

Лекція №17

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, Н·с/м².

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

Для виконання першої умови необхідно, щоб сили зчеплення рідини з поверхнею, що труться, 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 забезпечено *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 співпасти з віссю підшипника.

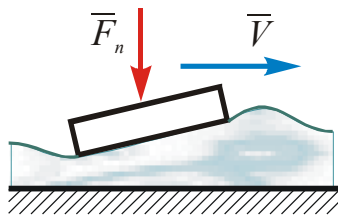


Рис. 11.22

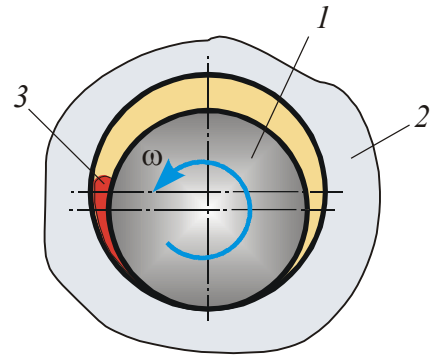


Рис. 11.23

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.

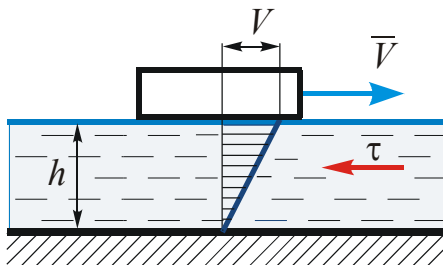


Рис. 11.24

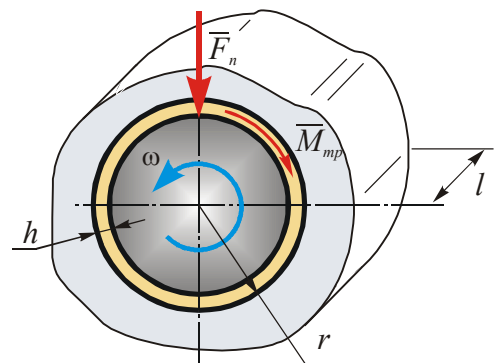


Рис. 11.25

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:

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

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.

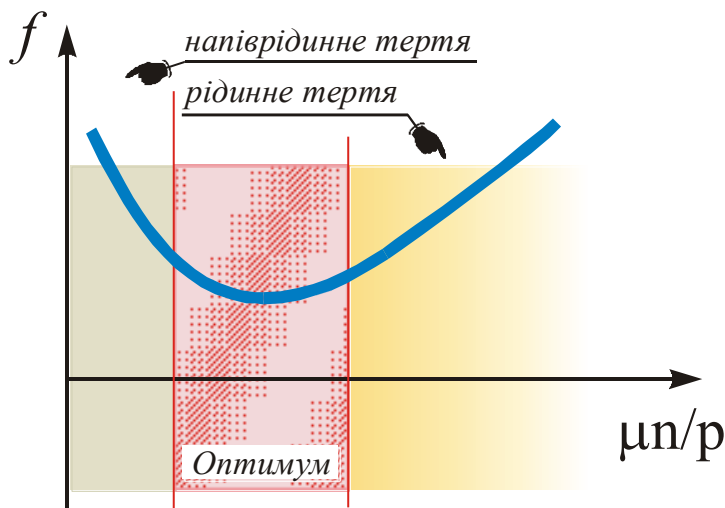


Рис. 11.26

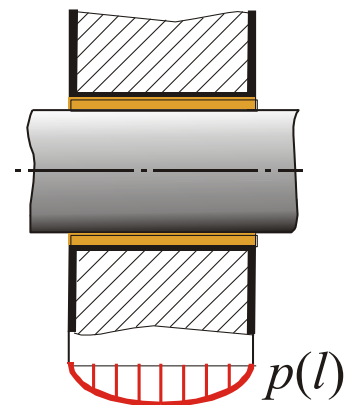


Рис. 11.27

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: при ковзанні перед мікронерівністю виникає валик деформованого матеріалу (рис. 11.28), 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.

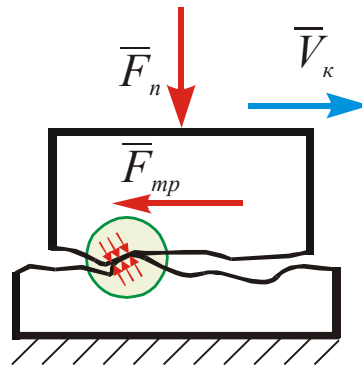


Рис. 11.28

11.4.2. Стадії зношування

Є дві стадії зношування:

Ra — відхилення профілю шорсткої поверхні (мкм)

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 прироблення шорсткість може як зменшуватись так і збільшуватись. Наприклад, прироблення відполірованої деталі пов'язане зі збільшенням її шорсткості до оптимальної.

Щоб зменшити час прироблення, 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 – від часу експлуатації деталі.

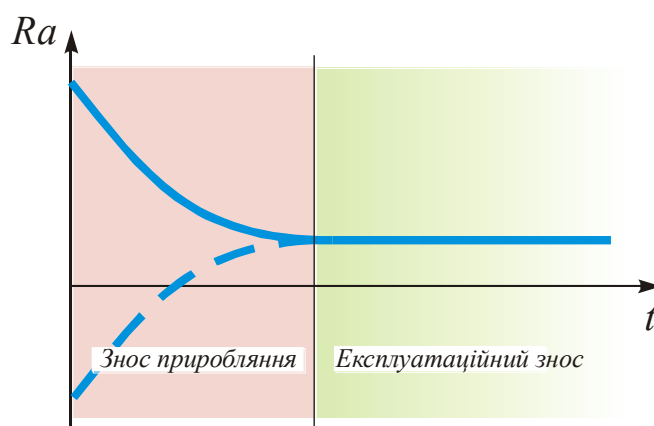


Рис. 11.29

11.4.3. Кількісна оцінка зносу

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

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

Швидкість зношування:

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

Тут δ — товщина шару зруйнованого матеріалу; p — питомий тиск в досліджуваній точці поверхні; V_k — швидкість ковзання; k — коефіцієнт зносу (чисельно дорівнює γ при $p = V_k = 1$); $m = 1 \dots 3$ — 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

$$\gamma = kpV_k \quad (11.37)$$

Вираз pV_k називають потужністю тертя.

Інтенсивність зношування:

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

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

На зносостійкість впливає твердість матеріалів, їх пружні властивості, режим роботи (швидкість ковзання V_k , 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 за пружної деформації;
- $\gamma_s = 10^{-7} \dots 10^{-4} \frac{\text{мм}}{\text{км}}$ – матеріал з середньою зносостійкістю за пружно-пластичної деформації;
- $\gamma_s = 10^{-4} \dots 10^{-3} \frac{\text{мм}}{\text{км}}$ – матеріал з низькою зносостійкістю за мікрорізання.

Тема 11.5. 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.

ККД 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 утрат*

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

Між ККД і коефіцієнтом утрат 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

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

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).

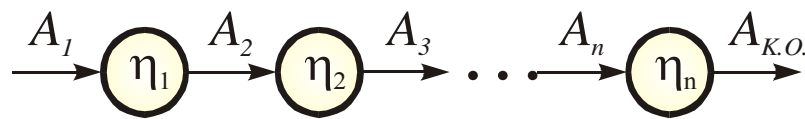


Рис. 11.30

Припустимо, що ККД механізмів відомі. Визначимо ККД 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 ККД

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

б) Паралельне з'єднання (рис. 11.31).

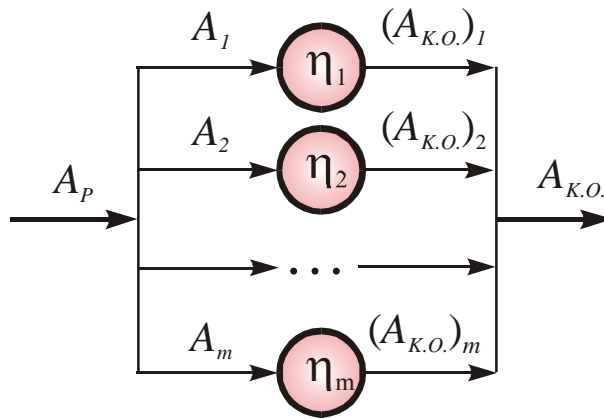


Рис. 11.31

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 ККД, 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 ККД 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)

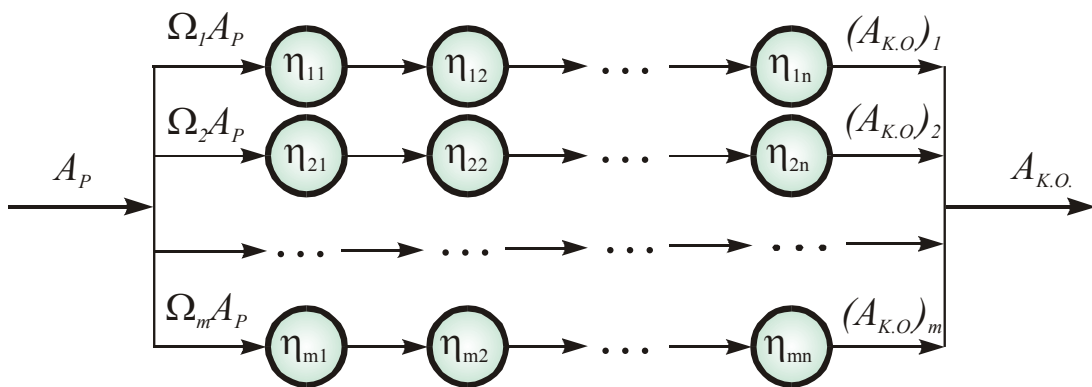


Рис. 11.32

Тут для кожної паралельної гілки

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

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

Для всієї машини

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

Отже ККД для всієї машини

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