớp bôi trơn. Điều kiện để bỏ qua các lực quán tính có thể xác định trên cơ sở các kết quả nhận được khi khảo sát các trường hợp giới hạn của dòng phẳng  $\chi \rightarrow 0$  và  $\chi \rightarrow \infty$ .



**Hình 18.6:** Sự phụ thuộc hệ số ma sát ngược  $K_T$  ( $\lambda = 1,5$ ) vào đặc tính  $\dot{\sigma}$

Các nguồn sinh lực quán tính là:

- Lực li tâm xuất hiện khi dòng bôi trơn chuyển động xung quanh  $\dot{\sigma}$ .
- Lực tiếp tuyến xuất hiện do dao động tuần hoàn của vận tốc dòng chảy trong khe hở bôi trơn với trị số trung bình của nó.

Ta sẽ xét từng trường hợp.

#### 18.1.3.1. Lực li tâm

Lực li tâm tỉ lệ bậc 2 với vận tốc vòng. Trong trực phân tử  $\Delta x, \Delta z, h$  xuất hiện lực li tâm.

$$\Delta x \Delta z \cdot \frac{\rho}{r} \int_0^h U^2 dy \approx \frac{\rho}{r} U_{tb}^2 h \Delta x \Delta z$$

Việc thay vận tốc thay đổi theo chiều cao khe hở bằng vận tốc trung bình dẫn đến sai số lực quán tính. Sau khi chia biểu thức tính  $q_x$  (18.18) cho chiều cao khe hở  $h$  chúng ta xác định được vận tốc trung bình:

$$U_{tb} = \frac{q_x}{h} = \frac{U}{2} - \frac{dp}{dx} \cdot \frac{h^2}{12\mu} \quad (18.70)$$

Sau khi thay đạo hàm  $\frac{dp}{dx}$  bằng biểu thức (18.1):

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6U\mu}{h^2} \left(1 - \frac{C}{p.h}\right)$$

Chúng ta có:  $U_{tb} = \frac{U}{2} - \frac{U}{2} \left(1 - \frac{C}{p.h}\right) = \frac{U}{2} \cdot \frac{C}{p.h}$  (18.71)

Do áp lực sinh ra bởi lực li tâm trong lớp bôi trơn trên một đơn vị diện tích của ống bằng:

$$P_{lt} = \rho \frac{U^2}{4r} \left(\frac{c}{p.h}\right)^2 \cdot h = \rho \frac{U^2}{4r} \left(\frac{p_3 h_3}{p.h}\right)^h h \quad (18.72)$$

Áp lực  $P_{lt}$  làm giảm áp lực khí động  $P$  tác dụng lên ngõng trực. Nhưng trên phần tử đối diện của đường kính  $\Delta x$ .  $\Delta z$  cũng có lực li tâm tác dụng, lực này hướng theo chiều ngược lại.

Hợp lực của 2 lực này được xác định bằng hiệu sau đây:

$$\frac{U^2}{4r} \left[ \rho_\alpha h_\alpha \left( \frac{C_\alpha}{p_\alpha h_\alpha} \right)^2 - \rho_\alpha + \pi h_\alpha + \pi \left( \frac{C}{p_\alpha + \pi h_\alpha + \pi} \right)^2 \right] \quad (18.73)$$

Hợp lực này tiến đến 0 khi  $\chi \rightarrow \infty$  vì khi đó  $Ph/\chi \rightarrow \infty = \text{const}$ , do đó tổng tất cả các lực li tâm tác dụng lên ngõng trực tiến đến 0. Vì vậy khi tăng  $\chi$  thì ảnh hưởng của lực li tâm giảm.

Khi  $\chi \rightarrow 0$  công thức (18.72) có dạng:

$$P_{lt} = \frac{\rho U}{4r} \cdot \frac{H^2}{H} \quad (18.74)$$

Khi  $H = 1 - \varepsilon \cos \theta$  thì  $P_{lt}$  là hàm chẵn đối với góc  $\theta$ . Do đó hợp lực của 2 lực li tâm tại 2 điểm  $+0$  và  $-0$  hướng dọc theo đường tâm (giống hợp lực  $W_{lt}$  của tất cả các lực li tâm):

$$W_{lt} = \int_0^{2\pi} P_{lt} r \cos \theta d\theta = \frac{\rho U^2 C^2 H^2}{4C} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \theta d\theta}{1 - \varepsilon \cos \theta} = \frac{\rho^2 U^2 C H^2}{4} J \quad (18.75)$$

Trong đó:  $H_3$  - khe hở tương đối cực trị:

$$H_3 = \frac{2(1-\varepsilon^2)}{2+\varepsilon^2}$$

$$\text{Tích phân } J = \frac{2\pi}{\varepsilon} \left( \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} - 1 \right) \left( \frac{1-\varepsilon^2}{2+\varepsilon^2} \right)^2$$

Lực nâng tải W được xác định theo công thức (18.44) sẽ có dạng:

$$W = \frac{\mu Ur^2}{C^2} \cdot \frac{1C\pi\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot \frac{12\pi\varepsilon}{(2+\varepsilon^2)} \quad (18.76)$$

Sự biểu hiện của các lực li tâm được xác định bằng hệ thức:

$$\frac{W_{lt}}{W} = \frac{\rho U c}{\mu} \left( \frac{C}{r} \right)^2 \cdot \frac{1}{6} f(\varepsilon)$$

Trong đó:

$$f(\varepsilon) = \frac{(1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2})(1 - \varepsilon^2)^2}{\varepsilon^2(2 + \varepsilon^2)} \quad (18.77)$$

Nhóm không thứ nguyên của biểu thức này là số Râynol:

$$R_{elt} = \frac{U_c}{\nu} \left( \frac{c}{r} \right)^2 \quad (18.78)$$

Trong đó:  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  - độ nhớt động học.

Dưới đây là sự phụ thuộc của giá trị  $f(\varepsilon)$  vào độ lệch tâm  $\varepsilon$

$\varepsilon$	0	0,1	0,5	1
$f(\varepsilon)$	0,250	0,224	0,135	0

Biểu hiện của các lực li tâm được xác định bằng công thức sau:

$$\frac{W_{lt}}{W} < \frac{1}{24} R_{elt} \quad (18.79)$$

Lực li tâm xuất hiện rõ nhất trong các ổ cao tốc làm việc với khe hở lớn. Vì khe hở C nằm ở mẫu số của biểu thức (18.18) nên (mặc dù vận tốc  $U_{lon}$ )  $\chi$  nhỏ và biểu hiện của lực li tâm được xác định bằng biểu thức (18.79). Ổ có khe hở lớn ( $C = 0,05\text{mm}$ ) được dùng trong máy turbin để hoá lỏng khí, khi đó đòi hỏi độ cứng vững cao của lớp bôi trơn khí. Các ổ có khe hở nhỏ ( $0,0005 \div 0,01\text{mm}$ ) sử dụng ổ trực mài trong cao tốc, giá trị lực li tâm lúc này nhỏ hơn nhiều so với trường hợp trên và khe hở nhỏ và đặc tính  $\chi$  lớn. Còn khi  $\chi \rightarrow \infty$  như đã nói ở trên, các lực li tâm cân bằng lẫn nhau.

### 18.1.3.2. Lực tiếp tuyến

Lực này tỉ lệ với gia tốc của phần tử bôi trơn theo hướng x chuyển động trong khe hở bôi trơn. Bằng tích khối lượng phần tử với gia tốc của nó và mang dấu (-):

$$-\rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \frac{du}{dt}$$

Gia tốc  $\frac{du}{dt}$  là do sự biến đổi của vận tốc  $u$  khi phần tử được khảo sát di chuyển theo quỹ đạo nào đó. Khi đó, hoành độ  $x$  và tung độ  $y$  của nó đều thay đổi vì phần tử có thể đồng thời chuyển động dọc theo trục  $x$  lên trên hoặc hạ xuống. Do đó  $U = f(x, y)$  và chúng ta xác định gia tốc  $du/dt$  bằng cách vi phân chính xác hàm số  $f(x, y)$ .

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{d}{dt} f(x, y) = \frac{du}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} \\ &= \frac{\partial u}{\partial x} \cdot u \frac{\partial u}{\partial y}, v \end{aligned} \quad (18.80)$$

Ý nghĩa vật lí của biểu thức này trở nên dễ hiểu khi chuyển dịch từ điểm  $(x, y)$  đến điểm  $(x + \Delta x; y + \Delta y)$  được thay thế như di chuyển đến điểm  $(x + \Delta x; y)$  với gia tốc  $\Delta x \cdot u / \Delta z$  hướng dọc theo trục  $x$  sau đó di chuyển đến điểm  $(x + \Delta x; y + \Delta y)$  với gia tốc  $\Delta y \cdot u / \Delta z$  hướng dọc trục  $y$ . Gia tốc tổng hợp bằng tổng đại số các gia tốc thành phần. Cùng một thời gian  $\Delta t$ , ở giai đoạn thứ nhất là  $\Delta x/u$  đối với giai đoạn thứ hai là  $\Delta y/v$  khi  $\Delta z, \Delta y, \Delta x \rightarrow 0$  ta có biểu thức (18.80).

Khi có kể đến các lực quán tính thì phương trình Räynol đổi với dòng chảy trong tiết diện hướng kính của ống (17.8) sẽ trở nên phức tạp và có dạng:

$$\rho \left( U \frac{\delta U}{\delta x} + V \frac{\delta U}{\delta y} \right) = - \frac{dP}{dx} + \mu \frac{\delta^2 U}{\delta y^2} \quad (18.81)$$

Trong đó thành phần về phải của phương trình là thành phần lực quán tính. Việc giải phương trình (18.81) rất khó khăn không khắc phục được nên phải tính gần đúng.

Giả sử thành phần quán tính nhỏ so với các thành phần về phải của phương trình, chúng ta xác định giá trị của nó qua các hàm  $P_1$  và  $U_1$  và nếu đây là phương pháp tính gần đúng bậc 1. Còn theo các cách giải quyết gần đúng đã có ta gọi là gần đúng bậc 2 và kí hiệu giá trị các hàm  $P_2, U_2$  với độ chính xác của bậc 1 lớn hơn bậc 2. Như vậy có thể đưa phương trình (18.81) về dạng:

$$\rho \left( U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} + V_1 \frac{\partial U_1}{\partial y} \right) = - \frac{dP_2}{dx} + \mu \frac{\partial^2 U_2}{\partial y^2} \quad (18.82)$$

Phương trình này phải thỏa mãn điều kiện biên:

$U_2 = 0$  khi  $y = 0$ ;

$U_2 = U$  khi  $y = h$ .

$P_2(0) = P_2(2\pi)$ .

Nếu coi áp lực phải tìm  $P_2$  và vận tốc  $U_2$  như tổng của  $P_1$  và  $U_1$  với các giá số nhỏ  $P_k$  và  $U_k$  của dòng hiệu chỉnh:

$$U_2 = U_1 + U_k; P_2 = P_1 + P_k \quad (18.83)$$

Và rút ra:

$$\frac{\partial^2 U_2}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_k}{\partial y^2}$$

Ta sẽ đưa phương trình (18.82) về dạng phương trình của dòng hiệu chỉnh với các giá số nhỏ  $p_x$  và  $U_k$ :

$$\rho \left( U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} + V_1 \frac{\partial U_1}{\partial y} \right) = - \frac{dP_k}{dx} + \mu \frac{\partial^2 U_k}{\partial y^2} \quad (18.84)$$

Vì khi mà  $P_1$ ,  $U_1$  là nghiệm của (17.14) (phép tính bậc 1) thì:

$$-\frac{dP_k}{dx} + \mu \frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2} = 0$$

Tất nhiên điều kiện biên cũng đúng với (18.84):

$U_k = 0$  khi  $y = 0$  và  $y = h$ .

$$P_k(\theta) = P_k(\theta + 2\pi). \quad (18.85)$$

Để nhiên  $P_k(\theta)$  và  $P_1(\theta)$  phải liên tục vì yêu cầu bám chặt vào thành  $\delta$ . Ta xét các trường hợp giới hạn.

- *Trường hợp  $\chi \rightarrow 0$*

Hợp lực của dòng hiệu chỉnh do có lực quán tính số lượng theo hướng tâm (tức là dưới một góc  $90^\circ$  đối với đường tác dụng của hợp lực  $W$ ) nếu tăng  $\theta$  và giảm  $\varphi$ . Trị số của nó trình bày ở [2] là:

$$W_k = \rho Ur \frac{6}{35} \pi \left[ \frac{9\epsilon K}{(2+\epsilon^2)^2} - \frac{(1-K)K}{\epsilon(2+\epsilon^2)} + \frac{5}{3\epsilon}(1-K) \right] \quad (18.86)$$

Chia đẳng thức này cho biểu thức tính lực nâng (18.76) ta tìm được tỉ số  $\frac{W_k}{W}$ , nó chính bằng tang của góc quay của đường tâm do lực quán tính gây ra.

$$\frac{W_k}{W} = \frac{U_c C}{v r} \cdot \frac{1}{70} \left[ \frac{9K^2}{2+\epsilon^2} - \frac{(1-K)K^2}{\epsilon^2} + \frac{5}{3\epsilon}(K-K^2)(2+\epsilon^2) \right]$$

Trong đó:  $K = \sqrt{1 - \varepsilon^2}$  (18.87)

Sau đây là quan hệ giữa giá trị của  $f(\varepsilon)$  trong (18.87) theo giá trị lệch tâm  $\varepsilon$ .

$\varepsilon$	...	0	0,1	0,3	0,5	0,8	1
$f(\varepsilon)$	...	5,87	5,59	5,10	4,27	2,66	0

Khi xác định theo giá trị lớn nhất  $f(\varepsilon) = 5,07$  chúng ta đưa phương trình (18.87) về bất đẳng thức đơn giản:

$$\frac{W_k}{W_1} /_{\chi \rightarrow 0} < \frac{1}{12} R_{et}$$

$$R_{et} = \frac{UC}{V} \frac{C}{r} = R_{elt} \frac{C}{r} \quad (18.88)$$

Trong đó:  $R_{et}$  và  $R_{elt}$  là số Raynol dùng để đánh giá.

- Trường hợp  $\chi \rightarrow \infty$

Trong trường hợp này hợp lực  $W_k$  của dòng điều chỉnh do có lực quán tính cũng hướng theo đường tâm (giống như trường hợp  $\chi \rightarrow 0$ ) hiện tại nó trùng với lực nâng của phép tính gần đúng bậc 1 khi tăng lực nâng. Giống như trường hợp  $\chi \rightarrow \infty$ , giá trị của  $W_k$  trên 1 đơn vị chiều dài ống ( $L = 1$ ) được xác định theo công thức:

$$\frac{W_k}{DLPa} = \frac{3}{20} \frac{\rho_o}{P_o} U^2 \frac{\pi}{\varepsilon} \sqrt{1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} - 1 \right] \quad (18.89)$$

Chia biểu thức này cho biểu thức tính lực nâng (18.46) ta xác định được biểu hiện của sai số khi bỏ qua các lực quán tính trong trường hợp  $\chi \rightarrow \infty$ :

$$\frac{W_k}{W_o} = \frac{3}{20} \frac{\rho_o}{P_o} U^2 \quad (18.90)$$

## 18.2. MỘT SỐ THÍ DỤ

### Thí dụ 18.1

Xác định lực li tâm trong ống khí động của máy turbin hoá lỏng khí héli. Điều kiện làm việc của máy và ống dưới áp lực  $p = 9 \text{ kG/cm}^2$  ( $P_{uyet doi} = 10 \text{ kG/cm}^2$ ),  $T^o = 25 \text{ K}$ ,  $n = 200 \cdot 10^3 \text{ v/ph}$ ,  $\omega = 20 \cdot 10^3 \text{ l/s}$ . Kích thước ống  $2r = 16 \text{ mm}$ ,  $n = 200 \cdot 10^3 \text{ v/ph}$ ,  $C = 0,05 \text{ mm}$ , khe hở tương đối  $C/r = 1/160$ . Có thể bỏ qua tải trọng hướng kính vì nó chỉ xuất hiện khi chế tạo thiết bị dẫn hướng của turbin không chính xác.

- Xác định độ nhớt của héli khi đã cho các thông số:

$$\mu 10^{40} = 1,92 \frac{273 + 78}{25 + 78} \left( \frac{25}{273} \right)^{3/2} = 0,182$$

$$\mu = 1,82 \cdot 10^{-11} \text{ kG.cm}^{-2} \cdot \text{s}$$

Do sức cản của lô trên mép ở (dùng để cho hệ li ném đi qua) áp lực trong khe hở  $p_a = P_{H/2} = 5 \text{ kG/cm}^2$ .

- Đặc tính của ống:

$$\chi = \frac{\mu \omega}{p_a} \left( \frac{r}{e} \right)^2 = \frac{1,82 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 2,56 \cdot 10^4}{5} = 1,86 \cdot 10^{-3}$$

- Khối lượng riêng của hệ li:  $\rho = 1,82 \cdot 10^{-10} \frac{5,273}{25} = 10^{-8} \text{ kG.s}^2/\text{cm}^4$

- Độ nhớt động học:

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1,82 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 2,56 \cdot 10^4}{5} = 1,86 \cdot 10^{-5}$$

Số Râynol được tính theo công thức (18.78) vì vận tốc trượt  $U = r\omega = 160 \text{ m/s}$  nên:

$$R_{el} = \frac{1,6 \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{1,82 \cdot 10^{-3} \cdot 2,56 \cdot 10^4} = 1,7$$

Biểu thức phải tìm của các lực li tâm được biểu diễn bằng tỉ số:

$$\frac{W_k}{W} < \frac{1}{4} R_{el} = 0,071$$

Từ đây thấy rằng trong trường hợp thuận lợi nhất của thí dụ được khảo sát tỉ số giữa lực li tâm với lực nâng  $W$  không quá 7%. Do đó có thể bỏ qua lực li tâm. Việc thay thế dòng chảy tròn bằng dòng chảy phẳng khi đưa ra phương trình bôi trơn khí là hoàn toàn có căn cứ.

### **Thí dụ 18.2**

Xác định ảnh hưởng của lực quán tính tiếp tuyến với các số liệu của Thí dụ 18.1.

Số Râynol  $R_{el} = 1,7 \cdot 180 = 272$

$$\frac{W_k}{W_1} < \frac{1}{12} \cdot 272 = 23$$

Lực này do lực quán tính tạo thành lớn hơn hàng chục lần lực nâng xác định bằng phép tính gần đúng thứ nhất. Do đó thấy rằng đánh giá theo phép tính gần đúng thứ hai không được sử dụng và nó được xây dựng trên giả thiết hiệu chỉnh. Cần phải tìm cách giải khác.

Nếu sai số xác định lực nâng thực tế  $W_d$  cho phép là 10% thì:

$$W_d = \frac{W_1}{\cos \varphi} = 1,1 W_1$$

$$\varphi_1 = \arccos \frac{1}{1,1} = 25^\circ$$

Do đó:  $\frac{W_k}{W_1} = \tan 25^\circ = 0,46$  và chúng ta xác định được số Raynol cho phép lớn nhất khi  $\chi \rightarrow 0$ ;  $R_{el} = 0,46 \cdot 12 \approx 5$ . Các tính toán này chỉ đúng với  $\chi \rightarrow 0$ . Thí dụ đối với  $\chi \rightarrow 0,1$  khi  $\lambda = \infty$  và  $\varepsilon = 0,6$  góc  $\varphi = 50^\circ$  (đúng tỉ lệ  $\varphi = 90^\circ$ ).

### Thí dụ 18.3

Xác định biểu hiện sai số với các số liệu của Thí dụ 18.1 mà ở đó tiến hành tính toán theo công thức (18.90) vì đặc tính của ổ đù lớn ( $\chi \rightarrow 2,43$ ). Đối với không khí khi  $p_0 = 1\text{kG/cm}^2$  thì  $\rho_0 = 13,2 \cdot 10^{-10} \text{kG.s}^2/\text{cm}^4$  vận tốc trượt  $U = 8 \cdot 10^3 \text{cm/s}$ .

$$\text{Tìm tỉ số } \frac{W_k}{W_0} = \frac{3}{20} 13,2 \cdot 10^{-10} \cdot 6,4 \cdot 10^7 = 5,1 \cdot 10^{-3}$$

Trong trường hợp này sai số giảm 1%. Lực nâng thực tế bằng  $1,005 W_1$ .

Trên cơ sở các nghiên cứu trình bày ở trên, chúng ta có thể đưa những kết luận sau đây:

1. Có thể bỏ qua ảnh hưởng của lực quán tính li tâm trong lớp bôi trơn. Biểu hiện của chúng được xác định bằng số Raynol.

$$R_{el} = \frac{U^2 C}{\gamma} \left( \frac{C}{r} \right)^2$$

2. Lực quán tính tiếp tuyến làm tăng lực nâng  $W$  của ổ đối với mọi chế độ làm việc bất kỳ.

3. Vécctor giả sử của lực nâng  $W_k$  do ảnh hưởng của lực quán tính li tâm (hợp lực của dòng chảy điều chỉnh) hướng theo đúng tâm khi  $\chi \rightarrow 0$  và  $\chi \rightarrow \infty$ . Môđun của nó tỉ lệ với bình phương vận tốc vòng ( $U^2$ ). Do đó vận tốc cao là điều kiện cơ bản để tăng tỉ số  $W_k/W$ .

4. Khi nhỏ, ảnh hưởng của lực tiếp tuyến là lớn nhất.

$$\frac{W_k}{W} < \frac{1}{1e} R_{el}.$$

$$\text{Trong đó } R_{el} = \frac{U^2 C}{\gamma} \cdot \frac{C}{r}$$

5. Khi khe hở nhỏ (c rất nhỏ) lực nâng sẽ được tăng rất lớn.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. I.V. Kragelsky, V. V. Alisin Friction, wear, lubrication. *Tribology handbook*. Mir Publishers, 1981.
2. Gerd Fleischer, Horst Gröger, Heinz Thum. *Verschleiß und Zuverlässigkeit*. Verlag technik Berlin, 1980.
3. A. Birolini. *Reliability Engineering Theory and Practice*. Springer - Zurich, 1999.
4. J. P. Hölman. *Experimental Methods for Engineers*. McGraw-Hill, 2001.
5. TS. Nguyễn Doãn Ý. *Quy hoạch thực nghiệm*. Nhà xuất bản Khoa học - Kỹ thuật, 2003.
6. Frank Beichelt. B. G. Teubner. *Zuverlässigkeit und Instandhaltungstheorie*. Stuttgart, 1993.
7. Bernd Bertsche, Gisbert Lechner. *Zuverlässigkeit im Maschinenbau*. Springer, 1990.
8. Hochel. *Zuverlässigkeit technischer Systeme*. Verlag Harri Deutsch thum un Frankfurt/Main. 1993.
9. B. J. Winer. *Statistical principles in Experimental Design*. McGraw-Hill, New York, 1971.
9. A. Z. Rumsikii. *Mathematical processing of experimental results*. Nauka "M.", 1971.
10. P. I. I. Laserisun, E. I. E. Maxarinkii. *Planning of experiments in machine construction*. "Nauka", 1969.
11. Rac. Fmeca. 1993; Fta, 1990; wcca (Worst Case Circuit Analysis), 1992.
12. Nguyễn Doãn Ý. *Độ tin cậy trong thiết kế chế tạo máy và hệ cơ khí*. Nhà xuất bản Xây dựng, 2004.
13. Nguyễn Doãn Ý. *Lưu biến học*. Nhà xuất bản Xây dựng, 2005.
14. Maurice Godet. *Lubrification hydro dynamique Paliers et Butées*. Editions eyrolles, 6-1990.
15. Frene (J). *Lubrification hydrodynamic*. Edition eyrolles, 1990.
16. Kragelsky, V. V. Alisin Friction, Wear, Lubrication. *Tribology handbook*, Mir Publishers, 1981.
17. Gerd Fleischer, Horst Groger, Heinz Thum. *Verschleiß und zuverlässigkeit*. Verlag technik Berlin 1980.

18. Bartel A. *Inzureichende Schmierung als häufige Ursache für Maschinen ausfälle.* Metall, 1971, Bd. 25, N. 8, S. 935 - 938.
19. Brayant P. J., Gutshall P. Z., Taybor L. H., *A study of mechanisms of graphite friction and Wear - "Wear",* 1964, No. I, vol. 7, p. 118 -128.
20. Braithwaite E. R. *Solid Lubricants and Surfaces,* Pergamon Press, 1964.
21. Donald H. Buckley *"Friction, Wear and Lubrication in Vacuum".* Washington, NASA Levis Research Center, 1971.
22. Horst Mauser, *Mit weniger Schmierstoffen besser schmieren* Ingeneur digest. Neft, 3, Mars, 1974, 13, Gahrgang, S. 39-44.
23. Yuko Tsuya. *Microstructure of Wear, Friction and Solid Lubrication, Technical Report of Mechanical Eng. Laboratory Igusa Sufinami-ku.* Tokyo, Japan, 1975, No. 3. 107.
24. Peter A., Henshaw B. W. *"Ind, Lubric, and Tribol"* 1973, 25, No. 6, p. 230-235.
25. Rabinowicz. *Variation of Friction adn Wear of Solid Lubrication Films with Thickness.* ASLE Transactions, vol. 10, No. 1. January 1967, p. 1-9.
26. Kleis. I.; Nuemois, II. *Untersuchung des Stahl verschleißmechanismus von Metallen.* Zeitschrift für Werkstofftechnik. J. of Materials Technology 5 (1974) 7, S. 381-389.
27. Schreiber, K. H. Ulsenheimer. G. *Zur Frage der Ermudungserscheinungen bei Walzlagern.* Wear 3 (1960) 2, S. 122-143.
28. Pursche. G. Wuttke. W. *Zum Verschleibprozeß von Metallen und zur Beeinflussung dieses Prozesses.* Schmierungstechnik 10 (1979) 2, S. 46-52.
29. Heinicke, G. Schober. E. *Zur Tribokinetik mechanisch aktivierter Reaktionen.* Zeitschrift für chemie 11 (1971) 6.S. 219-226.
30. Dunke, H. *Die Bedeutung tribochimischer Umsetzungen zwische Additivs und Metallen bei Reibungs - und Verschleiß Bvorgangen.* Zeitschrift für chemic 11 (1971) 6, S. 213-219.
31. Heinicke, G. Fleischer, G. *Tribochimisehe Wirkungen in der Technik.* Zum Einfluß tribochimischer Reaktionene auf Reibungs, Schmierungs - und Verschleißprozesse. Die Technik 31 (1976) 7. S. 458- 464.

# MỤC LỤC

Trang

Lời nói đầu	3
-------------	---

## Phần I NGÀNH HỌC TRIBOLOGY

I.1. Định nghĩa	5
I.2. Mục đích	5
I.3. Phân loại Tribology	5
I.4. Kĩ thuật Tribology	5

## Phần II MA SÁT

### Chương 1. Các đặc trưng cơ bản của ma sát

1.1. Định nghĩa, các thuật ngữ chính	7
1.2. Các đặc trưng cơ bản của ma sát	7
1.3. Phân loại ma sát	9
1.4. Tổng quan về phân loại ma sát	11
1.5. Đồ thị nguyên tắc của hệ số ma sát	11
1.6. Tính hệ số ma sát	13

### Chương 2. Thông số hình học bề mặt tiếp xúc

2.1. Tiếp xúc của bề mặt	15
2.2. Chất lượng bề mặt chi tiết máy	19
2.3. Sự tiếp xúc của bề mặt có độ nhám lớn	34
2.3. Các tính chất lưu biến của tiếp xúc	46
2.5. Phương pháp và công cụ nghiên cứu bề mặt tiếp xúc	47

### Chương 3. Hệ số ma sát ngoại và dịch chuyển ban đầu

3.1. Khái niệm chính	51
3.2. Sự tương tác của các vật rắn	51
3.3. Tính hệ số ma sát tĩnh	73

<b>Chương 4. Tính ma sát trên cơ sở có hình</b>	
4.1. Tính ma sát khô (không có chất bôi trơn)	87
4.2. Ma sát giới hạn	94
<b>Chương 5. Ma sát ướt</b>	
5.1. Xây dựng công thức tính ma sát ướt	95
5.2. Thí dụ	98
 <b>Phần III</b>	
<b>MÒN</b>	
<b>Chương 6. Mòn cùp ma sát và chi tiết máy</b>	
6.1. Định nghĩa và phương pháp tính mòn cổ điển	99
6.2. Tổng quan về mòn	100
6.3. Một số thông số tính mòn	103
6.4. Các thông số tính đường biên bề mặt tiếp xúc	104
<b>Chương 7. Tính mòn trên cơ sở cơ hình và năng lượng</b>	
7.1. Tính mòn trên cơ sở cơ hình	106
7.2. Tính mòn trên cơ sở năng lượng	109
<b>Chương 8. Mòn cùp chuyển động tịnh tiến đảo chiều</b>	
8.1. Một số giả thiết chính	111
8.2. Xây dựng đồ thị mòn	111
8.3. Thí dụ tính mòn cùp chi tiết có $k_{pk} = 1$	117
<b>Chương 9. Đặc trưng độ tin cậy và tuổi thọ của cùp ma sát</b>	
9.1. Đặc trưng độ tin cậy (DTC) của cùp ma sát	119
9.2. Định nghĩa độ tin cậy của cùp ma sát	120
9.3. Nguyên nhân gây hỏng cùp ma sát	121
9.4. Hiện tượng mòn	122
9.5. Xác định các thông số độ tin cậy khi lượng mòn là hàm phi tuyến của thời gian	137
9.6. Một số thí dụ áp dụng	139

**Phân IV**  
**KĨ THUẬT BÔI TRƠN (KTBT)**

**Chương 10. Mở đầu**

10.1. Lịch sử phát triển, phân loại kĩ thuật bôi trơn	157
10.2. Một số phương trình cơ bản sử dụng trong kĩ thuật bôi trơn	163
10.3. Ố trượt	173

**Chương 11. Bôi trơn thủy động (BTTĐ)**

11.1. Khái niệm và phân loại	176
11.2. Bôi trơn ống dài vô tận	177
11.3. Bôi trơn ống có chiều dài giới hạn	181
11.4. Ống hướng kính có bậc tự lựa	186

**Chương 12. Bôi trơn rối (BTR). Tính toán ống hướng kính, bậc kín bôi trơn rối**

12.1. Điều kiện bôi trơn rối	195
12.2. Sự phân bố áp lực	196
12.3. Tải trọng chịu được của ống	197
12.4. Mô men ma sát	199
12.5. Lượng tiêu hao dầu bôi trơn	200
12.6. Chế độ nhiệt	201
12.7. Các điều kiện tối ưu	202

**Chương 13. Bôi trơn thủy động tiếp xúc**

13.1. Khái niệm chung	205
13.2. Giải bài toán bôi trơn thủy động của lớp dầu có độ nhớt không đổi giữa các bề mặt không biến dạng	206
13.3. Giải bài toán bôi trơn thủy động tiếp xúc đối với chất lỏng Newton	210
13.4. Giải bài toán dẫn nhiệt dùng đối với chất lỏng Newton một cách gần đúng	211

**Chương 14. Bôi trơn ống thủy tĩnh**

14.1. Khái niệm chung	220
14.2. Các hiện tượng chính trong ống thủy tĩnh	222
14.3. Nhận rõ ảnh hưởng đến sự làm việc của ống	224
14.4. Thiết kế thủy tĩnh	224
14.5. Tính toán ống thủy tĩnh	229

**Phần V**  
**BÔI TRƠN KHÍ**

**Chương 15. Giới thiệu chung về ổ khí**

15.1. Vị trí vai trò của bôi trơn khí trong kỹ thuật	245
15.2. Các dạng cơ bản của ổ trục bôi trơn bằng khí	246
15.3. Phân tích ưu, nhược điểm của ổ bôi trơn khí	248
15.4. Phạm vi sử dụng ổ trục bôi trơn khí	250
15.5. Kết luận	256

**Chương 16. Vật liệu dùng chế tạo ổ khí**

16.1. Các vật liệu dùng để chế tạo ổ khí	257
16.2. Giới thiệu về graphit dùng làm bạc	264

**Chương 17. Cơ sở lí thuyết bôi trơn khí**

17.1. Mở đầu	270
17.2. Phương trình bôi trơn khí trong trường hợp tổng quát và trường hợp riêng	271
17.3. Phương trình bôi trơn khí dạng có chứa các tham số không thứ nguyên	280
17.4. Phương trình chuyển động trong bôi trơn khí	281
17.5. Kết luận	282

**Chương 18. Tính ổ bôi trơn khí**

18.1. Ổ làm việc ở chế độ dừng	284
18.2. Một số ví dụ	309

**Tài liệu tham khảo**

GIÁO TRÌNH  
**MA SÁT - MÒN - BÔI TRƠN**  
TRIBOLOGY

*Chịu trách nhiệm xuất bản:*

BÙI HỮU HẠNH

*Biên tập:* LUÔNG CAO PHI  
*Chế bản:* PHẠM HỒNG LÊ  
*Sửa bản in:* LUÔNG CAO PHI  
*Trình bày bìa:* VŨ BÌNH MINH

---

In 500 cuốn khổ 19 × 27cm, tại Xưởng in Nhà xuất bản Xây dựng. Giấy phép số 621/XB-QLXB-07 ngày 29-4-2005. In xong nộp lưu chiểu tháng 8-2005.

má sát mèn bồi tròn



50.000 VND

XD- 2005

5

Giá : 50.000<sup>d</sup>