

Лекція №24

11.3.6. Тертя ковзання змащених тіл

Основоположником гідродинамічної теорії змащених тіл є М.П. Петров, який в 1883 році опублікував основні її положення.

Рідинне тертя можна розглядати як в'язкий зсув між шарами мастила, оскільки безпосередній контакт між тілами, що труться, відсутній.

Коефіцієнт рідинного тертя f залежить від швидкості відносного руху шарів мастила V , від сили нормального тиску F_n і коефіцієнта в'язкості мастила μ :

$$f = f(V, F_n, \mu). \quad (11.30)$$

Тут μ — динамічний коефіцієнт в'язкості, $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$.

М.П. Петров сформулював такі умови для рідинного тертя:



Для виконання першої умови необхідно, щоб сили зчеплення рідини з поверхнею, що треться, були більшими від сил зчеплення між шарами цієї рідини.

Для виконання другої умови необхідно, щоб в зазор між поверхнями, що труться, мимовільно нагніталась мастильна рідина, і між цими поверхнями був забезпечений *клиновий зазор*. При ковзанні тіла по поверхні рідини саме завдяки клиновому ефекту воно спливає над нею (рис. 11.22). Для цапфи 1, що лежить у підшипнику 2 (рис. 11.23), виникнення масляного клину 3 пов'язане з різницею діаметрів: діаметр підшипника більший від діаметра цапфи. При обертанні цапфи у клиновий зазор нагнітається мастило. В мастильному шарі виникає тиск, який урівноважує зовнішнє навантаження, і вал спливає над мастильним шаром. При великих обертах вісь цапфи прагне збігтися з віссю підшипника.

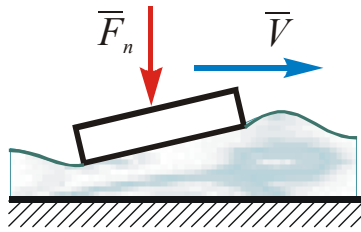


Рис. 11.22 Схема утворення масляного клину

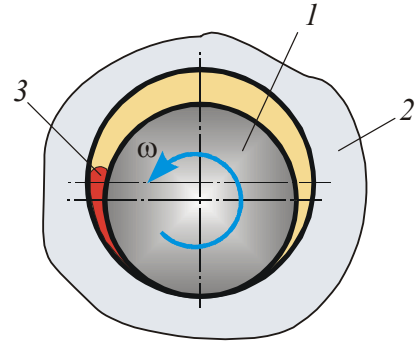


Рис. 11.23 Масляний клин у шарнірі

Визначимо коефіцієнт рідинного тертя для цапфи.

Ньютон експериментальним шляхом отримав формулу для визначення сили, яка необхідна для зміщення одного шару рідини паралельно іншому. Ця сила називається *силою в'язкого зсуву*:

$$F = \mu S \frac{dV}{dh}. \quad (11.31)$$

Тут $\frac{dV}{dh}$ – градієнт швидкості (характеризує зміну швидкості по висоті шару рідини (рис. 11.24)); S – площа поверхні ковзання; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості.

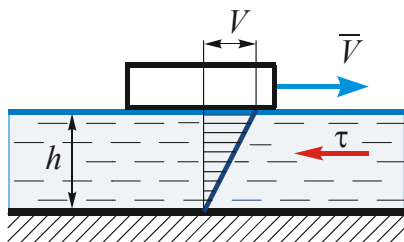


Рис. 11.24 Градієнт швидкості по висоті шару рідини

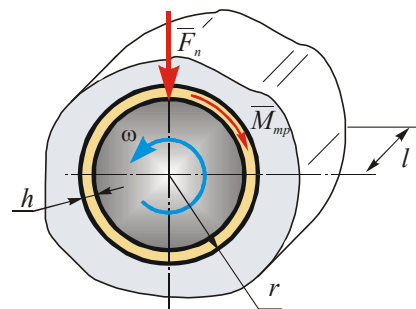


Рис. 11.25 Масильний шар у шарнірі

Дотичні напруження при в'язкому зсуві:

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{dV}{dh}, \quad (11.32)$$

а, оскільки залежність швидкості V від висоти h лінійна (див. рис. 11.24), то:

$$\tau = \mu \frac{V}{h}. \quad (11.33)$$

Момент тертя в підшипнику (див. рис. 11.25):

$$M_{mp} = F \cdot r = \mu \frac{V}{h} \cdot r \cdot S = \mu \frac{V}{h} 2\pi r^2 l = \frac{2\pi r n}{60} \frac{\mu}{h} 2\pi r^2 l = \frac{4\pi^2 r^3 n l}{60 h} \mu. \quad (11.34)$$

Тут n – швидкість обертання цапфи.

З іншого боку:

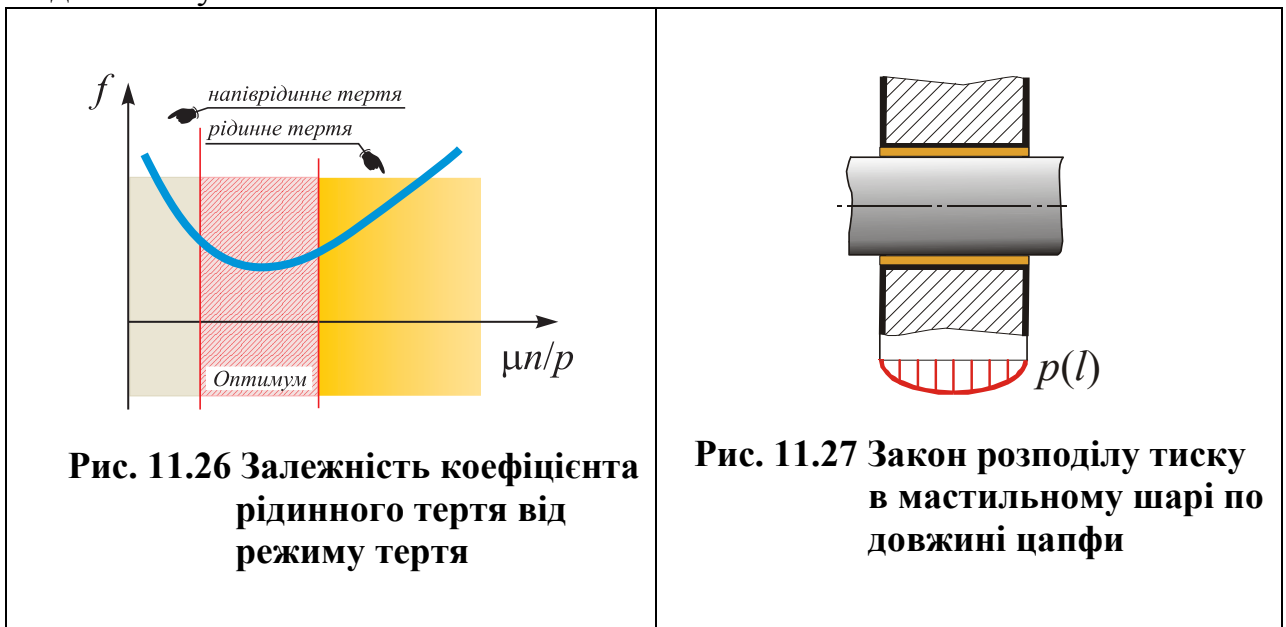
$$M_{mp} = F_n r f = 2\pi r l p \cdot r f. \quad (11.35)$$

Тут p – тиск в рідині.

Прирівнюючи праві частини виразів (11.34) і (11.35), отримаємо формулу для визначення коефіцієнта рідинного тертя в підшипнику:

$$f = \frac{\pi^2 r}{30 h} \cdot \frac{\mu n}{p}. \quad (11.35)$$

Перший множник в цьому виразі характеризує геометричні розміри, а другий – режим тертя. Діаграма, яка описує залежність коефіцієнта рідинного тертя від режиму (умов) тертя, показана на рис 11.26. Виділена зона вказує діапазон, в якому реалізуються найоптимальніші умови тертя в підшипнику.



Ці викладки справедливі для довгих цапф. Для коротких, внаслідок витікання мастила через торці, картина тертя буде іншою. Закон розподілу тиску в мастильному шарі по довжині цапфи для цього випадку показаний на рис. 11. 27.

Для виконання третьої і четвертої вимог потрібно забезпечити таку обробку поверхонь, що ковзають, щоб звести до мінімуму шорсткість

поверхонь цапфи і підшипника, не допускати значних деформацій цапфи, які б приводили до її перекосів у підшипнику, максимально очищати мастило від сторонніх твердих домішок.

Тема 11.4. ЗНОШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КІНЕМАТИЧНИХ ПАР

В процесі експлуатації механізмів і машин обов'язково має місце зношування елементів кінематичних пар. Це шкідливе явище, оскільки воно зменшує міцність і жорсткість деталей, знижує точність механізму, спотворює форму поверхні.

11.4.1. Види зносу

В машинобудуванні розглядають такі основні види зносу:



Фізична модель зносу така (рис. 11.28).

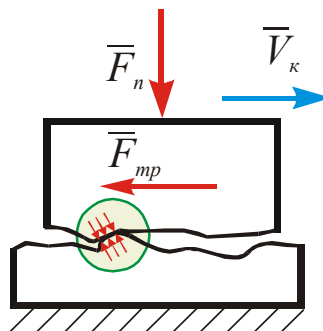


Рис. 11.28 Структура третього тіла

При ковзанні перед мікронерівністю виникає валик деформованого матеріалу, в якому виникають стисні напруження. Після проходження мікронерівності в цій області за рахунок сил тертя матеріал розтягується.

Тобто в поверхневому шарі діють повторно-змінні напруження. Матеріал втомлюється, в ньому накопичуються пошкодження, які й приводять до відділення часточок матеріалу.

11.4.2. Стадії зношування

Є дві стадії зношування:

На стадії приробляння вихідна шорсткість поверхні, набута при виготовленні деталі, змінюється, і до початку другої стадії утворюється деяка нова рівноважна шорсткість, яка в подальшому вже практично не міняється. Причому, на стадії приробляння шорсткість може як зменшуватись так і збільшуватись. Наприклад, приробляння відполірованої деталі пов'язане зі збільшенням її шорсткості до оптимальної.

Щоб зменшити час приробляння, слід назначати таку технологію обробки деталі, яка б забезпечувала шорсткість, найближчу до рівноважної.

На рис. 11.29 показаний графік зміни параметру шорсткості деталі – середнього арифметичного відхилення профілю Ra , мм, – від часу експлуатації деталі.

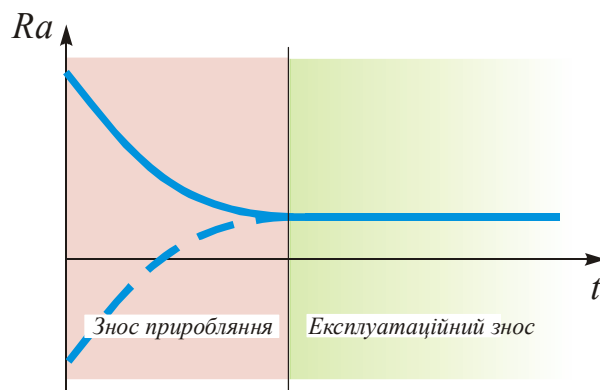


Рис. 11.29 Графік зміни параметру шорсткості деталі від часу експлуатації деталі

11.4.3. Кількісна оцінка зносу

Результат зношування, виміряний в одиницях довжини, об'єму або ваги, називається *зносом*.

Графічне зображення розподілу значень зносу по поверхні називають *епюрою зносу*.

Швидкість зношування:

$$\gamma = \frac{d\delta}{dt} = kp^m V_{\kappa}^n. \quad (11.36)$$

Тут δ — товщина шару зруйнованого матеріалу; p — питомий тиск в досліджуваній точці поверхні; V_{κ} — швидкість ковзання; k — коефіцієнт зносу (чисельно дорівнює γ при $p = V_{\kappa} = 1$); $m = 1 \dots 3$ — коефіцієнт, який залежить від характеру деформації в зоні контакту: пружна, пластична або має місце мікрорізання; n — коефіцієнт, який залежить від виду зносу.

Для прироблених пар $m = n = 1$. Тоді

$$\gamma = kpV_{\kappa}. \quad (11.37)$$

Вираз pV_{κ} називають потужністю тертя.

Інтенсивність зношування:

$$\gamma = \frac{d\delta}{ds} \frac{ds}{dt} = \gamma_s V_{\kappa}. \quad (11.38)$$

$\gamma_s = \frac{d\delta}{ds}$ — знос, який припадає на одиницю шляху тертя, $\frac{\text{мм}}{\text{км}}$.



На зносостійкість впливає твердість матеріалів, їх пружні властивості, режим роботи (швидкість ковзання V_{κ} , тиск на поверхні контакту p , температура t°), зовнішні умови (змащення, навколишнє середовище), конструктивні умови.

За величиною γ_s розрізняють 3 класи матеріалів:

- $\gamma_s = 10^{-12} \dots 10^{-7} \frac{\text{мм}}{\text{км}}$ — матеріал з високою зносостійкістю при пружній деформації;
- $\gamma_s = 10^{-7} \dots 10^{-4} \frac{\text{мм}}{\text{км}}$ — матеріал з середньою зносостійкістю при пружно-пластичній деформації;
- $\gamma_s = 10^{-4} \dots 10^{-3} \frac{\text{мм}}{\text{км}}$ — матеріал з низькою зносостійкістю при мікрорізанні.

Тема 7.5. ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ НА ТЕРТЯ. МЕХАНІЧНИЙ КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ (ККД)

Енергія, що підводиться до вхідної ланки в усталеному режимі, витрачається на виконання корисної роботи та на подолання сил опору середовища і сил тертя в кінематичних парах.

Механічним коефіцієнтом корисної дії називається відношення

$$\eta = \frac{A_{\text{к.о.}}}{A_p} . \quad (11.39)$$

$A_{\text{к.о.}}$ – робота сил корисного опору; A_p – робота рушійних сил.

К.к.д. можна виразити через відповідні потужності, усереднені за цикл:

$$\eta = \frac{P_{\text{к.о.}}}{P_p} . \quad (11.40)$$

Відношення роботи сил тертя до роботи рушійних сил називається *коефіцієнтом втрат*

$$\psi = \frac{A_m}{A_p} . \quad (11.41)$$

Між к.к.д. і коефіцієнтом втрат існує такий зв'язок:

$$\psi = 1 - \eta . \quad (11.42)$$

Якщо з механізму, що знаходиться в усталеному русі, зняте корисне навантаження (режим холостого ходу), то сумарна робота

$$A_{\Sigma} = A_{\text{к.о.}} + A_m = A_m .$$

Тобто вся робота йде на подолання тертя. При цьому $\eta = 0$, а $\psi = 1$.

Розглянемо, як визначається ККД для різних видів з'єднання механізмів в машинах:

а) **Послідовне з'єднання** (рис. 11.30).

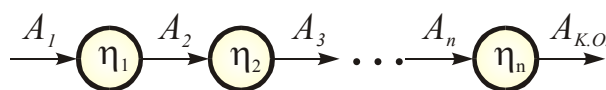


Рис. 11.30 Послідовне з'єднання механізмів в машині

Припустимо, що к.к.д. механізмів відомі. Визначимо к.к.д. машини. Для першого механізму A_1 – робота рушійних сил. Робота рушійних сил для другого механізму (вона ж, згідно зі схемою, є корисною роботою першого механізму) $A_2 = A_1 \eta_1$; для 3-го – $A_3 = A_2 \eta_2 = A_1 \eta_1 \eta_2$. Для n -го механізму:

$$A_n = A_1 (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_{n-1}).$$

Розглядаючи n -й механізм як останній в ланцюгу, знайдемо корисну роботу всієї машини:

$$A_{к.о.} = A_1 (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n).$$

Сумарний к.к.д.

$$\eta = \frac{A_{к.о.}}{A_1} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n. \quad (11.43)$$

б) Паралельне з'єднання (рис. 11.31).

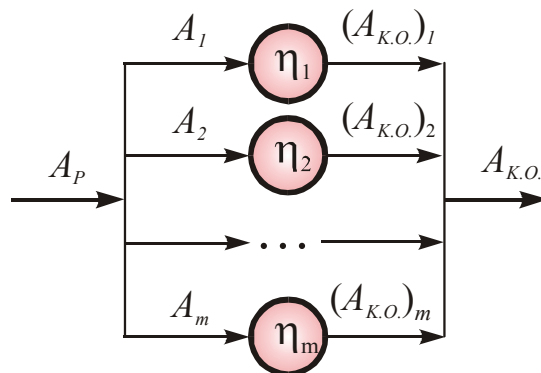


Рис. 11.31 Паралельне з'єднання механізмів в машині

Тут кожний i -й механізм виконує корисну роботу:

$$(A_{к.о.})_i = A_i \eta_i.$$

В той же час

$$A_p = \sum_{i=1}^n A_i,$$

$$A_{к.о.} = \sum_{i=1}^n (A_{к.о.})_i.$$

Корисна робота усієї машини:

$$\eta = \frac{A_{к.о.}}{A_p} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{к.о.})_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \eta_i}{\sum_{i=1}^n A_i}. \quad (11.44)$$

Щоб визначити в цьому випадку к.к.д., потрібно знати, яким чином робота рушійних сил A_p розподіляється між механізмами. Тобто треба ввести деякий коефіцієнт, величина якого має бути відомою:

$$\Omega_i = \frac{A_i}{A_p}. \quad (11.45)$$

Тоді

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \Omega_i A_p \eta_i}{A_p}. \quad (11.46)$$

Отже сумарний к.к.д. для таких кінематичних ланцюгів обчислюється за формулою:

$$\eta = \sum_{i=1}^n \Omega_i \eta_i. \quad (11.47)$$

в) **Змішане з'єднання** (рис. 11.32)

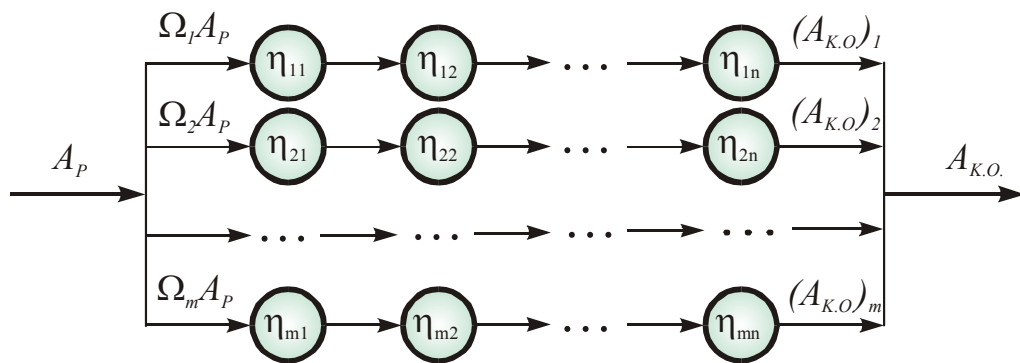


Рис. 11.31 Змішане з'єднання механізмів в машині

Тут для кожної паралельної гілки

$$(A_{к.р.})_i = A_i \cdot \eta_{\Sigma i}, \quad (i = 1 \dots m),$$

де $\eta_{\Sigma i} = \eta_{i1} \cdot \eta_{i2} \cdot \dots \cdot \eta_{in}$.

Для всієї машини

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^m (A_{\kappa.p.})_i}{A_p} = \frac{\sum_{i=1}^m A_i \eta_{\Sigma i}}{A_p} = \frac{\sum_{i=1}^m \Omega_i A_p (\eta_{i1} \cdot \eta_{i2} \cdot \dots \cdot \eta_{in})}{A_p}. \quad (11.48)$$

Отже к.к.д. для всієї машини

$$\eta = \sum_{i=1}^m \Omega_i \cdot (\eta_{i1} \cdot \eta_{i2} \cdot \dots \cdot \eta_{in}). \quad (11.49)$$