

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



Кафедра механічної та біомедичної інженерії
О.М. Долгов

**ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МЕХАНІЗМІВ І МАШИН
ПРЕЗЕНТАЦІЯ ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ**

для бакалаврів спеціальності 274 Автомобільний транспорт

**ДНІПРО - 2022
НТУ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Рекомендовано до видання навчально-методичним відділом (протокол № від . .2022) за поданням методичної комісії спеціальності 274 Автомобільний транспорт (протокол № 7 від 18.11.2022).

Долгов О. М.

Тертя та зношування елементів механізмів і машин [Електронний ресурс] : презентація лекційних занять для бакалаврів спеціальності 274 Автомобільний транспорт / О.М. Долгов ; Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» . – Дніпро, 2022. – 38 с.

ЗМІСТ

- 1. ВСТУП 3**
- 2. ВИДИ ТЕРТЯ В КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАХ 5**
 - 2.1. Класифікація тертя за кінематичною ознакою 5**
 - 2.2. Класифікація тертя за станом поверхні 6**
 - 2.3. Тертя спокою і тертя руху 6**
- 3. СУХЕ ТЕРТЯ 7**
 - 3.1. Закон Амонтона-Кулона 7**
 - 3.2. Фактори, що впливають на коефіцієнт тертя 8**
 - 3.3. Тертя в нижчих кінематичних парах 9**
 - 3.3.1. Тертя у поступальній кінематичній парі довільної форми 10**
 - 3.3.2. Тертя в клинчастому повзуні 10**
 - 3.3.3. Тертя в циліндричному повзуні 11**
 - 3.3.4. Тертя в обертальній парі 12**
 - 3.3.5. Тертя у п'яті 13**
 - 3.3.6. Тертя у гвинтовій парі 14**
 - 3.3.7. Тертя в кінематичних парах з гнучкою ланкою 16**
- 4. РІДИННЕ ТЕРТЯ 17**
 - 4.1. Тверде мастило 18**
 - 4.2. Рідке мастило 18**

4.3. Консистентне мастило	20
4.4. Газове мастило	21
4.5. Граничне мастило	21
4.6. Тертя ковзання змащених тіл	22
5. ЗНОШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КІНЕМАТИЧНИХ ПАР	24
5.1. Види зносу	24
5.2. Стадії зношування	25
5.3. Кількісна оцінка зносу	27
6. ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ НА ТЕРТЯ	29
6.1. Механічний коефіцієнт корисної дії	29
6.2. ККД послідовно з'єднаних механізмів	30
6.3. ККД паралельно з'єднаних механізмів	31
6.4. Зв'язок крутних моментів ведучого та веденого валів механізму	32
7. КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ТА ЗАПИТАННЯ	33
ЛІТЕРАТУРА	36

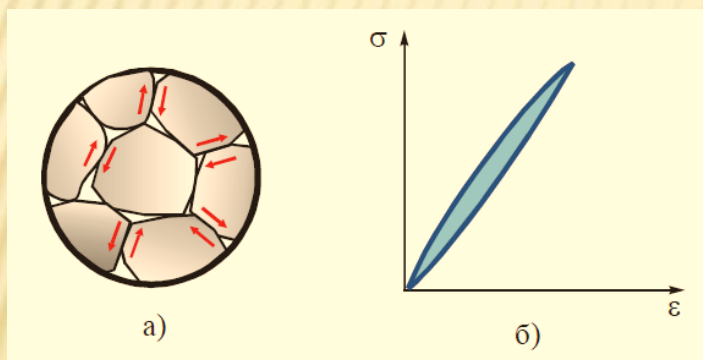
1. ВСТУП

Під час роботи машин та механізмів має місце явище, яке перешкоджає рухові його ланок та супроводжується розсіюванням механічної енергії. Це явище називається тертям. Енергія, що витрачається на тертя, перетворюється у теплоту. Одночасно з цим відбувається згладжування шорсткост поверхонь, що стикаються, тобто їхнє зношення. Підраховано, що біля третини світових енергетичних ресурсів даремно витрачається на роботу пов'язану з тертям. Цілком зрозуміло, що бажано щоб ці втрати були мінімальними. Також відомо, що більшість (80%) деталей машин виходять з ладу через зношення; забезпечити міцність деталей простіше та дешевше, ніж стійкість проти спрацювання.

З іншого боку, тертя – корисне явище, на використанні сил тертя ґрунтується робота багатьох машин і механізмів (рух транспортних засобів, пасової та фрикційної передач, фрикційних муфт, зчеплень, гальм). Галузь науки, що охоплює комплекс питань, пов'язаних з тертям та зносом деталей машин, має назву *триботехніка*.

Сили тертя – це сили, що виникають у кінематичних парах при відносному русі ланок; вони обумовлені реакціями в'язей і є складовими цих реакцій.

Тертя – це явище, для пояснення якого запропоновано дві гіпотези: механічну та молекулярну. Згідно з першою гіпотезою, тертя виникає внаслідок деформацій невеликих виступів і западин на поверхнях тертя. Згідно з іншою гіпотезою процес тертя це – подолання сил молекулярної взаємодії у зонах контакту тіл. Таким чином, сила тертя виникає внаслідок механічного зачеплення, пружно-пластичної деформації та молекулярної взаємодії контактуючих елементів поверхонь тертя.



Відрізняють *внутрішнє* і *зовнішнє тертя*. **Внутрішнє тертя – це тертя між частками матеріалу при його деформації (рис. а).** Проявом цього виду тертя є наявність у матеріалу петлі пружного гістерезису (рис. б). Чим ширша петля, тим вищими є демпфіруючі властивості матеріалу, тобто його здатність гасити коливання матеріалів.

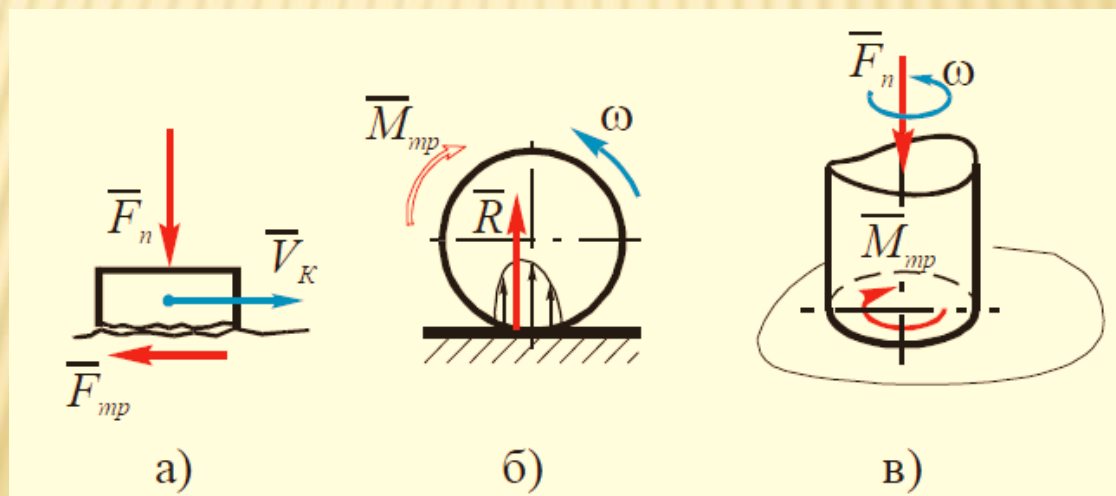
Зовнішнє тертя — це опір відносному зміщенню контактуючих тіл чи спробі викликати це зміщення. Сила цього опору називається силою тертя.

2. ВИДИ ТЕРТЯ В КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАХ

2.1. Класифікація тертя за кінематичною ознакою

Розрізняють:

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



2.2. Класифікація тертя за станом поверхні:

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

2.3. Тертя спокою і тертя руху

Тертя спокою передує 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.

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.

3. СУХЕ ТЕРТЯ

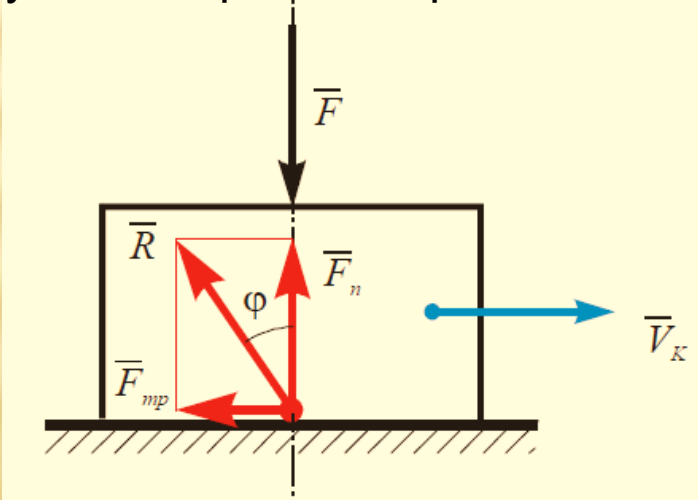
Це тертя має місце за відсутності на поверхнях тертя введеного мастильного матеріалу.

3.1. Закон Амонтона-Кулона

Розглянемо сухе тертя в нижчій поступальній кінематичній парі, коли тіло взаємодіє з площиною.

Сила тертя залежить від величини нормального тиску, направлена в бік, протилежний швидкості ковзання, і визначається коефіцієнтом тертя: $F_{mp} = f \cdot F_n$.

Тут f – коефіцієнт тертя; F_n – сила нормального тиску.



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

Тобто $f = \operatorname{tg}\varphi$. Кут φ називається *кутом тертя*.

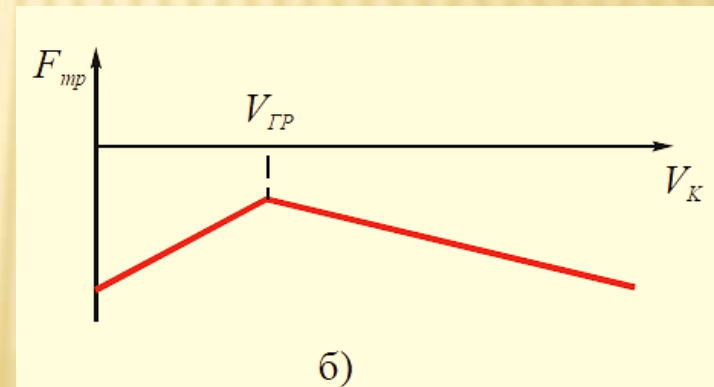
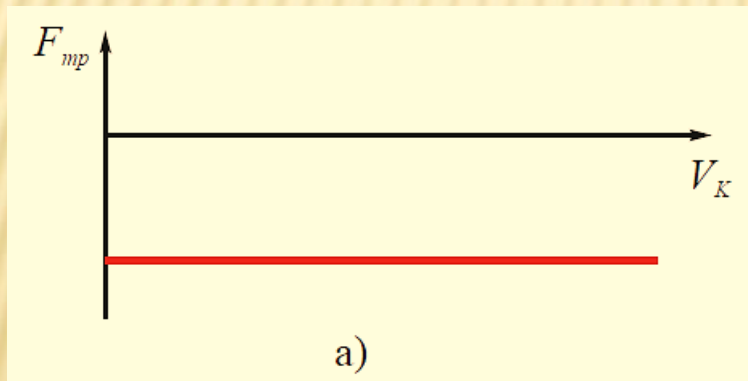
Розрізняють коефіцієнти тертя спокою і тертя руху. Вони підлягають умові: $f < f_{cn}$

3.2. Фактори, що впливають на коефіцієнт тертя

На коефіцієнт тертя впливає ціла низка конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів:

- а) природа контактуючих тіл;
- б) стан поверхні;
- в) наявність мастила
- г) швидкість відносного руху тіл.

Згідно з Кулоном коефіцієнт тертя не залежить від швидкості ковзання (рис. а). На практиці сила сухого тертя залежить від швидкості ковзання (рис. б).

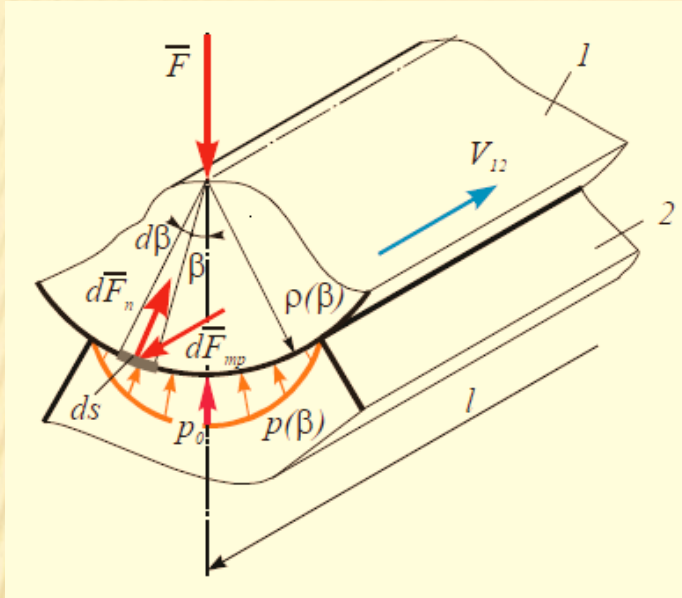


В зоні малих швидкостей ковзання спостерігається різке падіння сили тертя при збільшенні швидкості. За такої залежності між силою тертя і швидкістю ковзання при малих швидкостях переміщень спостерігається нестійкий (стрибкоподібний) рух. Таке явище характерне для технологічного обладнання. Воно супроводжується 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.

3.3. 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*.

3.3.1. Тертя у поступальній кінематичній парі довільної форми

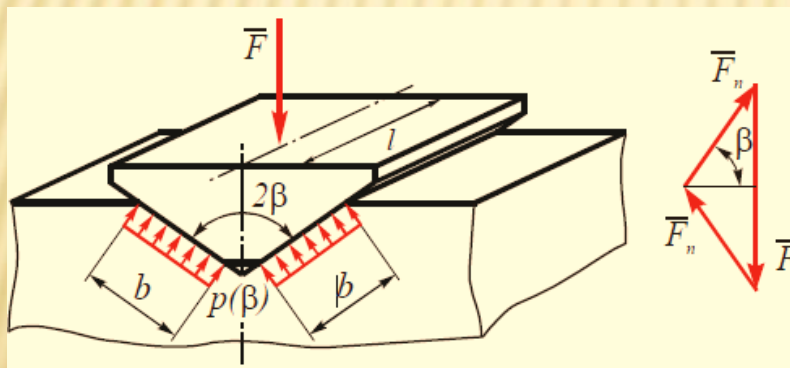


Результуюча сила тертя:

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

Тут l - довжина поверхні контакту, $\rho(\beta)$ - радіус кривини поверхні контакту в довільній точці $p(\beta)$ – функція розподілу зусиль між поверхнями контакту пари.

3.3.2. Тертя в клинчастому повзуні



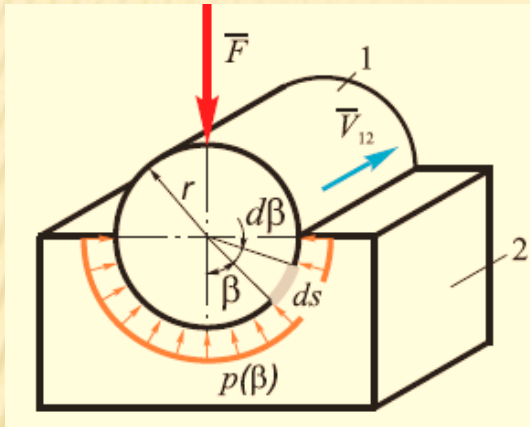
$$F_{mp} = fl \frac{F}{2lb \sin \beta} \cdot 2b = f' \cdot F$$

Тут зведений коефіцієнт тертя для клинчастого повзуна:

$$f' = \frac{f}{\sin \beta}$$

3.3.3. Тертя у циліндричному повзуні

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



а) Пара неприроблена.

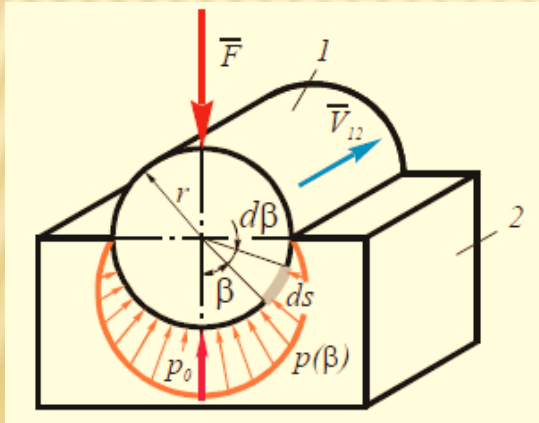
Приймають рівномірний розподіл тиску $p(\beta) = p = Const$.

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

Тут зведений коефіцієнт тертя $f' = \frac{\pi}{2} f$.

б) Пара прироблена.

В приробленій парі приймається косінусоїдальний закон розподілення



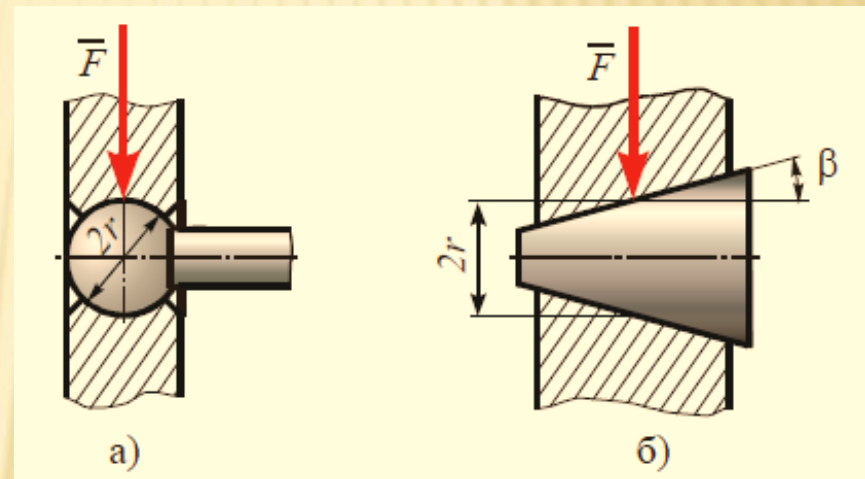
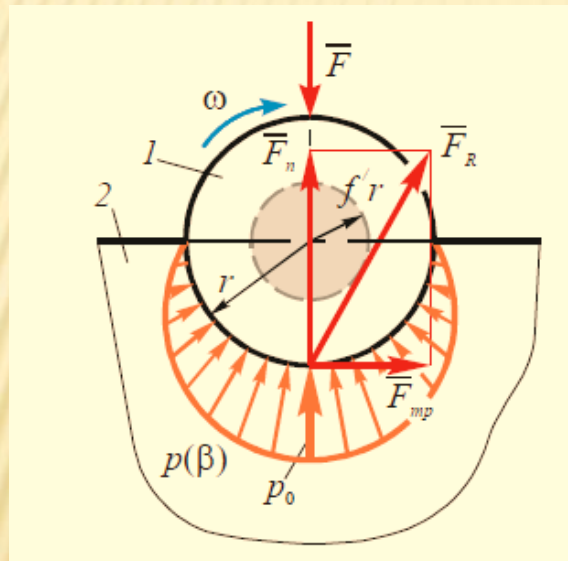
$$p(\beta) = p_0 \cos \beta.$$

$$F_{mp} = 2frl \cdot \frac{2F}{\pi lr} = \frac{4}{\pi} fF = f' \cdot F,$$

Зведений коефіцієнт тертя: $f' = \frac{4}{\pi} f$

3.3.4. Тертя в обертальній парі

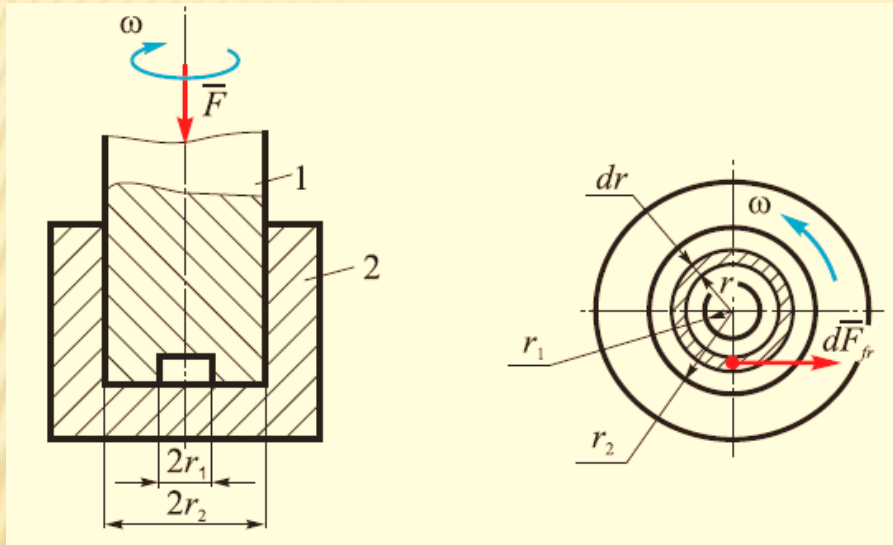
В обертальних кінематичних парах з елементами, виконаними у вигляді круглих циліндрів і навантажених силою F , розподіл тиску приймається таким самим, як і в циліндричному повзуні. Сила тертя визначається так само, як і для того випадку.



Для сферичних пар (а) зведений коефіцієнт тертя $f' = 1,27 f$. Для пар з конічними елементами (б) зведений коефіцієнт тертя $f' = f/\cos(\beta)$,

3.3.5. Тертя у п'яті

На рис. зображена кінематична пара, яка включає п'яту 1 і підп'ятник 2, що навантажена осьовою силою F . В цьому випадку на поверхні п'яти виникає сила тертя вертіння, яка також підлягає закону Амонтона–Кулона.



Якщо вважати розподіл нормального тиску p по всій ширині кільця рівномірним, то можна записати:

$$p = \frac{F}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}.$$

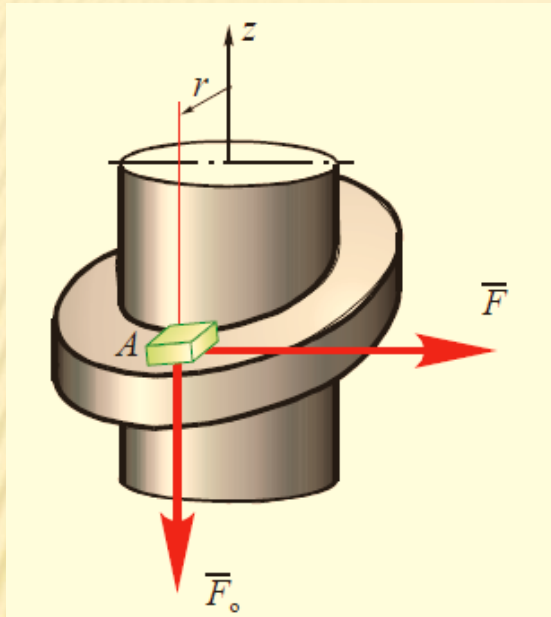
Момент опору, що створюється силою тертя, дорівнює:

$$M_{mp} = \frac{2}{3} fF \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2}.$$

Якщо п'ята не кільцева, тобто $r_1 = 0$, то

$$M_{mp} = \frac{2}{3} F \cdot f \cdot r.$$

3.3.6. Тертя у гвинтовій парі

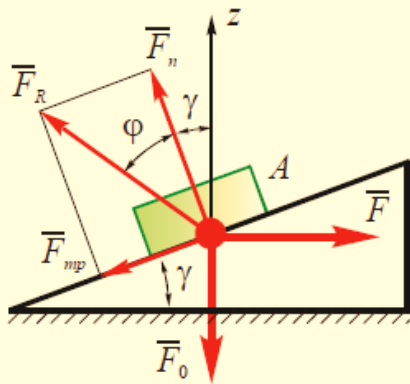


На гайку, представлену елементом A , діє деяка сила F_0 і момент у площині, перпендикулярній до осі z . Цей момент представлений силою F : $M = F \cdot r$.

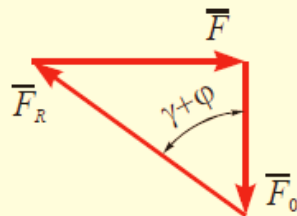
Щоб гайка була у рівновазі або у стані рівномірного руху вздовж різьби, має виконуватись умова рівноваги сил, що діють на гайку.

Із плану сил (рис. б): $F = F_0 \operatorname{tg}(\varphi + \gamma)$

Тут γ – кут підйому гвинтової лінії. Момент, прикладений до гайки: $M = F_0 r \operatorname{tg}(\gamma + \varphi)$.



а)



б)

Ця умова отримана для випадку, коли гайка рухається проти напрямку сили F_0 (затяжка різьби або підйом вантажу домкратом).

Якщо гайка рухається у напрямку сили F_0 , то:

$$F = F_0 \operatorname{tg}(\varphi - \gamma).$$

Якщо $\gamma = \varphi \Rightarrow F = 0$, тобто гайка рухається рівномірно під дією сили F_0 (моменту до гайки прикладати не потрібно).

Якщо $\gamma > \varphi$ – маємо прискорений рух під дією F_0 .

Якщо $\gamma < \varphi$ – маємо **умову самогальмування**. За цієї умови без дії моменту $M = F \cdot r$ рух гайки неможливий.

Після перетворень:

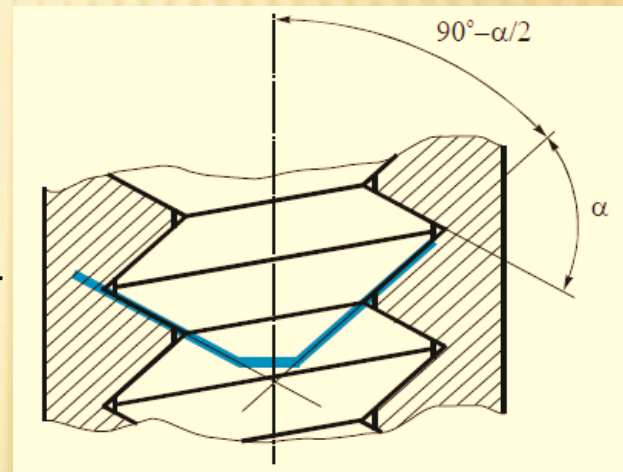
$$F_{mp} = F \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \gamma)}.$$

Цим рівнянням можна скористатися для визначення сили тертя в трикутній різьбі, якщо замість коефіцієнта тертя f підставляти зведений коефіцієнт тертя f' для клинчастого повзуна:

$$f' = \frac{f}{\sin\left(90 - \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{f}{\cos \frac{\alpha}{2}}.$$

Тоді:

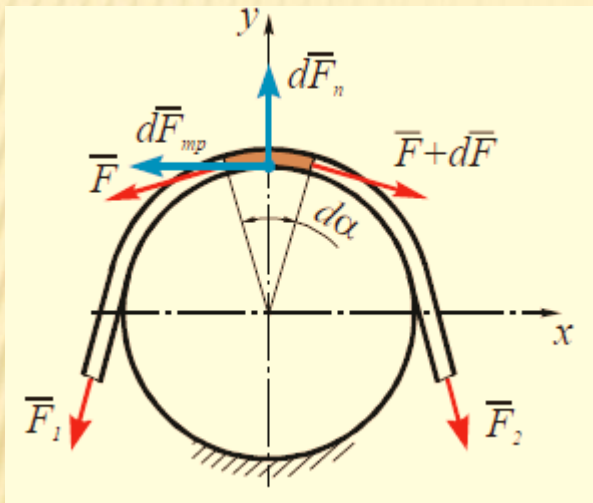
$$F_{mp} = F \frac{f'}{\sin \gamma + f' \cos \gamma}$$



3.3.7. Тертя в кінематичних парах з гнучкою ланкою

Цю задачу вперше розв'язав Л. Ейлер.

Розглянемо гнучке тіло – пас, перекинтий з натягом через шків.



Для зусиль в пасах Ейлер отримав вираз:

$$\frac{F_2}{F_1} = e^{f'\alpha}.$$

Тоді сила тертя між пасом і шківом

$$F_{mp} = F_1(e^{f'\alpha} - 1).$$

Тут α - кут обхвату щківа пасом.

4. РІДИННЕ ТЕРТЯ

Рідинним називається тертя за наявності на поверхні тіл що труться введеного мастильного матеріалу будь-якого типу.

Призначення змащення:

- зменшення коефіцієнту тертя;
- відведення тепла;
- захист від корозії;
- демпфірування динамічних навантажень.

Види мастил:

- тверде;
- рідке;
- газове;
- консистентне;
- граничне.

Розглянемо основні характеристики різних типів мастил.

4.1. Тверде мастило

Тут розділення тіл, що труться, виконується з допомогою твердого мастильного матеріалу. Зазвичай це пилоподібний графіт. Особливих характеристик це мастило не має.

4.2. Рідке мастило

Це натуральні і синтетичні мастила (оливи), вода.

Розглянемо основні характеристики рідких мастил:

а) *В'язкість динамічна* (вимірюється в пуазах) і *кінематична* (вимірюється в градусах Енглера °E).

Один пуаз дорівнює в'язкості рідини, що чинить опір силою в 1 дину переміщенню двох шарів рідини площею 1 см², що знаходяться на відстані 1 см один від одного і взаємно переміщуються з відносною швидкістю 1 см/с: $1 \text{ П} = \text{г} / (\text{см} \cdot \text{с}) = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$

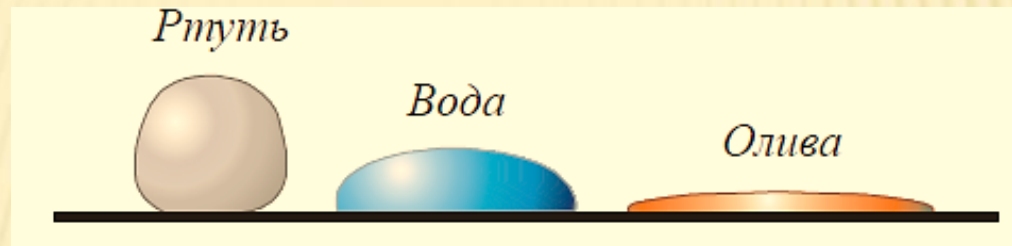
В техніці частіше користуються кінематичною в'язкістю, яку визначають за швидкістю витікання мастила через калібрований отвір діаметром близько 2,8 мм. В'язкість залежить від температури: °E₁₀₀ – кінематична в'язкість при 100°C.

Кінематичну в'язкість визначають за спеціальними таблицями.

б) *Липучість.*

Це здатність мастила змочувати поверхню, тобто утворювати адсорбційний шар на поверхнях тіл, що труться.

Приклади змочування поверхні рідиною:



в) *Температура спалаху парів мастила.*

За деякої температури над поверхнею мастила з'являється полум'я. Для машинних оливок температура спалаху парів становить приблизно 250...300 °С.

г) *Температура застигання.*

При зниженні температури в'язкість мастила збільшується і при деякій критичній температурі воно втрачає свої властивості – застигає. Автомобільний двигун перед запуском обов'язково прогрівають до певної температури.

д) *Кислотостійкість.*

4.3. Консистентне мастило

Його ще називають густим або пластичним. До даного типу мастил відноситься солідол жировий та синтетичний, ЦИАТИМ різних марок, ЛИТОЛ.

Основні характеристики консистентних мастил:

а) *Пенетрація*, що з англійської мови перекладається як *проникнення*.



На поверхню наносять шар мастила і кладуть на нього калібрований конус. За глибиною його проникнення у шар судять про в'язкість мастила.

б) *Температура краплепадіння*.

На паличку беруть невелику кількість мастила і нагрівають. Температура, за якої впала крапля, і є температурою краплепадіння.

в) *Водостійкість*.

Мастило має бути нерозчинним у воді.



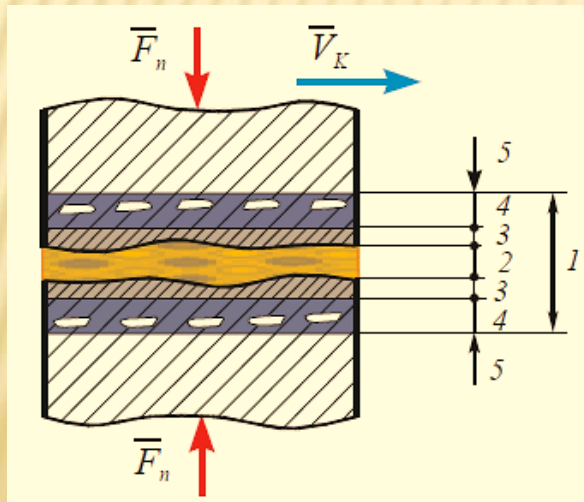
4.4. Газове мастило

Функцію мастила тут виконує газ: повітря, азот, інертні гази. Такий вид змащення широко застосовують в кінематичних парах точних приладів.

4.5. Граничне мастило

Якщо товщина мастильного шару менша 0,0001 мм, то властивості мастила вже відрізняються від об'ємних. Тому тертя і знос таких тіл визначається властивостями контактних поверхонь і властивостями мастильного шару, відмінними від об'ємних.

На рис. зображений розріз зони контакту двох тіл з надтонким введеним мастильним шаром.



Проміжний шар 1 називається *третім тілом* між основними матеріалами фрикційної пари. Він складається з адсорбційного шару мастила 2, плівки оксидів 3, дефектного шару основного матеріалу 4.

4.6. Тертя ковзання змащених тіл

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 .

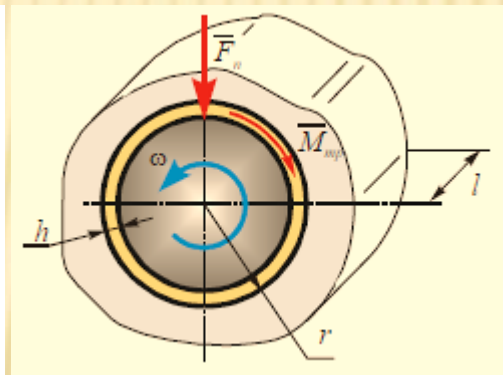
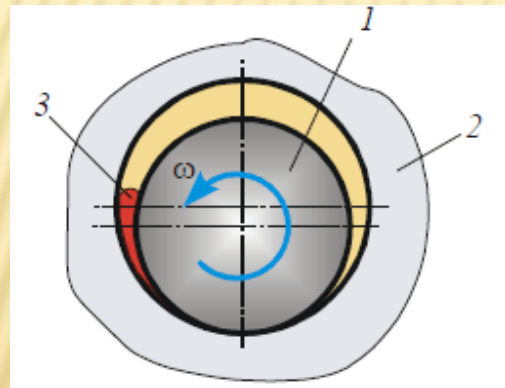
Умови для рідинного тертя:

- а) змащувальна рідина утримується в зазорі;
- б) в шарі мастила має виникати внутрішній тиск, який урівноважує зовнішню силу;
- в) змащувальна рідина повністю розділяє поверхні, що труться;
- г) товщина мастильного шару має бути не меншою мінімальної границі, яка визначається виступами шорсткості поверхонь, що труться.

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 у 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. Для цапфи 1, що лежить у підшипнику 2, виникнення масляного клину 3 пов'язане з різницею діаметрів: діаметр підшипника більший від діаметра цапфи.

При обертанні цапфи у клиновий зазор нагнітається мастило, і вал спливає над мастильним шаром. При великих обертах вісь цапфи прагне збігтися з віссю підшипника.



Момент тертя в підшипнику: $M_{mp} = F_n r f$

Коефіцієнт рідинного тертя у підшипнику:

$$f = \frac{\pi^2 r}{30h} \cdot \frac{\mu n}{p}$$

Тут n – швидкість обертання цапфи.

Для виконання третьої і четвертої умови необхідно забезпечити таку обробку поверхонь, щоб звести до мінімуму їх шорсткість, не допускати значних деформацій цапфи, очищати мастило від сторонніх домішок.

5. ЗНОШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КІНЕМАТИЧНИХ ПАР

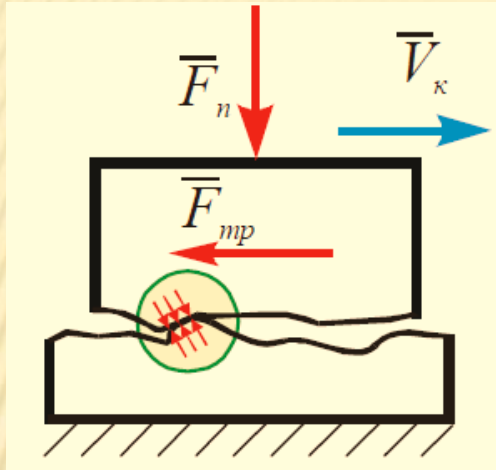
У процесі експлуатації механізмів і машин має місце зношування елементів кінематичних пар. Це зменшує міцність і жорсткість деталей, знижує точність механізму, спотворює форму поверхні.

5.1. Види зносу

В машинобудуванні розглядають такі основні види зносу:

- *механічний знос* як результат механічного впливу;
- *корозійно-механічний знос*, коли механічний вплив супроводжується хімічною взаємодією матеріалу тіл з середовищем;
- *абразивний знос* як результат різання або дряпання поверхні твердими частками;
- *ерозійний знос* як результат впливу потоку рідини або газу;
- *втомний знос*, пов'язаний з викришуванням поверхні при циклічних навантаженнях поверхневого шару;
- *знос при заїданні* як результат захоплення, виривання матеріалу і переносу його з однієї поверхні на іншу (наприклад в передачі гвинт-гайка, черв'ячній, гіпоїдній передачі, і т.п.).

Фізична модель зносу



При ковзанні перед мікронерівністю виникає зона деформованого матеріалу, в якій виникають стисуючі напруження. Після проходження мікронерівності в цій області за рахунок сил тертя матеріал розтягується. Тобто у поверхневому шарі діють повторно-змінні напруження. Матеріал втомлюється, в ньому накопичуються пошкодження, які й приводять до відділення часточок матеріалу.

5.2. Стадії зношування

Є дві стадії зношування:

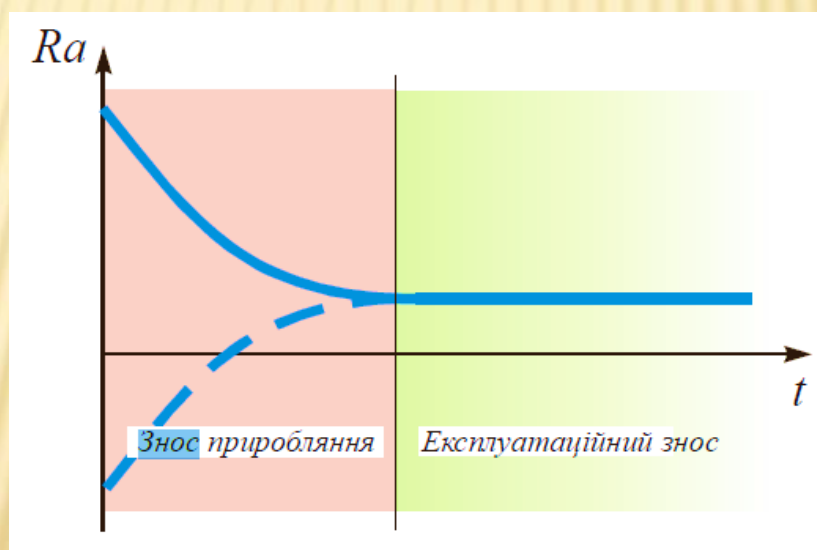
- перша стадія – *знос під час приробляння*;
- друга стадія – *нормальний або експлуатаційний знос*.

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



5.3. Кількісна оцінка зносу

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

Граничний знос – це знос, який відповідає граничному стану деталі.

Допустимий знос – це знос, за якого зберігається працездатність деталі.

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

Швидкість зношування:
$$\gamma = \frac{d\delta}{dt} = k\rho^m V_k^n .$$

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

Для прироблених пар $m = n = 1$. Тоді

$$\gamma = k\rho V_k .$$

Вираз pV_k називають потужністю тертя. Інтенсивність зношування:

$$\gamma = \frac{d\delta}{ds} \frac{ds}{dt} = \gamma_s V_k.$$

$$\gamma_s = \frac{d\delta}{ds}$$

– знос, який припадає на одиницю шляху тертя, мм/км.

Опір матеріалу зносу називається зносостійкістю.

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 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.

6. ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ НА ТЕРТЯ

6.1. Механічний коефіцієнт корисної дії

При усталеному русі механізму має місце співвідношення: $A_p = A_{\text{кк}} + A_{\text{шс}}$.

Де A_p – робота рушійних сил механізму, $A_{\text{кк}}$ – робота корисних сил тертя, $A_{\text{шс}}$ - робота шкідливих сил тертя.

Оскільки завжди існують шкідливі опори сил тертя, то $A_p > A_{\text{кк}}$.

Відношення абсолютної величини роботи (або середньої потужності) корисних сил тертя до роботи (або середньої потужності) рушійних сил за один повний цикл усталеного руху механізму називається механічним коефіцієнтом корисної дії (ККД) механізму:

$$\eta = \frac{A_{\text{кк}}}{A_p} = \frac{N_{\text{кк}}}{N_p} < 1.$$

Поряд з поняттям ККД користуються поняттям *коефіцієнта втрат*:

$$\varphi = \frac{A_{\text{шс}}}{A_p} = \frac{N_{\text{шс}}}{N_p}. \quad \text{Таким чином,} \quad \eta = \frac{A_{\text{кк}}}{A_p} = \frac{A_p - A_{\text{шс}}}{A_p} = 1 - \varphi.$$

6.2. ККД послідовно з'єднаних механізмів

Визначимо ККД складного механізму, що складається з n послідовно з'єднаних механізмів, коефіцієнти корисної дії яких відповідно рівні $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$.

Нехай A_p - робота рушійних сил першого механізму; A_1 - корисна робота першого механізму, що є по відношенню до другого механізму роботою рушійних сил; A_2 - корисна робота другого механізму і т.д. тоді

$$\eta_1 = \frac{A_1}{A_p}, \eta_2 = \frac{A_2}{A_1}, \dots, \eta_n = \frac{A_n}{A_{n-1}}.$$

Перемножимо відповідно ліві і праві частини цих рівностей:

$$\eta_1 \eta_2 \dots \eta_n = \frac{A_1}{A_p} \frac{A_2}{A_1} \dots \frac{A_n}{A_{n-1}} = \frac{A_n}{A_p}.$$

Але $\frac{A_n}{A_{pd}}$ - ККД всього механізму. Отже, $\eta = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n = \prod_{k=1}^n \eta_k$,

тобто ККД складного механізму, що складається з ряду послідовно з'єднаних механізмів, дорівнює добутку окремих ККД.

6.3. ККД паралельно з'єднаних механізмів

При паралельному з'єднанні декількох механізмів із загальним джерелом енергії маємо:

$$A_p = \sum_{k=1}^n A_{pk}, \quad A_{kc} = \sum_{k=1}^n A_k.$$

де A_{pk} - робота рушійних сил окремих механізмів; A_k - корисні роботи, що здійснюються цими механізмами. Зважаючи, що

$\eta_k = \frac{A_k}{A_{pk}}$, для ККД всього механізму отримаємо:

$$\eta = \frac{A_{pc}}{A_p} = \frac{\sum_{k=1}^n A_k}{\sum_{k=1}^n A_{pk}} = \frac{\sum_{k=1}^n \eta_k A_{pk}}{\sum_{k=1}^n A_{pk}}.$$

Якщо, $\eta_1 = \eta_2 = \dots = \eta_n$, то ККД всієї машини є тим же що і для окремого механізму.

Якщо $A_{p1} = A_{p2} = \dots = A_{pn}$, то $\eta = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \eta_k$,

тобто ККД всієї машини дорівнює середньому арифметичному від ККД окремих механізмів.

6.4. Зв'язок крутних моментів ведучого та веденого валів механізму

Нехай ω_1 і ω_n - кутові швидкості відповідно ведучого і веденого валів механізму, η - його ККД. Позначимо крутний момент на ведучому валу через M_p , а момент корисних опорів на веденому валу - через M_{kc} . Тоді $N_p = M_p \omega_1$, $N_{kc} = M_{kc} \omega_n$. Отже,

$$\eta = \frac{N_{kc}}{N_p} = \frac{M_{kc} \omega_n}{M_p \omega_1} = \frac{M_{kc}}{M_p i},$$

де i - передавальне відношення всього механізму. Звідси

$$M_{kc} = \eta i M_p \quad \text{або} \quad M_p = \frac{M_{kc}}{\eta i}.$$

7. КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ТА ЗАПИТАННЯ

1. Як називається галузь науки, що охоплює комплекс питань, пов'язаних з тертям та зносом деталей машин?
2. Навести визначення внутрішнього та зовнішнього тертя.
3. Дати загальну класифікацію тертя за кінематичною ознакою.
4. Як класифікується тертя за станом поверхні?
5. Дати загальне уявлення про тертя спокою і тертя руху.
6. Навести визначення сухого тертя.
7. Сформулювати закон Амонтона-Кулона.
8. Якої умові підлягають коефіцієнти тертя спокою і тертя руху?
9. Перелічити основні фактори, що впливають на коефіцієнт тертя.
10. Як залежить сила сухого тертя від швидкості ковзання?
11. Як визначається тертя у поступальній кінематичній парі довільної форми?
12. Як визначається зведений коефіцієнт тертя у клинчастому повзуні?
13. Навести формули для визначення зведеного коефіцієнту тертя у циліндричному повзуні.
14. Яким приймається розподіл тиску в обертальних кінематичних парах з елементами, виконаними у вигляді круглих циліндрів?

15. Навести формули для визначення зведеного коефіцієнту тертя для сферичних пар і пар з конічними елементами.
16. Як визначається тертя у циліндричній п'яті?
17. Дати стисло характеристику тертя у гвинтовій парі.
18. Надати опис умови самогальмування у гвинтовій парі.
19. Навести формулу Ейлера для визначення тертя в кінематичних парах з гнучкою ланкою.
20. Яке тертя називається рідинним?
21. Перелічити основні призначення змащення.
22. Перелічити основні види мастил.
23. Навести основні характеристики рідких мастил.
24. Навести основні характеристики консистентних мастил.
25. Дати уявлення про граничне мастило.
26. Перелічити умови для рідинного тертя.
27. Навести основні види зносу.
28. Стисло описати стадії зносу.
29. Навести фізичну модель зносу.
30. Як визначається швидкість зношування?

31. Класифікувати матеріали за ознакою зносостійкості.
32. Дати визначення механічного коефіцієнту корисної дії.
33. Дати визначення коефіцієнта втрат.
34. Як визначається ККД складного механізму з ряду послідовно з'єднаних механізмів?
35. Як визначається ККД складного механізму з ряду паралельно з'єднаних механізмів?
36. Навести зв'язок крутних моментів ведучого та веденого валів механізму з урахуванням ККД.

Література

1. Заховайко, О.П., Теорія механізмів і машин. Курс лекцій для студентів спеціальності „Динаміка і міцність машин”/ – К.: НТУУ "КПІ", 2010. – 243 с.
2. В.Т. Павлице, Є.В. Харченко, А.Ф. Барвінький, Ю.Г., Гаршнев. Прикладна механіка. Навчальний посібник. /За ред. В.Т. Павлице. — Львів: «Інтелект-Захід», 2004. — 368 с.
3. Теорія механізмів і машин/ А.С.Кореняко; Під ред. М.К.Афанасьєва.-К.: Вища шк. Головне вид-во, 1987.- 206с.
4. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. -К.: Наукова думка, 2001. -660 с.
5. Кореняко О.С. Теорія механізмів і машин: Навч. посібник. -К.: Вища школа, 1987. -206 с.
6. Механіка машин [Електронний ресурс] : електронний підручник / О. М. Долгов; НТУ «Дніпровська політехніка» . – Дніпро , 2018. – 224 с.