

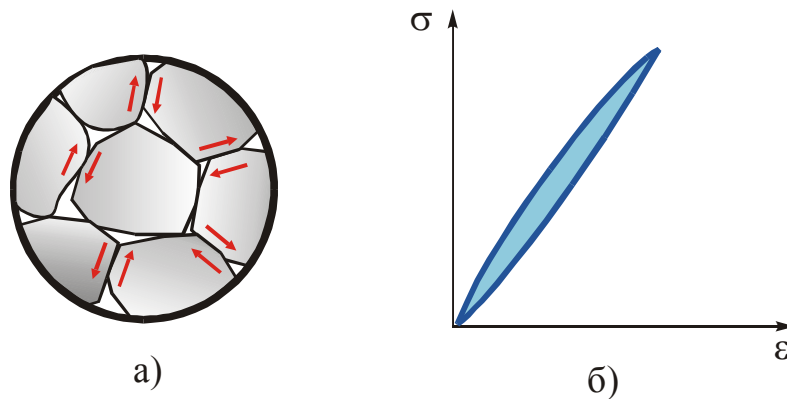
# Лекція №22

## Розділ 11. ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАХ

При роботі машин і механізмів відбувається розсіювання механічної енергії. Причиною такого розсіювання є тертя.

Вирізняють *внутрішнє* і *зовнішнє* тертя.

Внутрішнє тертя – це тертя між частками матеріалу при його деформації (рис. 11.1 а). Проявом цього виду тертя є наявність у матеріалу петлі пружного гістерезису (рис. 11.1 б). Чим ширша петля, тим вищими є демпфувальні властивості матеріалу, тобто його здатність гасити коливання (у реальних матеріалів вільні коливання затухають навіть у вакуумі).



**Рис. 11.1 Внутрішнє тертя: а – тертя між часточками матеріалу; б – петля пружного гістерезису**

В подальшому будемо розглядати тільки зовнішнє тертя.

### Тема 11.1. ВИДИ ТЕРТЯ В КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАХ

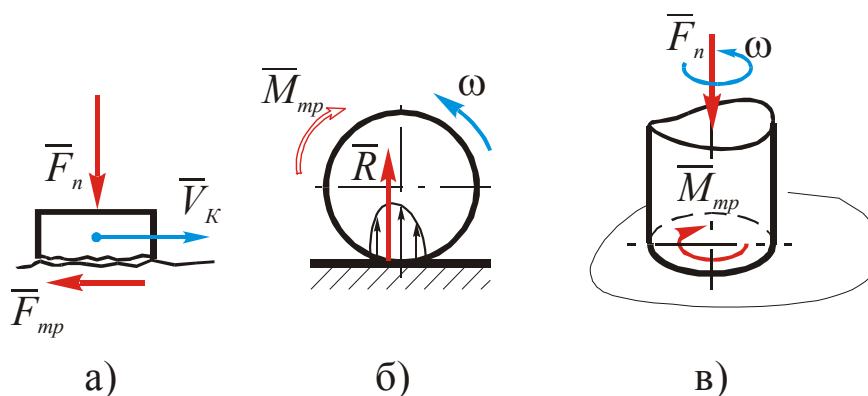
Фізична природа тертя до кінця не вивчена. Існують різні школи, які трактують природу тертя з різних позицій, наприклад з точки зору фізики металів, електричної природи і т.д.

Розглянемо різні види тертя, не заглиблюючись у природу цього явища.

#### 11.1.1. Класифікація тертя за кінематичною ознакою

Розрізняють:

- тертя ковзання (рис. 11.2 а);
- тертя кочення (рис. 11.2 б);
- тертя вертіння (рис. 11.2 в);
- тертя кочення з проковзуванням (в зубчастому зачепленні, наприклад)
- тертя за вібропереміщень.



**Рис. 11.2 Види тертя за кінематичною ознакою: а – тертя ковзання; б – тертя кочення; в – тертя вертіння.**

### 11.1.2. Класифікація тертя за станом поверхні

Розрізняють:

- тертя без змащення – *сухе тертя*;
- тертя зі змащенням – *рідинне тертя*.

### 11.1.3. Тертя спокою і тертя руху.

Тертя спокою передреє тертю руху.

**Сила тертя спокою завжди більша від сили тертя руху.**

Сила тертя спокою, будь-яке перевищення якої призводить до руху, називається *найбільшою силою тертя спокою*.

В техніці тертя спокою відіграє позитивну роль. Завдяки цьому виду тертя працюють механічні передачі, рухається по земній поверхні транспорт, та, власне, і ми з вами ходимо.

Тертя руху ж, як правило, шкідливе. Воно виникає при відносному зміщенні ланок, і з ним пов'язаний знос елементів кінематичних пар, непродуктивні витрати енергії і т.п.

## Тема 11.2. СУХЕ ТЕРТЯ

Це тертя має місце за відсутності на поверхнях тертя введеного мастильного матеріалу.

### 11.2.1. Закон Амонтона-Кулона

Розглянемо сухе тертя в нижчій поступальній кінематичній парі, коли тіло взаємодіє з площиною (рис. 11.3). Тут  $F_n$  – сила нормального тиску, а  $F_{mp}$  – сила тертя.

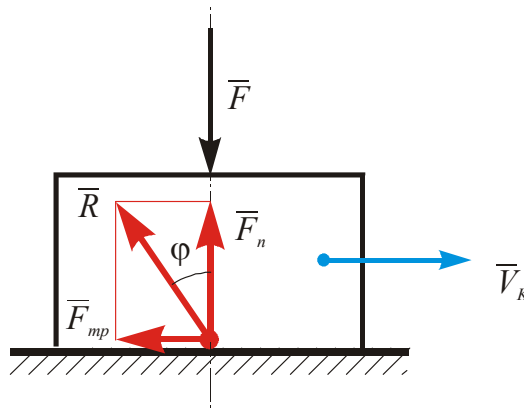


Рис. 11.3 Сили в нижчій поступальній кінематичній парі

$$F_{mp} = f \cdot F_n. \quad (11.1)$$

Тут  $f$  – коефіцієнт тертя.

Згідно з рис.11.3 можна записати:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{F_{mp}}{F_n} = f.$$

Тобто

$$f = \operatorname{tg}\varphi. \quad (11.2)$$

Тут кут  $\varphi$  називається *кутом тертя*.

Значення коефіцієнтів тертя і кутів тертя для різних пар матеріалів приводяться у довідковій літературі з деталей машин, фізики.

Розрізняють коефіцієнти тертя спокою  $f_{cn}$  і тертя руху  $f$ . Вони підлягають умові

$$f < f_{cn} \quad (11.3)$$

## 11.2.2. Фактори, що впливають на коефіцієнт тертя

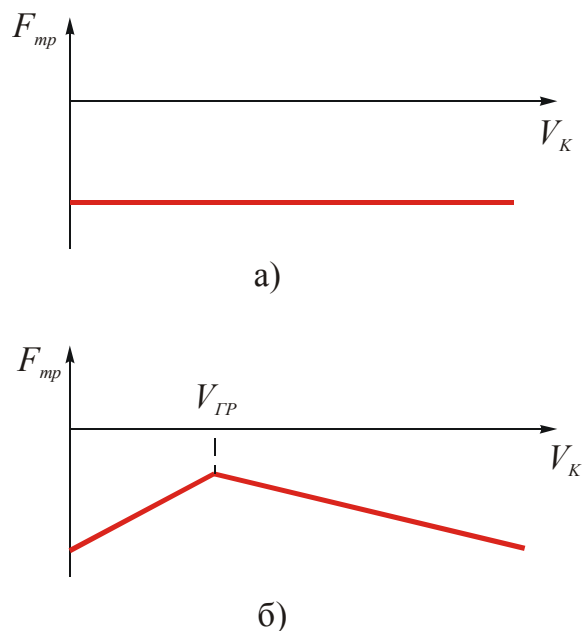
Коефіцієнт тертя не є сталою величиною. На нього впливає цілий ряд конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів.



Зупинимось детальніше на останньому факторі.

Згідно з Кулоном коефіцієнт тертя не залежить від швидкості ковзання (рис. 11.4 а). При  $F_n = Const$  і  $F_{mp} = Const$ .

На практиці сила сухого тертя залежить від швидкості ковзання (рис. 11.4 б).



**Рис. 11.4 Залежність сили тертя від швидкості ковзання:**

**а – за Амантоном-Кулоном; б – на практиці**

Існує оптимальне значення  $V_{gp}$  (гранична швидкість), за якої сила тертя, а значить і коефіцієнт тертя, мінімальні. В зоні малих швидкостей ковзання спостерігається різке падіння сили тертя при збільшенні швидкості. За такої залежності між силою тертя і швидкістю ковзання при малих швидкостях переміщень спостерігається нестійкий (стрибкоподібний) рух. Таке явище характерне для технологічного обладнання. Воно супроводжується нерівномірністю подачі, підвищеним зносом спрямовуючих та інструменту.

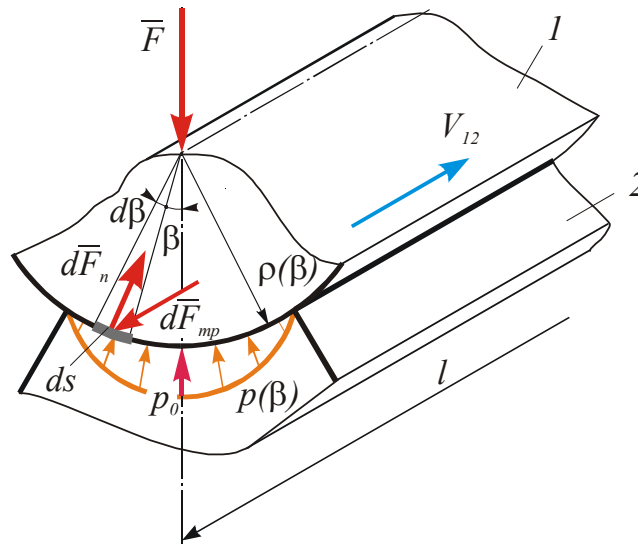
В механізмах виникають додаткові динамічні навантаження, знижується точність роботи обладнання.

Для усунення цього явища заміняють сухе тертя рідинним зі спеціальним гідростатичним мастилом. Замість традиційних чавуну та бронзи для спрямовуючих та повзунів застосовують, де це можливо, фторопласт. Заміняють тертя ковзання тертям кочення.

### 11.2.3. Тертя в нижчих кінематичних парах

Окрім перелічених факторів, які впливають на величину коефіцієнта тертя, слід відзначити також форму і розташування елементів кінематичної пари. Для різних їх типів визначають *зведені коефіцієнти тертя*.

Розглянемо поступальну кінематичну пару, утворену ланками 1 і 2 (рис. 11.5), що контактують по поверхні довільної форми.



**Рис. 11.5 Поступальна пара з поверхнею контакту довільної форми**

Довжина поверховості контакту  $l$ . Радіус кривини поверхні контакту в довільній точці позначимо  $\rho(\beta)$ . Виділимо елементарну площадку контакту  $l \cdot ds$ . Сила тертя на ній

$$dF_{mp} = f dF_n;$$

$$dF_n = p(\beta) l ds = p(\beta) l \rho(\beta) d\beta.$$

Тобто

$$dF_{mp} = fp(\beta) l \rho(\beta) d\beta \quad (11.4)$$

Результуюча сила тертя:

$$F_{mp} = fl \int_{-\beta_1}^{\beta_2} p(\beta) \cdot \rho(\beta) d\beta \quad (11.5)$$

### 11.2.3.1. Тертя в клинчастому повзуні

Розрахункова схема такого повзуна зображена на рис. 11.6.

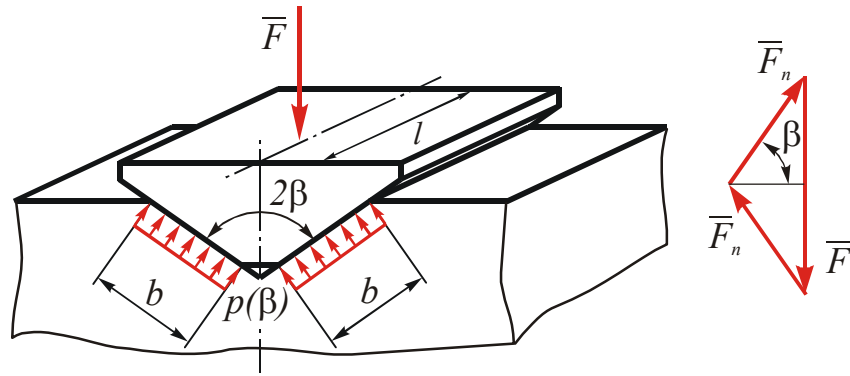


Рис. 11.6



### 11.2.3.2. Тертя в циліндричному повзуні

В циліндричному повзуні (рис. 11.7) радіус кривини поверхні контакту  $\rho(\beta) = r = Const$

#### а) Пара не прироблена.

Приймають рівномірний розподіл тиску  $p(\beta) = p = Const$  (рис. 11.7). Тоді з умови рівноваги повзуна, проектуючи силу  $F_n$  на напрямок сили  $F$ , отримаємо:

$$F = 2 \int_0^{\pi/2} prl \cdot \cos \beta d\beta = 2prl .$$

Звідси

$$p = p(\beta) = \frac{F}{2rl} .$$

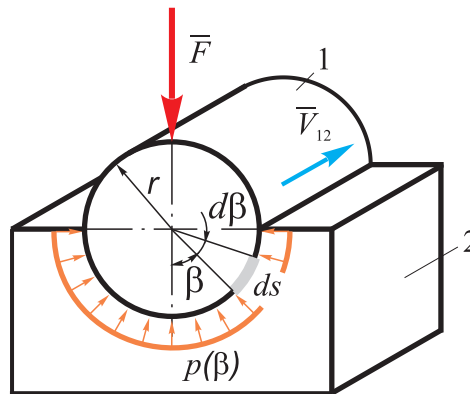


Рис. 11.7 Циліндричний повзун з неприробленою парою

Підставляючи  $p(\beta)$  і  $\rho(\beta)$  в (11.5), отримаємо

$$F_{mp} = fl \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{F}{2rl} \cdot r d\beta = fF \cdot \frac{\pi}{2} = f' \cdot F .$$

Тут зведений коефіцієнт тертя

$$f' = \frac{\pi}{2} f . \quad (11.7)$$

#### б) Пара прироблена.

В приробленій парі приймається косінусоїдальний закон розподілення тиску (рис. 11.8).

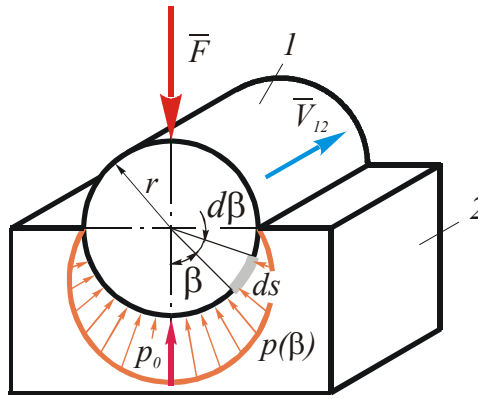


Рис. 11.8 Циліндричний повзун з приробленою парою

$$p(\beta) = p_0 \cos \beta.$$

Тоді

$$F_{mp} = fl \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p_0 \cos \beta \cdot r d\beta = 2 f r l p_0. \quad (11.8)$$

З умови рівноваги ланки 1:

$$F = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p l \cos \beta ds = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p_0 l \cos^2 \beta r d\beta = p_0 l r \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2 \beta d\beta = p_0 l r \frac{\pi}{2}.$$

Звідси

$$p_0 = \frac{2F}{\pi l r}. \quad (11.9)$$

Тоді із формули (11.8)

$$F_{mp} = 2 f r l \cdot \frac{2F}{\pi l r} = \frac{4}{\pi} f F = f' \cdot F,$$

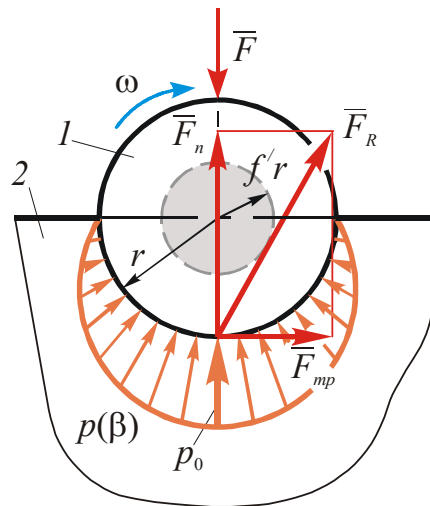
де зведений коефіцієнт тертя

$$f' = \frac{4}{\pi} f \quad (11.10)$$

### 11.2.3.3. Тертя в обертальній парі

В обертальних кінематичних парах з елементами, виконаними у вигляді круглих циліндрів (рис. 11.9), і навантажених силою  $F$ , розподіл тиску приймається таким самим, як і в циліндричному повзуні. Сила тертя визначається так само, як і для того випадку.



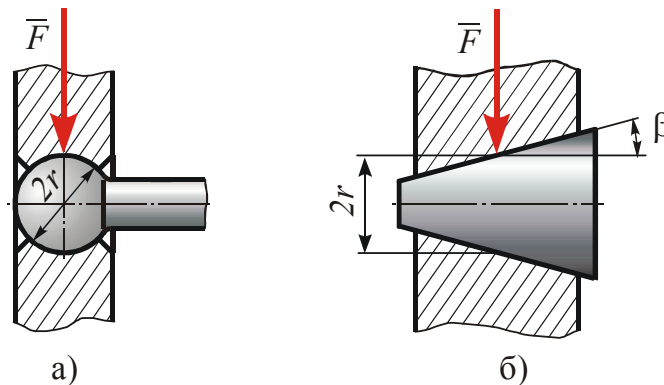


**Рис. 11.9** Обертальна пара

Сумарна сила  $\bar{F}_R = \bar{F}_{mp} + \bar{F}_n$  (рис. 11.9) дотикається до кола радіуса  $f'r$ , що окреслює так званий *круг тертя*. Момент цієї сили відносно осі шарніра перешкоджає обертанню.

Для сферичних пар (рис. 11.10 а) зведений коефіцієнт тертя  $f' = 1,27f$ . Для пар з конічними елементами (рис. 11.10 б) зведений коефіцієнт тертя

$$f' = \frac{f}{\cos \beta}.$$



**Рис. 11.10** Обертальні пари: а – сферичний шарнір; б – з конічними елементами