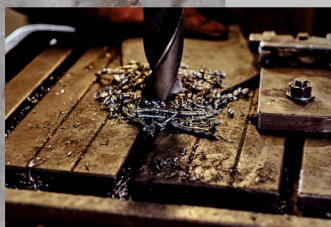


# ТЕРТЯ, ЗМАЩЕННЯ ТА ЗНОС МАТЕРІАЛІАЛІВ



---

Методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
спеціальності «Матеріалознавство»

Хмельницький національний університет

# **ТЕРТЯ, ЗМАЩЕННЯ ТА ЗНОС МАТЕРІАЛІВ**

*Методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
спеціальності 132 «Матеріалознавство»*

*Затверджено на засіданні кафедри  
трибології, автомобілів та матеріалознавства.  
Протокол № 9 від 09.05.2024*

Хмельницький 2024

Тертя, змащення та знос матеріалів : методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 132 «Матеріалознавство» / О. М. Маковкін. Хмельницький : ХНУ, 2024. 33 с.

Укладач: Маковкін О. М., канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск: Диха О. В., д-р техн. наук, проф.

Випусковий редактор: Яремчук В. С.

Технічне редагування і верстка: Карпанасюк В. П.

Макетування здійснено редакційно-видавничим відділом Хмельницького національного університету (м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1). Підп. 25.06.2024. Зам. № 102є/24, електронне видання, 2024.

© ХНУ, 2024

## Вступ

---

Дисципліна «Тертя, змащення та знос матеріалів» є складовою професійної підготовки здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, які навчаються за освітньо-професійними програмами в межах спеціальності 132 «Матеріалознавство».

Дисципліна, обсягом п'ять кредитів ЄКТС, передбачає теоретичний курс лекцій та лабораторний практикум. Завдяки вивченню дисципліни здобувачі отримують комплексні знання та навички, необхідні для подальшого професійного розвитку у галузях матеріалознавства та автомобільного транспорту, що сприятиме їх успішній кар'єрі та можливості впровадження новітніх технологій у виробництво та експлуатацію машин.

**Мета лабораторного практикуму** – формування у здобувачів практичних навичок і компетентностей, які необхідні для проведення трибологічних досліджень, аналізу отриманих результатів і застосування цих знань у реальних інженерних завданнях.

**Завданнями дисципліни** є засвоєння методики проведення робіт з вивчення трибологічних властивостей матеріалів, включаючи методи вимірювання тертя, зносу та ефективності змащування. Формування навичок використання сучасних приладів і обладнання для трибологічних досліджень. Розвиток вміння аналізувати результати експериментів і робити на їх основі обґрунтовані висновки. Ознайомлення з різними типами змащувальних матеріалів та їх характеристиками, вивчення критеріїв вибору змащувальних матеріалів для конкретних умов експлуатації. Вивчення механізмів тертя та зносу, а також способів їх зниження через застосування сучасних технологій і матеріалів.

Лабораторні роботи з дисципліни мають практичний характер. У кожній роботі стисло викладені основні теоретичні положення, необхідні для виконання завдань, а також методика проведення досліджень і завдання для самостійної роботи здобувачів. Крім цього, надається приклад оформлення звіту про виконану роботу та контрольні питання для оцінки ступеня засвоєння здобувачами отриманих знань.

Вивчення дисципліни у повному обсязі сприятиме розширенню і поглибленню у здобувачів вищої освіти загальних та фахових **компетентностей** та набуття ними **результатів** навчання, передбачених освітньою програмою, зокрема: здатність враховувати соціальні, екологічні, етичні, економічні та комерційні міркування, що впливають на реалізацію технічних рішень; здатність дотримуватися професійних і етичних стандартів фахові компетентності, встановлені освітньою програмою; здатність аналізувати основні види відмов деталей автомобілів, ідентифікувати їх причини; здатність розробляти технологічні процеси відновлення зношених поверхонь деталей автомобіля; здатність застосовувати засоби технічного сервісу автомобілів в умовах авторемонтних виробництв, проектувати авторемонтні дільниці. А також результати навчання: аналізувати основні види відмов деталей

автомобілів, ідентифікувати їх причини; розробляти технологічні процеси відновлення зношених поверхонь деталей автомобіля; застосовувати засоби технічного сервісу автомобілів в умовах авторемонтних виробництв, проєктувати авторемонтні дільниці.

**Загальні методичні поради.** Глибоке вивчення здобувачем вищої освіти теоретичного матеріалу є головною передумовою виконання лабораторної роботи. Ґрунтовно опанувавши теоретичні відомості з теми роботи, він зможе проаналізувати, зрозуміти та пояснити отримані результати. Ступінь підготовки до виконання лабораторної роботи перевіряється шляхом усного опитування на початку заняття. Здобувач, який не засвоїв необхідного теоретичного матеріалу, до виконання лабораторної роботи не допускається.

За результатами виконання роботи складається звіт. Він має містити: назву, мету роботи, вихідні дані, детальний розрахунок необхідних показників, результати та висновки з виконаної роботи. Здобувач, який не підготував звіт з роботи, до її захисту не допускається.

Захист лабораторної роботи здійснюється на наступному занятті у формі усного опитування, що дає змогу найбільш об'єктивно виявити якість засвоєних знань та здатність до критичного мислення. Для самоконтролю знань до кожної лабораторної роботи розроблено перелік питань. Здобувачів, які успішно виконали всі заплановані лабораторні роботи та захистили їх, допускаються до підсумкового семестрового контролю з дисципліни.

Оцінювання лабораторних робіт здійснюється за інституційною чотирибальною шкалою. Оцінки «відмінно», «добре», «задовільно», «незадовільно» виставляються викладачем в електронному журналі групи в електронній мережі університету. Оцінка за лабораторний практикум є складовою підсумкової семестрової оцінки здобувача.

Оцінку **«відмінно»**, отримує здобувач за ґрамотні, логічні і повні відповіді на контрольні питання та якісне оформлення роботи (схеми, графіки, епюри).

Оцінку **«добре»**, отримує здобувач за повні відповіді на контрольні питання з деякими неточностями або похибками та якісне оформлення роботи (схеми, графіки, епюри).

Оцінку **«задовільно»**, отримує здобувач за неповні відповіді на контрольні питання з неточностями, похибками та якісне оформлення роботи (схеми, графіки, епюри).

Оцінку **«незадовільно»**, отримує здобувач за абсолютно неправильні відповіді на контрольні питання та неякісне оформлення роботи (схеми, графіки, епюри).

Перед допуском до виконання роботи здобувачі проходять інструктаж із техніки безпеки та охорони праці з фіксацією їх підписів у відповідному журналі, який зберігається у відповідальній особі лабораторії.

Методичні рекомендації можуть бути корисними здобувачам, які навчаються за освітньо-професійними програмами спеціальності 274 «Автомобільний транспорт».

# Лабораторна робота 1.

## Визначення коефіцієнта тертя за допомогою методу наклонної поверхні

**Мета:** формування практичних навичок визначення коефіцієнта тертя з використанням похилої поверхні.

**Прилади і обладнання:** похила площина, експериментальні зразки прямокутної форми, лінійка.

### Теоретичні відомості

**Зовнішнє тертя** – явище опору відносному переміщенню, що виникає між двома тілами в зонах зіткнення поверхонь дотичних до них, супроводжуване дисипацією енергії. Кількісною мірою зовнішнього тертя є сила тертя. Під силою зовнішнього тертя  $F_{з.т.}$  розуміють силу опору відносному ковзанню, яка лежить в площині торкання двох твердих тіл. Іноді силу тертя  $F$  плутають із зовнішньою силою  $F_о$ , прикладеною до контактуючих тіл і рівною їй за величиною але протилежною за напрямом, як показано на рис. 1.1.

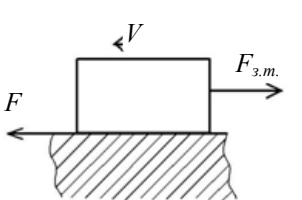


Рис. 1.1 – Схема до визначення сили зовнішнього тертя

У механіці силу тертя вважають неконсервативною, тобто для якої робота залежить від траєкторії руху точки прикладення сили.

При додаванні зовнішньої сили спочатку спостерігається мікроскопічний частковий оборотний зсув твердих тіл у напрямі дії сили – попередній зсув. Сила, відповідна максимальній величині попереднього зсуву, буде рівною за величиною і протилежною за напрямом силі тертя спокою  $F_c$ , як показано на рис. 1.2.

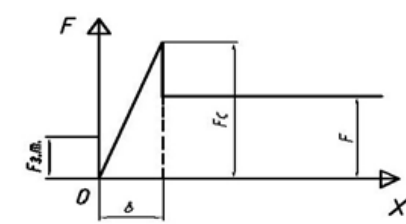


Рис. 1.2 – Зміна сили зовнішнього тертя залежно від переміщення  $x$

Сила  $F_{з.т.}$  за величиною менша сили тертя спокою і називається неповною силою тертя спокою.

Сила тертя, що виникає при терті ковзання, називається силою тертя ковзання. Зазвичай ця сила менше або рівна за величиною силі тертя спокою. Розглянемо взаємодію твердих тіл при зрушенні.

Експериментально встановлено, що при зрушенні сила тертя зростає при збільшенні зсуву одного твердого тіла щодо іншого до деякого значення, потім залишається незмінною і не залежною від переміщення (див. рис. 1.2).

Метод похилої площини виявляється найбільш простим способом вимірювання коефіцієнта тертя. Використання цього методу віддзеркалює перші погляди дослідників тертя на натуру тертя. Це ті погляди, які пояснювали природу тертя тільки лише механічним зацепленням нерівностей поверхонь пари тертя при їх відносному переміщенні. Загалом ці погляди зображують механічну теорію тертя.

Головний постулат механічної теорії – робота тертя витрачається на протягуванні однієї поверхні по шорстких нерівностях іншої. Вперше поняття про коефіцієнт тертя в неявному вигляді викладається в дослідженнях Леонардо да Вінчі «Кожне тіло, що треться, виявляє при терті опір, рівний одній чверті своєї ваги, за умови зіткнення рівної площини з полірованою площиною» [1]. Використовуючи сучасну символіку, можна записати наслідки досліджень Леонардо да Вінчі таким чином (рис. 1.3):

$$T = fN; \quad f = \frac{T}{N}, \quad (1.1)$$

де  $T$  – сила опору ковзання (сила тертя);  $N$  – тиск тіла на площину ковзання;  $f$  – величина, що зветься у сучасній науці коефіцієнтом тертя.

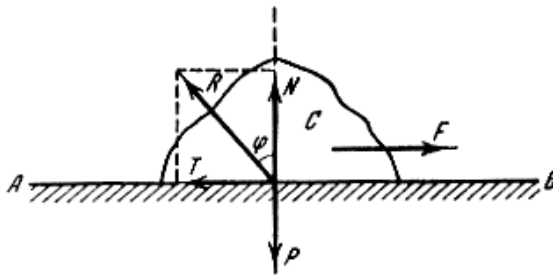


Рис. 1.3 – Рух тіла вздовж площини з урахуванням тертя

У 1699 році оригінальні роботи на тему тертя в щорічниках французької королівської академії наук опублікував Р. Амонтон. Він знову відкрив забутий закон тертя Леонардо да Вінчі: сила тертя пропорційна навантаженню на поверхні, що труться, не залежить від розмірів тіл, а коефіцієнт тертя не змінюється і дорівнює 0,3.

Відношення сили тертя до нормальної відносно поверхні тертя зовнішній силі (або нормальної складовій цієї сили) називається коефіцієнтом тертя.

Інколи цю формулу помилково називають законом Кулона. Кулон запропонував абсолютно іншу формулу:

$$f = k + \frac{A_0}{N}, \quad (1.2)$$

де  $k$  – коефіцієнт, залежний від властивостей поверхонь взаємодіючих тіл;  $A_0$  – коефіцієнт зчеплення цих поверхонь.

Під поверхнею тертя розуміють номінальну поверхню твердого тіла, на якій здійснюється взаємодія твердих тіл при зовнішньому терті. Визначення сил і коефіцієнтів тертя представляє великий практичний і теоретичний інтерес. Відомо, наприклад, що значення коефіцієнта тертя із збільшенням гладкості поверхні зменшується, але при дуже високому ступені гладкості починає різко зростати. Із збільшенням гладкості зменшується значення когезійного компонента (когезія – зчеплення (тяжіння) молекул (атомів, іонів) у фізичному тілі. Це обумовлено міжмолекулярною взаємодією і (або) хімічним зв'язком), тому що зменшується кількість нерівностей, які деформуються або зрізуються, але поступово починають зростати фактична площа контакту і коефіцієнт тертя.

З геометричних міркувань маємо:

$$T = N \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.3)$$

Порівнюючи ці рівності, знаходимо:

$$\operatorname{tg} \varphi = f. \quad (1.4)$$

Остання формула є основною у питаннях рівноваги при існуванні тертя. Вона може бути одержана наступним простим шляхом. Тіло  $C$  може знаходитись у рівновазі на площині  $AB$  з тертям під дією похилої сили  $Q$ , що включає в себе його вагу, (рис. 1.4), тільки в тому випадку, коли тангенціальна складова  $F$  цієї сили задовольняє умові:

$$F \leq T \text{ чи } N \operatorname{tg} \alpha \leq N f. \quad (1.5)$$

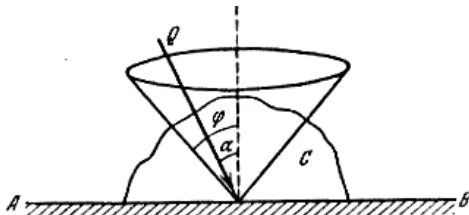


Рис. 1.4 – Рівновага при існуванні тертя



Оскільки  $N$  – суттєво позитивна величина, то:

$$\operatorname{tg} \alpha \leq 1. \quad (1.5)$$

Міркування про динамічний коефіцієнт тертя пов'язаний з іменем геніального математика Леонарда Ейлера, члена Російської академії наук.

Свої дві роботи «Про тертя твердих тіл» і «Про зменшення опору тіла» він опублікував у 1750 р. В першій з них Ейлер чітко формулює положення про те, що сила тертя розташована у площині, дотичної до поверхонь, які труться одна об одну, і спрямована в бік, протилежний відносній швидкості ковзання кожної з поверхонь. Далі він знаходить умову, що визначає можливість рівноприскореного і рівноуповільненого руху при існуванні тертя. Застосовуючи ці загальні міркування у випадку ковзання тіла вздовж похилої поверхні з тертям, Ейлер приходять до нового визначення коефіцієнта тертя, котрий на відміну від способу Парана, можна назвати динамічним.

Виведена формула Ейлера, яка виражає коефіцієнт тертя через величини, що легко вимірюються, може бути отримана таким чином. Нехай тіло вагою  $P$  починає ковзання з положення  $A$  без початкової швидкості з тертям вздовж площини, похилої до горизонту під кутом  $\alpha$ , і за час  $t$ , проходить шлях  $S$  (рис. 1.5).

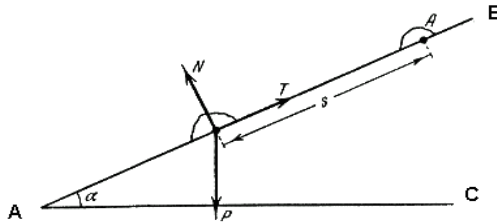


Рис. 1.5 – Похила площина

Тіло, яке ковзає, знаходиться під дією сили тяжіння  $P$ , яка направлена вертикально вниз, нормальної реакції  $N$  похилої площини і сили тертя  $T$ , що направлена уздовж похилої площини у сторону, протилежну швидкості тіла. Початкова швидкість тіла, згідно за умови, дорівнює 0. Користуючись законом про живу силу для поступового руху отримаємо:

$$\frac{m^2}{2} = PS \sin \alpha - TS,$$

де  $m$  – маса тіла, що дорівнює  $P/g$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння. Згідно за законом Амонтона сила тертя:

$$T = fN,$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя тіла на площині.

Помічаючи, що  $N = P \cos \alpha$ , запишемо силу тертя таким чином:

$$T = fP \cos \alpha.$$

Підставляючи значення  $m$  і  $P$  у рівняння живої сили, після перетворень будемо мати:

$$f = \operatorname{tg} \alpha - \frac{2S}{gt^2 \cos \alpha}. \quad (1.6)$$

Виміривши шлях  $S$ , який тіло пройшло вздовж похилої площини, та час  $t$ , що витрачений на проходження цього шляху, і знаючи кут  $\alpha$  ухилу площини до горизонту, згідно за формулою Ейлера легко обчислити коефіцієнт тертя ковзання.

### Порядок виконання роботи

1. Покласти шорстку дошку (наприклад ДСП) на стіл.

2. Встановити на дошку стальний зразок. Піднімаючи дошку за один кінець, дочекатися моменту, коли зразок перейде у стан руху з стану спокою. Зафіксувати цей момент, визначаючи висоту підйому вільного кінця дошки над площиною столу на лінійці. Виміряти величину другого катета при куті підйому дошки  $\alpha$ . Визначити тангенс кута підйому  $\alpha$  по відношенню до катетів, що виміряли. Відповідно визначити коефіцієнт статичного тертя:

$$f_{cm} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Визначити силу тертя  $T_{cm}$ :

$$T_{cm} = f_{cm} N.$$

Дані записати до таблиці 1.2.

**Таблиця 1.2 – Результати досліджень**

Пара тертя	Вага вантажу, $N$	$BC$	$AC$	$\operatorname{tg} \alpha$	$\alpha$	$f_{cm}$	$F_{cm} = f_{cm} N$

3. Повторити експеримент з множиною матеріалів зразка, які існують у наявності.

Порівняти отримані результати експериментів.

4. Повторити експерименти, замінивши похилу площину (дошку) на ту, яка полірована (з меншою величиною шорсткості).

## Зміст звіту

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Прилади і обладнання що використовуються в лабораторній роботі.
4. Короткі теоретичні відомості.
5. Таблиці, графіки, формули.
6. Висновок.

## Контрольні питання

1. Що таке коефіцієнт тертя?
2. Чим відрізняється статичний коефіцієнт тертя від динамічного?
3. У чому полягає суть умови рівноваги при існуванні тертя?
4. Як визначається коефіцієнт тертя за Параном?
5. З'ясуйте таке поняття, як конус тертя.
6. Докажіть, що метод похилої площини для вимірювання статичного коефіцієнта тертя може бути використаний у реальній інженерній практиці.
7. Докажіть теоретично, що коефіцієнт динамічного тертя менше, ніж коефіцієнт статичного тертя.
8. Якими засобами можна зменшити величину коефіцієнта статичного тертя?

*Література:* [1, с. 71–73]

## *Лабораторна робота 2.*

# Визначення коефіцієнта сили сухого тертя (тертя кочення)

---

**Мета:** формування практичних навичок визначення коефіцієнта тертя кочення за схемою «похилий жолоб–кулька».

**Прилади і обладнання:** жолоб, кулька, лінійка.

### Теоретичні відомості

При коченні колеса по похилій площині виникають сили тертя. Якщо колесо котиться без ковзання, то створюється сила тертя спокою. Величина цієї сили  $P$  визначається законом Кулона [1, 2]:

$$F \leq kN, \quad (2.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт тертя спокою;  $N$  – сила нормального тиску.

Сила тертя  $F$  завжди паралельна площині зіткнення тіл що труться.

Якщо колесо котиться з ковзанням, то з'являється сила тертя ковзання, величина якої:

$$F_1 = k_1 N. \quad (2.2)$$

Коефіцієнт тертя  $k_1$  залежить не лише від властивостей поверхонь, що труться, але і від їх відносної швидкості. Якщо швидкості руху незначні, його можна вважати постійним і рівним коефіцієнту  $k$  ( $k_1 \approx k$ ).

При коченні циліндра по площині слід враховувати не пружну деформацію площини і циліндра. Реакція опори не проходить через центр тяжіння циліндра, а дещо зміщена вперед за рухом. Це призводить до появи моменту реакції опори відносно осі обертання циліндра, що перешкоджає його обертанню.

Цей момент носить назву моменту сил тертя кочення і може бути записаний у вигляді:

$$M = k_2 N, \quad (2.3)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт моменту сил тертя кочення.

Він істотно відрізняється від коефіцієнтів  $k_1$  і  $k$ , оскільки є розмірною величиною і, по суті, характеризує плече сили тиску опори відносно осі циліндра.

За незначних кутів нахилу жолоба відносно горизонту, кулька, що знаходиться в жолобі, буде в стані спокою. Найбільший кут, при якому кулька ще не починає скочуватись, отримано з умови рівноваги (див. рис. 2.1).

$$\begin{aligned} mg \sin \alpha_1 - F &= 0, \\ Fr - k_2 mg \cos \alpha_1 &= 0, \end{aligned} \quad (2.4)$$

де  $m$  – маса кульки;  $F$  – паралельна площині сила тертя спокою;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $r$  – «плече» сили  $F$ .

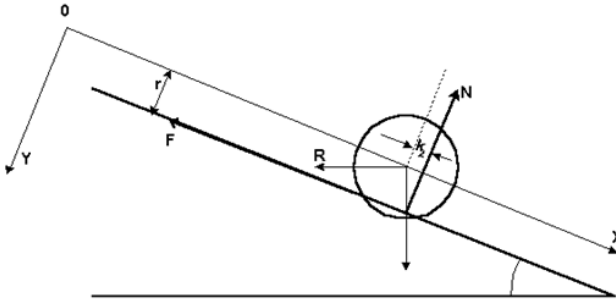


Рис. 2.1 – Схему руху кульки в нахиленому жолобі

З рівнянь (2.1–2.4) визначаємо:

$$k_2 = r \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (2.5)$$

якщо кут  $\alpha_1$  відомо, то з рівняння (2.5) можна вичислити коефіцієнт  $k_2$ .

При збільшенні кута нахилу жолоба з кута  $\alpha = \alpha_1$  і почнеться кочення кульки без ковзання. Для жолоба прямокутного перерізу рівняння руху кульки (рис. 2.2) запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} ma &= mg \sin \alpha_1 - F, \\ mg \cos \alpha - N &= 0, \\ J\varepsilon &= Fr - k_2 N, \\ a &= r\varepsilon, \end{aligned} \quad (2.6)$$

де  $J = (2/5) mR^2$ ,  $r = R (1/2)^{0.5}$  ( $R$  – радіус кульки;  $J$  – момент інерції кульки;  $a$  – прискорення руху центра мас кульки;  $\varepsilon$  – кутове прискорення кульки).

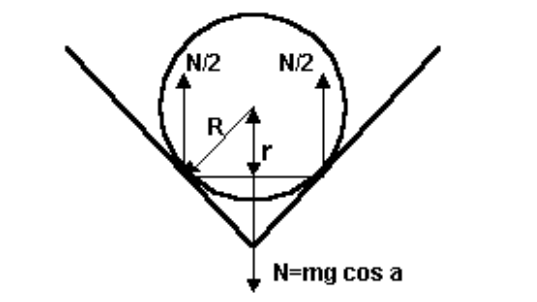


Рис. 2.2 – Схема сил при дії кульки на жолоб

З наведених рівнянь отримаємо:

$$F = \frac{mg}{9} \cdot \left( 4 \sin \alpha + \frac{5k_2 \cos \alpha}{r} \right). \quad (2.7)$$

$$a = \frac{5g}{9} \cdot \left( \sin \alpha + \frac{k_2 \cos \alpha}{r} \right). \quad (2.8)$$

За законом Кулона  $F \leq kmg \cos \alpha$ , то рівняння:

$$F = kmg \cos \alpha = \frac{mg}{9} \cdot \left( 4 \sin \alpha + \left( \frac{5k_2 \cos \alpha}{r} \right) \right), \quad (2.9)$$

визначає найбільше значення кута  $\alpha = \alpha_2$ , при якому ще можливий рух без ковзання.

З рівняння (2.9) отримаємо:

$$k = \frac{4 \operatorname{tg} \alpha_2}{9} + \left( \frac{5}{9} \cdot \frac{k_2}{r} \right). \quad (2.10)$$

Якщо  $\alpha_2$  і  $k_2$  відомі, тоді рівняння (2.10) дозволяє визначити коефіцієнт  $k$ .

З рівняння (2.8) видно, що центр мас кульки рухається рівномірно прискорено. Якщо його початкова швидкість дорівнювала нулю, то відстань  $x$  куля проходить за час  $t$ , маємо:

$$x = \frac{at^2}{2}. \quad (2.11)$$

З рівнянь (5.8) і (5.11) маємо:

$$k_2 = \frac{9r}{5g \cos \alpha} \cdot \frac{j - 2x}{t^2}, \quad (2.12)$$

де  $j = (5/9)g \sin \alpha$  – прискорення руху точки центру мас кульки без урахування тертя кочення. У граничному випадку, коли  $x = 0$ , а кут  $\alpha = \alpha_1$  рівняння (2.12) призводить до рівняння (2.5). Рівняння (2.12) дозволяє визначити коефіцієнт  $k_2$  вимірюючи час скачування кульки для різних кутів нахилу жолоба.

При кутах нахилу жолоба  $\alpha > \alpha_2$  рух кульки можна вважати (приблизно) чистим ковзанням. Рівняння руху центру мас кульки може бути записано так:

$$ma = mg \sin \alpha - k_1 mg \cos \alpha. \quad (2.13)$$

З рівнянь (2.11) і (2.13) отримаємо:

$$k_1 = \frac{g \sin \alpha - \frac{2x}{t^2}}{\cos \alpha}. \quad (2.14)$$

Рівняння (2.14) дозволяє визначити коефіцієнт  $k_1$  для різних кутів нахилу жолоба.

Основна частина установки – металевий жолоб прямокутного перерізу, закріплений на штативі (рис. 2.3). На жолобі нанесено дві мітки, відстань між якими  $L$  виміряють рулеткою. Вимірюючи відстані  $A$  і  $B$  від міток до поверхні столу можна вчислити кут нахилу жолоба до горизонту  $\alpha$  за формулою:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{A-B}{L}\right). \quad (2.15)$$

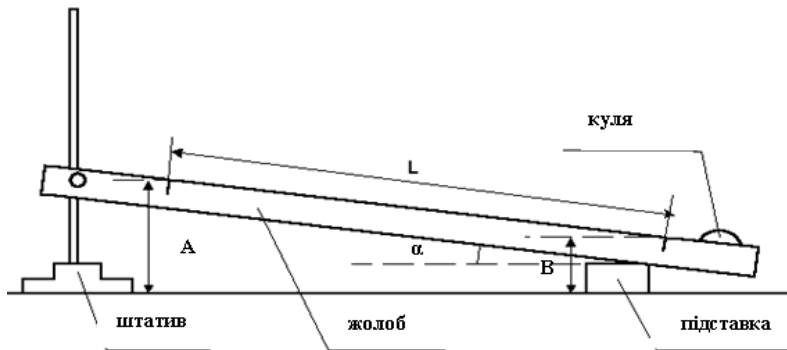


Рис. 2.3 – Схема експериментальної установки

### Порядок виконання роботи

1. Встановлюють жолоб в горизонтальне положення, тобто положення  $A - B = 0$  ( $\alpha = 0^\circ$ ).

Покласти кульку в жолоб, поєднуючи його центр з верхньою міткою. Відпускають її, включаючи одночасно секундомір і виміряти час за який кулька доходить до відмітки  $B$ . Виміри часу проходження кульки відстані проводять три рази.

Змінюють кут  $\alpha$  з кроком  $5^\circ$  до  $45^\circ$ , провести виміри часу проходження кульки при усіх цих кутах.

Для кожного положення жолоба час руху кульки необхідно виміряти не менше трьох разів і з них узяти середнє арифметичне. За формулою (2.11) обчислюють для усіх кутів нахилу жолоба величину прискорення кульки.

2. Отриманий результати необхідно представити у вигляді графіка на масштабно координатному папері, відкладаючи по осі абсцис кути нахилу, а

по осі ординат величину прискорення кульки. На цей же графік наносять через кожні 5° графік функції  $j = (5/9)g \sin \alpha$ , тобто прискорення руху кульки без урахування тертя кочення. Перетин кривих на графіку може бути формально пояснений тим, що сила тертя кочення зменшується зі збільшенням швидкості руху кульки.

Оскільки сила нормального тиску змінюється незначно, те зменшення сили тертя кочення, скоріш за все пов'язано зі зменшенням коефіцієнта  $k_2$ . Зменшення коефіцієнта пояснюється зменшенням деформації стрічки збільшенням швидкості руху кульки.

Точка перетину графіків визначає кут  $\alpha_2'$ , очевидно близька до кута  $\alpha_2$ , при якому виникає ковзання, оскільки навіть при  $k_2 = 0$  графік прискорення кульки може перетнути теоретичну криву  $a = (5/9)g \sin \alpha$  тільки після появи проковзування. Для цього кута вважаючи  $k_2 = 0$ , з рівняння (2.10) отримаємо:

$$k = \frac{4 \operatorname{tg} \alpha_2}{9}. \quad (2.16)$$

Екстраполяція графіка  $a = f(\alpha)$  до перетину з віссю абсцис визначає величину кута  $\alpha_1$ . Обчислення  $k_2$  для кутів, великих  $\alpha_1$  про те менших  $\alpha_2$ , здійснюється за формулою (2.12), для кута  $\alpha_1$  за формулою (2.5). Коефіцієнт  $k$  обчислюють за формулою (2.16). Для кутів  $\alpha_2$ , значно менших 90°,  $k_1$  обчислюється за формулою (2.14).

Результати занести у таблицю 2.1

**Таблиця 2.1 – Результати досліджень**

$\alpha^\circ$	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$t_c, \text{с}$	$a = 2x / t_c, \text{мс}^{-2}$	$k_1$	$k_2$	$k$
5								
10								
15								
20								
25								
30								
35								
40								

$$D = \text{_____}, \text{ м};$$

$$x = \text{_____}, \text{ м}$$

$$J = (2/5) mR^2 = \text{_____},$$

$$r = R(1/2)^{0,5} = \text{_____}$$



## **Зміст звіту**

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Прилади і обладнання що використовуються в лабораторній роботі.
4. Короткі теоретичні відомості.
5. Таблиці, графіки, формули.
6. Висновок.

## **Контрольні питання**

1. Що таке коефіцієнт тертя кочення?
2. Дайте визначення терміну сила тертя спокою.
3. Дайте визначення терміну сила нормального тиску.
4. Дайте визначення терміну коефіцієнт тертя ковзання.
5. Запишіть основне рівняння динаміки обертального руху.
6. Вкажіть одиниці вимірювання коефіцієнтів тертя ковзання.
7. Вкажіть одиниці вимірювання коефіцієнтів тертя кочення.

*Література:* [2, с. 98–99, 110–112]

### Лабораторна робота 3.

## Визначення коефіцієнта тертя гнучких тіл

---

**Мета:** формування практичних навичок визначення сил тертя гнучких тіл при контакті з циліндричною поверхнею; отримання практичних навичок застосування формули Ейлера.

**Прилади і обладнання:** мотузка, канат, динамометр, циліндр.

### Теоретичні відомості

Тертя гнучких тіл відіграє важливу роль в роботі багатьох машин та механізмів, швартових пристроїв суден, різноманітних пасових передач, стрічкових гальм тощо. Можна впевнено стверджувати, що всім відомі морські вузли на сучасному водному транспорті використовуються значно рідше, ніж закріплення, принцип дії яких базується на застосуванні сил тертя між твердими і гнучкими тілами.

Головною причиною виникнення тертя ковзання є макро- і мікросорсткість дотичних предметів. При русі однієї поверхні уздовж іншої їх макроскопічні виступи ударяються один об одного і ламаються, речовина поверхонь, що труться, подрібнюється або диспергує, що вже створює силу, що затримує рух, завжди спрямовану проти переміщення.

Інша частина сили тертя обумовлена мікросорсткістю поверхні, тобто такими нерівностями поверхні, які спів виміряні за величиною з розміром молекул. Через проміжки між молекулами навіть так звана дзеркальна грань кристалів (поверхня настільки рівна, що відбиває світло) є мікросорсткою.

Ковзання однієї дзеркальної грані кристала по іншій може супроводжуватися «молекулярним диспергуванням», порушенням порядку в природному розташуванні молекул, відривом і переміщенням деяких з них. Закони, яким підкоряється тертя ковзання, були встановлені французьким фізиком Амонтоном в 1699 році і незалежно від нього, в розвиненішій формі, – Кулоном в 1785 році [1, 2].

Сила ковзання  $P$  за законом Амонтона–Кулона виражається так:

$$F = kN, \quad (3.1)$$

де  $N$  – сила нормального тиску;  $k$  – коефіцієнт сили тертя ковзання.

Величина цього коефіцієнта залежить від властивостей поверхонь, що труться, і від величини їх відносної швидкості. При малому діапазоні зміни величини швидкості коефіцієнт тертя ковзання можна вважати постійною величиною, залежною тільки від властивостей поверхонь.

Тертя ковзання за різних відносних швидкостей руху поверхонь легко отримати, притискаючи гнучку стрічку до поверхні циліндра, що обертається. Натяги між окремими елементами стрічки відрізняються по напрямку і за ве-

личиною, це призводить до різного значення нормального тиску для кожного елемента стрічки.

$$\partial F = k \partial N, \quad (3.2)$$

виражаючи  $\partial F$  і  $\partial N$  через величину напруження для елемента стрічки.

Нехай стрічка  $ABCD$  (рис. 3.1) охоплює частину поверхні циліндра, визначувану кутом  $\partial\varphi$ .

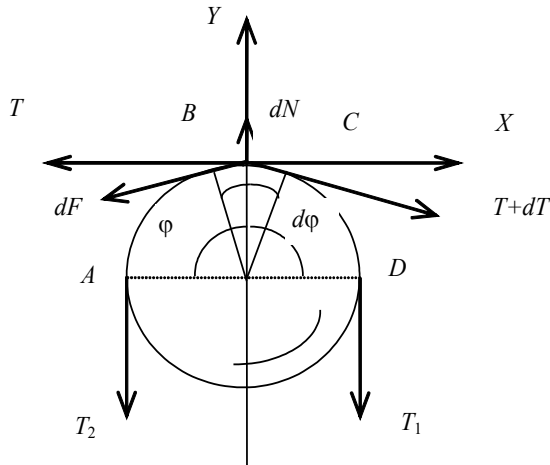


Рис. 3.1 – Схема сил у системі «стрічка–циліндр»

Натягнення вільних кінців стрічки позначимо через  $T_1$  і  $T_2$ . Виділимо на цій стрічці нескінченно малий елемент  $BC$  і розглянемо його рівновагу під дією усіх прикладених до нього сил. Цими силами є натяг нитки  $T$  і  $T + \partial T$ , де  $\partial F$  – сила тертя, реакція зв'язку  $\partial N$ .

Для рівноваги елемента необхідно, щоб сума алгебри усіх сил, прикладених до нього, дорівнювала нулю. Проекції цих сил на вісь ординат і на вісь абсцис відповідно дають:

$$\partial N - (T + \partial T) \sin \frac{\partial\varphi}{2} - (T + \partial F) \sin \frac{\partial\varphi}{2} = 0, \quad (3.3)$$

$$(T + \partial T) \cos \frac{\partial\varphi}{2} - (T + \partial F) \cos \frac{\partial\varphi}{2} = 0. \quad (3.4)$$

З першого рівняння, замінюючи для малих кутів  $\sin \frac{\partial\varphi}{2}$  на  $\frac{\partial\varphi}{2}$ , а також нехтуючи величинами другого порядку, отримаємо:

$$\partial N = T \partial \varphi. \quad (3.5)$$

З рівняння (3.4):

$$\partial F = \partial T. \quad (3.6)$$

З рівнянь (3.2) та (3.4) отримаємо:

$$\partial F = kT \partial \varphi. \quad (3.7)$$

або

$$\frac{\partial T}{T} = k \partial \varphi. \quad (3.8)$$

Вважаючи  $k$  постійною величиною, незалежною від  $T$ , інтегруючи по усій довжині лінії контакту з поверхнею циліндра отримаємо:

$$\ln \frac{T_1}{T_2} = k \varphi. \quad (3.9)$$

або

$$T_1 = T_2 e^{k\varphi}. \quad (3.10)$$

Звідси визначають значення коефіцієнта тертя, за формулою Ейлера, при різних значеннях кута:

$$k = \frac{\ln F_1 - \ln F_2}{\alpha}. \quad (3.11)$$

### Порядок виконання роботи

1. Робота виконується на установці, схема якої показана на рис. 3.2.

Визначити вагу вантажу  $G$ .

Виміряти силу натягу  $F_1$  гілки досліджуваного гнучкого тіла між стійкою і циліндром при значенні кута дотику  $\alpha = 0^\circ$  між цим тілом та циліндром при сталому значенні сили натягу  $F_2$  між циліндром і вантажем  $G$ . Сила тертя між гнучким тілом і циліндром визначається як різниця натягів гілок гнучкого тіла.

2. Виміряти значення сили  $F_1$  при  $\alpha = 90^\circ$ , обгорнувши гнучке тіло на чверть кола циліндра (точка  $B'$ ). Дослід повторити тричі.

3. Виміряти значення сили  $F_1$ , при  $\alpha = 180^\circ$ , обгорнувши гнучке тіло на півкола циліндра (точка  $B''$ ). Дослід повторити тричі.

4. Виміряти значення сили  $F_1$ , при  $\alpha = 270^\circ$ , обгорнувши гнучке тіло на три чверті кола циліндра. Дослід повторити тричі.

5. Виміряти значення сили  $F_1$ , при  $\alpha = 360^\circ$ , обгорнувши гнучке тіло на повне коло циліндра. Дослід повторити тричі.

За отриманими даними визначають його середнє арифметичне значення для гнучкого тіла та циліндричної поверхні з досліджуваних матеріалів.

Досліди повторюють при різних комбінаціях матеріалів гнучкого тіла і циліндра та визначають відповідні значення коефіцієнтів тертя. На основі порівняння отриманих дослідних даних формують висновки.

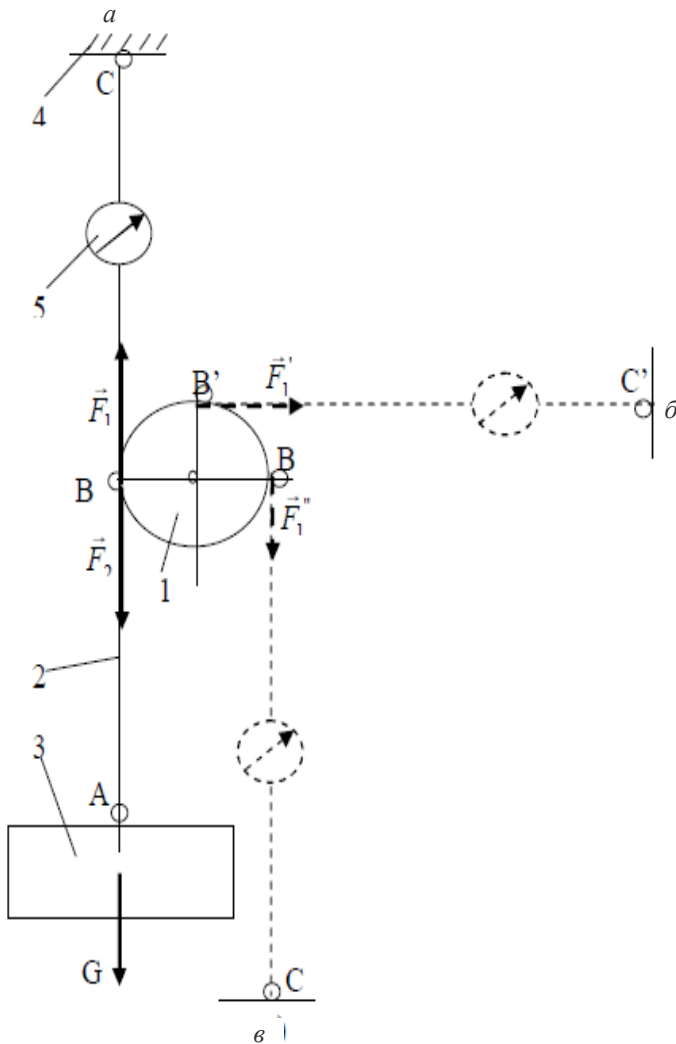


Рис. 3.2 – Схема установки:

1 – циліндр; 2 – гнучке тіло; 3 – вантаж G; 4 – стійка; 5 – динамометр

Результати занести до таблиці 3.1.

**Таблиця 3.1 – Результати досліджень**

$n$ , оберти	0	0,25	0,5	0,75	1,0
$\varphi^\circ$	0	90	180	270	360
$T_1$ , Н					
$T_2$ , Н					
$k$					

Матеріал гнучкого тіла – \_\_\_\_\_ ,

Матеріал циліндра – \_\_\_\_\_ .

### Зміст звіту

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Прилади і обладнання що використовуються в лабораторній роботі.
4. Короткі теоретичні відомості.
5. Таблиці, графіки, формули.
6. Висновок.

### Контрольні питання

1. Головна причина виникнення тертя.
2. Наведіть формулу Амонтона–Кулона.
3. Напишіть закон Амонтона–Кулона в диференціальній формі.
4. Наведіть рівняння Ейлера.
5. Які параметри впливають на коефіцієнт тертя гнучкого тіла по циліндру.
6. Наведіть схему сил стрічка-циліндр.
7. Як визначити коефіцієнт тертя за допомогою експериментальної установки?

**Література:** [1, с. 68–70, 74; 2, с. 29–31]

## Лабораторна робота 4.

# Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини методом Стокса

---

**Мета:** формування практичних навичок визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини за методом Стокса.

**Прилади і обладнання:** лабораторне устаткування складається з: прозорого циліндра, який наповнений досліджуваною рідиною; металевих кульок; діаметри яких попередньо вимірюють за допомогою мікроскопа; секундоміра; призначеного для вимірювання часу руху кульки. Лінійки для вимірювання довжини пройденого шляху.

### Теоретичні відомості

Внутрішнє тертя виникає при русі одного шару рідини відносно іншого в результаті міжмолекулярної взаємодії шарів рідини. Закон внутрішнього тертя для ламінарного (безвихрового) режиму течії встановлений Ньютоном: сила внутрішнього тертя (в'язкість)  $F$  пропорційна градієнту швидкості  $\left(\frac{d\vartheta}{dx}\right)$  і площі шарів  $S$  (рис. 4.1), що труться [3]:

$$F = \eta \cdot \left(\frac{d\vartheta}{dx}\right) \cdot S, \quad (4.1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт внутрішнього тертя досліджуваної рідини (коефіцієнт в'язкості).

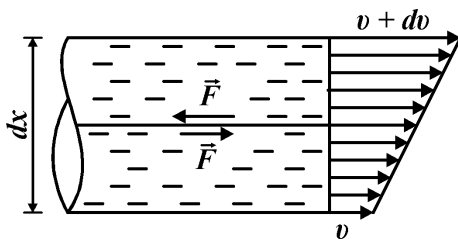


Рис. 4.1 – Схема внутрішнього тертя рідин

Коефіцієнт в'язкості може бути визначений різними методами. Один з них, метод Стокса, заснований на вимірі швидкості падіння важкої кульки в досліджуваній рідині.

До поверхні кульки, що падає в рідині, прилипає шар рідини який нерухомий відносно поверхні кульки. Тому при русі в рідині виникає тертя не між кулькою і рідиною, а між шарами рідини. Стокс, застосовуючи закон

(4.1), встановив що при русі кулі в рідині сила тертя пропорційна швидкості руху, радіусу кульки і залежить від роду рідини:

$$\vec{F} = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot \vec{v}. \quad (4.2)$$

Знак «мінус» показує, що сила внутрішнього тертя спрямована убік, протилежний до швидкості кульки.

При великих швидкостях, коли ламінарне шарувате обтікання кульки змінюється турбулентним (вихровим) закон Стоксу порушується.

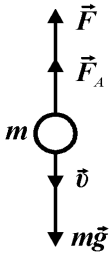


Рис. 4.2 – Сили, що діють на кульку

На кульку, що рухається в рідині (рис. 4.2), діють сила тяжіння  $m\vec{g}$ , виштовхуюча сила Архімеда  $\vec{F}_A$  і сила опору  $\vec{F}$ . На початку, коли тертя незначне, рух кульки буде прискореним. У міру зростання швидкості рух збільшується і сила опору. За деякої швидкості діючі сили урівноважуються і, починаючи з цього моменту, рух стає рівномірним.

При цьому:

$$m\vec{g} - \vec{F}_A - \vec{F} = 0. \quad (4.3)$$

Підставивши в рівняння (4.3) вирази для сил

( $m\vec{g} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_1 \cdot g}{3}$ ,  $\vec{F}_A = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_2 \cdot g}{3}$ ,  $F = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot v$ ), розв'язавши його відносно швидкості, отримаємо:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot g \cdot r^2 \cdot (\rho_1 - \rho_2), \quad (4.4)$$

де  $\rho_1, \rho_2$  – щільності матеріалу кульки і рідини;  $r$  – радіус кульки.

Теоретично залежність швидкості падіння кульки від квадрата радіуса – прямо пропорційна з кутовим коефіцієнтом:  $k = \frac{2}{9} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2)$ .

Тоді, з формули (4.3) коефіцієнт в'язкості рідини дорівнює:

$$\eta = \frac{2 \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot r^2}{9 \cdot v}. \quad (4.5)$$

### Порядок виконання роботи

1. Виміряти діаметр кульки за допомогою штангенциркуля чи мікрометра.
2. Встановити кільця 4 на колбу 1 і 2 в нижній та верхній частинах колби, як показано рис. 4.3.



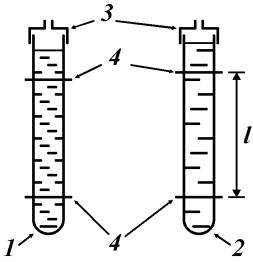


Рис. 4.3 – Колби з рідинами

Виміряти лінійкою відстань між кільцями 4.  
 Опустити кульку в циліндр з рідинами. Заміряти час проходження кульки між кільцями. Дослід провести не менше п'яти разів для кожної рідини, з різними кульками.

Результати занести до таблиці 4.1.

Поділивши відстань  $l$  яку пройшла кулька за час  $t$ , отримаємо швидкість  $v$ .

Далі визначаємо коефіцієнт в'язкості рідини  $\eta$ .

Таблиця 4.1 – Результати досліджень вимірювання коефіцієнта внутрішнього тертя

$r$ , м	$l$ , с	$v$ , м/с	$\eta$ , Па·с

Рідина \_\_\_\_\_  $l =$  \_\_\_\_\_, м.

Щільність кульки:  $\rho_1 =$  \_\_\_\_\_, кг/м<sup>3</sup>.

Щільність рідини:  $\rho_2 =$  \_\_\_\_\_, кг/м<sup>3</sup>.

### Зміст звіту

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Прилади і обладнання що використовуються в лабораторній роботі.
4. Короткі теоретичні відомості.
5. Таблиці, графіки, формули.
6. Висновок.

### Контрольні питання

1. Що таке внутрішнє тертя?
2. Які сили діють при падінні кульки в рідині? Суть методу Стокса.
3. Як визначити залежність швидкості падіння кульки від радіуса?
4. Як визначити коефіцієнт в'язкості рідини?
5. Скільки раз необхідно повторювати дослід?
6. За допомогою якого інструмента визначають діаметр кульки?

**Література:** [3, с. 374–390]

## Лабораторна робота 5.

# Визначення видів спрацьовування

**Мета:** формування практичних навичок систематизувати знання про види спрацьовування та причини їх виникнення; отримати практичні навички визначення видів спрацьовування.

**Прилади і обладнання:** зразки зношених деталей.

### Теоретичні відомості

Спрацьовування, це процес руйнування і відокремлення матеріалу з поверхні твердого тіла або збільшення його залишкової деформації, який виявляється у поступовій зміні розмірів або форми тіла внаслідок дії на нього середовища або іншого тіла. Якщо механічна дія виявляється у вигляді сили тертя, то кажуть про спрацьовування під час тертя. Формування поверхні, яка спрацьовується, відбувається як результат додавання різних за інтенсивністю і видами елементарних актів руйнування і зміни механічних і фізико-механічних властивостей матеріалу під дією зовнішніх факторів (середовище, температура, тиск, вид тертя, швидкість переміщення поверхонь тощо). Сукупність явищ під час процесу тертя визначає вид спрацьовування та його інтенсивність.

Внаслідок різноманітності матеріалів пар тертя і умов їх експлуатації види спрацьовування надзвичайно різноманітні, але їх класифікація необхідна для розробки відповідних методів підвищення зносостійкості. Оскільки деталь, як правило, одночасно спрацьовується від дії різних видів спрацьовування, важливе значення у питанні класифікації має положення про провідний і супутні види спрацьовування. Провідний вид – це процес, який переважає за своїм якісним і кількісним виявленням у загальній сукупності з іншими (супутніми) процесами спрацьовування поверхонь тертя.

Вид спрацьовування у першому наближенні можливо визначити за такою зовнішньою ознакою, як вигляд поверхні тертя (натир). Для більш детального визначення необхідні аналіз складу, фізичних і механічних властивостей поверхневого шару.

Класифікація видів спрацьовування згідно з ГОСТ 27674–88 [4], ДСТУ 2823–94 [5] наведена у таблиці 5.1.

**Таблиця 5.1 – Класифікація видів спрацьовування**

Ознака класифікації	Вид спрацьовування
Види механічного спрацьовування	Абразивне спрацьовування Гідроабразивне (газоабразивне) спрацьовування Гідроерозійне (газоерозійне) спрацьовування Кавітаційне спрацьовування Спрацьовування від втоми Спрацьовування при фретингу Спрацьовування при заїданні

### Продовження таблиці 5.1

Ознака класифікації	Вид спрацьовування
Види корозійно-механічного спрацьовування	Окислювальне спрацьовування, спрацьовування при фретинг-корозії
Види спрацьовування при дії електричного струму	Електроерозійне спрацьовування

*Абразивним* називається механічне спрацьовування деталей внаслідок дряпання поверхні твердими частками при наявності їх відносної швидкості.

Абразивні частки можуть бути природного або штучного походження і повинні мати геометричну форму і твердість достатню для дряпання (різання) поверхні. Те, що зерно випуклою поверхнею або гострим ребром може бути вдавненим, навіть без пошкоджень, у плоску поверхню більш твердого тіла, пояснює спрацьовування металу абразивними частками з меншою твердістю.

Абразивне спрацьовування викликають ґрунт, руда, вугілля, зола, пил, які потрапили на поверхню тертя, металева стружка, нагар, продукти спрацьовування, особливо частки твердих структур і оксидних плівок, так як твердість оксидів для більшості металів перевищує твердість самого металу.

Абразивними частками можуть бути:

1) нерухомо закріплені тверді зерна, які входять у контакт по дотичній або під невеликим кутом атаки до поверхні деталі (наприклад, шаржування твердими частками м'яких антифрикційних матеріалів);

2) незакріплені частки, які входять у контакт з поверхнею деталі (наприклад, абразивні частки у ґрунті);

3) вільні частки у зазорі сполучених деталей;

4) вільні абразивні частки, які переносяться потоком рідини або газу.

Основна дія абразивних часток полягає у дряпанні (пластичному відтисненні) металу поверхні. Вдавнена частка при ковзанні відтискає перед собою і у боки, підминає під себе матеріал, залишаючи подряпину (рису). Остання обривається при виході із зони фактичного контакту, коли частка роздробиться або вирве тверду складову; коли частку буде винесено із зони тертя. Дно канавки при цьому наклепується. Повторення процесу по одній трасі у парах тертя відбувається рідко. Найчастіше відбувається дряпання, при якому зона пластичного відтиснення перекидає раніш утворену подряпину. Поверхня тертя вкрита подряпинами у напрямі ковзання, а між подряпинами розташовується наклепаний матеріал, який витримує багаторазову пластичну деформацію, вичерпавши здатність до пластичного деформування і схильний до крихкого руйнування. При ударно-абразивному спрацьовуванні час взаємодії поверхні з абразивною часткою дуже малий і теплота внаслідок пластичного деформування не встигає розповсюдитися у глибину металу. Значний місцевий нагрів змінює механічні властивості матеріалу, не виключені також структурні перетворення, а удари абразивних часток розхитують зерна поверхні і сприяють руйнуванню. Для ударно-абразивного спрацьовування характерне утворення на поверхні тертя лунок внаслідок локальної пластичної деформації.

Абразивне спрацьовування зазнають деталі сільськогосподарських, дорожньо-будівних, транспортних машин, вузли металургійного обладнання, металорізальних верстатів, бурове обладнання нафтової і газової промисловості тощо.

**Гідроабразивне (газоабразивне) спрацьовування** – це абразивне спрацьовування внаслідок дії твердих часток, які переносяться потоком рідини або газу. Воно характерне для робочих коліс і напрямних апаратів гідравлічних турбін, лопаток газових турбін, парових котлів, труб і насосів земснарядів, підшипників гребних валів, обладнання нафтової і газової промисловості тощо.

**Гідроерозійне (газоерозійне) спрацьовування** – це спрацьовування поверхні матеріалу внаслідок механічної дії високошвидкісного потоку рідини (газу). Кожен вид ерозії має підвиди, які є комбінацією окремих видів. Наприклад, гідроерозія може бути гідроабразивною, кавітаційно-ерозійним спрацьовуванням тощо.

Ерозійний вплив високошвидкісного потоку рідини або газу складається із тертя суцільного потоку та його ударів по поверхні. Тертя веде до розхитування і вимивання окремих об'ємів матеріалу, але швидкість спрацьовування у цьому випадку дуже мала. Більша роль належить динамічній дії потоку. Залежно від властивостей матеріалу можливі відриви окремих об'ємів або груп зерен з несприятливою орієнтацією до діючих сил. У пластичних матеріалах спочатку накопичуються мікропластичні деформації окремих ділянок, а коли здатність до зміцнення вичерпується, ці ділянки руйнуються і вимиваються. Рідина (пар) під час ударів в утворені мікротріщини розсовує її стінки подібно до клину. Ерозія посилюється внаслідок вихроутворення біля поверхневих пошкоджень та ударної дії потоку.

Ерозійне спрацьовування відбувається на поверхнях елементів гідравлічних і парових систем, поршневих кілець авіаційних двигунів, лопатках компресорів газотурбінних двигунів тощо.

**Кавітаційне спрацьовування** виникає тоді, коли у потоці рідини разом із зонами підвищеного тиску виникають зони розрядження і відбувається явище кавітації. Це явище полягає в тому, що при звуженні або наявності перешкод швидкісному потоку тиск може впасти до значення, яке відповідає тиску пароутворення при даній температурі. При цьому, залежно від опору рідини розтягненню, можливі розриви суцільного потоку. Утворена порожнина (каверна) заповнюється паром і газами, які розчинені у рідині. Утворені бульбашки переміщуються разом із потоком і попадають у зони високого тиску. Пар конденсується, гази розчиняються і бульбашки захоплюються. В утворені порожнини з великим прискоренням спрямовується рідина і відновлення суцільності потоку супроводжується гідроударом. Якщо каверни захоплюються на поверхні деталі, то рідина з великою швидкістю б'є об стінку, утворюючи великий тиск і температуру. Кавітаційні бульбашки можуть вирости за 0,002 с до 6 мм у діаметрі і зруйнуватись за 0,001 с. Багаторазові повторні удари на окремих мікроділянках ведуть до наклепу, місцевого руйнування і утворення заглиблень.

При відносних коливаннях твердого тіла і рідини тиск у рідині на межі розподілу може також зменшуватись, що призводить до дії вібраційної кавітації.

Гідродинамічна кавітація спостерігається у лопаток гідравлічних турбін і насосів, гребних гвинтів, гідромоніторах тощо; вібраційна – наприклад, на зовнішніх поверхнях гільз двигунів внутрішнього згорання.

**Спрацьовування від втоми** виникає внаслідок багаторазової пластичної і пружної деформації матеріалу. Цей процес має прихований (латентний) період, протягом якого відбувається накопичення пошкоджень. Тріщини від втоми виникають на недосконалостях структури і, внаслідок повторної дії на поверхню тертя, вони збільшуються кількісно і по глибині на окремих ділянках поверхні. Достатньо 108–109 циклів для руйнування матеріалу навіть при дуже малих напругах. Первинні осередки можуть розташовуватись на деякій відстані від поверхні контакту у зоні максимальних дотичних напружень. Поверхня тертя при спрацьовуванні від втоми має вигляд глибоких борозен (ямок) з крутими стінками.

Багато деталей тертя, які працюють при достатньому змащуванні і помірних температурах, мають гладку поверхню без подряпин, відсутні помітні сліди переносу металу із сполученої поверхні. В цих умовах руйнування поверхні відбувається внаслідок диспергування (подрібнення) окремих ділянок контакту. Інтенсивність цього механізму спрацьовування невелика, а шорсткість поверхні деталі мала. У мікроскопі помітні ризки у напрямі руху, як результат взаємного вдавнення на ділянках контакту сполучених поверхонь. Процес спрацьовування відбувається таким чином: на ділянках фактичного контакту матеріал зазнає багаторазову пружну і пластичну деформацію, що веде до розпушування в окремих місцях структури матеріалу з наступним відокремленням невеликих блоків.

Спрацьовування від втоми внаслідок диспергування зазнають валки різних агрегатів і сполучені з ними підшипники, поршневі пальці шатунів, пари тертя паливної апаратури, добре змащуваних шарнірно-болтові з'єднання тощо.

**Спрацьовування при заїданні** – це спрацьовування внаслідок схоплювання, глибинного виривання матеріалу, переносу його з однієї поверхні на іншу і дії нерівностей, які виникають, на сполучену поверхню. Схоплювання (явище місцевого з'єднання двох твердих тіл) відбувається внаслідок когезії, молекулярної взаємодії поверхонь, не захищених плівкою, коли не виконується правило додатного градієнта дотичного опору матеріалу поверхні. При цьому утворюються міцні металеві зв'язки, вузли схоплювання. Необхідною умовою глибинного виривання при наявності мастила є розрив мастильної плівки. Це відбувається під дією високої температури при пружній деформації поверхневих шарів, при наявності значної пластичної деформації або при сумісній дії підвищеної температури і пластичної деформації.

Схоплювання від мікроскопічних пошкоджень поступово переходить до локалізованого руйнування поверхневого шару і до глибинного виривання. При експлуатації машин для якісної оцінки ступеню пошкоджень поверхонь використовують такі терміни.

Задир – утворення внаслідок схоплювання помітних оком борозен з відтисненням матеріалу у боки і в напрямі ковзання. Може утворюватись і група борозен.

Заїдання – найбільша форма виявлення схоплювання, коли утворюються широкі і глибокі борозни з нерівними краями, великі нарости, можливе сплавлення поверхні. Може відбутись повне заклинювання деталей. Заїдання спостерігається у важко навантажених підшипниках ковзання, зубчастих передачах, у золотникових парах, шарнірних з'єднаннях, деталях циліндропоршневої групи двигунів, у напрямних верстатів, різьбових з'єднаннях тощо.

**Спрацьовування внаслідок пластичної деформації** полягає у зміні розмірів або форми деталі через пластичну деформацію (змінання) її мікроб'ємів. Це відбувається внаслідок надмірних напруг або випадкових значних перенавантажень і характерно для деталей, які входять у контакт з ударом. Цей вид спрацьовування спостерігається у шпонкових, шлицьових, штифтових і різьбових з'єднаннях, рейках і бандажах коліс рухомого складу залізничних колій, підшипниках ковзання (видавлювання бабітного шару) тощо.

Ударні, а також особливо важкі навантаження, ведуть до локальної деформації кілець підшипників кочення у контакті з шариками або роликами з утворенням вм'ятин і заглиблень на поверхнях тертя. Цей особливий вид пластичної деформації називається бринелюванням.

**Корозійно-механічне спрацьовування** – спрацьовування внаслідок механічної дії, яка супроводжується хімічною взаємодією матеріалу із середовищем.

**Окислювальне спрацьовування** відбувається в тому випадку, коли на сполучених поверхнях утворюються плівки оксидів, які в процесі тертя руйнуються і знову утворюються. Продуктами спрацьовування є оксиди. Таким чином, окислювальне спрацьовування – це спрацьовування окисних плівок, які знову відновлюються. В деяких випадках тертя суттєво прискорює інтенсифікує процес окислювання, чому сприяють деформування матеріалу і високі температури.

Інтенсивність спрацьовування може бути високою, але поверхні тертя мають малу шорсткість, достатньо блискучі, оскільки оксиди заважають схоплюванню поверхонь.

Від інших видів корозійно-механічного спрацьовування окислювальне відрізняється відсутністю агресивного середовища. Воно відбувається при нормальних і підвищених температурах при сухому терті або недостатній кількості мастила. Для окислювального спрацьовування потрібен циклічний характер роботи пари тертя, при якому проміжок часу між послідовними руйнуваннями оксидних плівок буде достатнім для утворення плівки відносно великої товщини. У випадку циклічного руйнування оксидів високої твердості, спрацьовування носить характер абразивного зношування.

Окислювального спрацьовування зазнають калібри, деталі шарнірно-болтових з'єднань механізмів керування, підшипники сухого тертя; з'єднання фрикційних передач, що працюють без мастила тощо.

**Спрацьовування при фретинг-корозії** – корозійно-механічне спрацьовування сполучених тіл при малих відносних коливальних переміщеннях з амплітудою вад 0,025 мкм до 2,5 мм. Руйнування полягає в утворенні на сполучених поверхнях невеликих вибоїн і продуктів корозії у вигляді нальоту, плям і порошку. Цього виду спрацьовування зазнають не тільки вуглецеві сталі, але й, корозійностійкі матеріали. Продукти фретинг-корозії сталей і чавунів мають колір від світло-коричневого до темно-коричневого залежно від марок матеріалів, тиску, вологості і частоти циклів мікроколивань. Оксиди, нітриди й гідрати утворюються при руйнуванні практично усіх металів.

Механізм фретинг-корозії полягає в тому, що внаслідок дії сил тертя кришталева решітка поверхневих шарів при циклічних мікроколиваннях розхитується і руйнується. Процес руйнування відбувається як диспергування поверхні без видалення продуктів спрацьовування через малу амплітуду коливань. Відірвані частки металу окислюються. Додатковим джерелом пошкоджень може бути місцеве схоплювання. Тобто спрощена схема процесу фретинг-корозії у початковій фазі така: деформація поверхні – корозія руйнування оксидних та інших плівок – у випадку виникнення ювінільних поверхонь і місць схоплювання – руйнування вузлів схоплювання – адсорбція кисню на оголених ділянках і окислювання продуктів спрацьовування.

Таким чином при фретинг-корозії у зонах фактичного контакту утворюються невеликі каверни, заповнені оксидами. А так як окислювання металу супроводжується збільшенням об'єму ( $V_{OK} > V_{MET}$ ), то зростає тиск окислювальних часток металу, утворюються тріщини. Деякі тріщини з'єднуються і відбувається відколювання окремих об'ємів металу. Частки оксидів призводять до абразивної дії, тому плями у зонах фретинг-корозії вкриті ризиками у напрямі коливань. Пошкодження від фретинг-корозії є концентраторами напруг і знижують межу утоми.

Фретинг-корозія відбувається на сполучених поверхнях валів і на пресованих на них дисках, колесах, муфтах, підшипниках; на поверхнях шпонок і їх пазів; на поверхнях шліцьових, заклепкових і болтових з'єднань тощо.

**Водневе спрацьовування** обумовлено наступними процесами, які відбуваються у зоні тертя: 1) адсорбцією водню на поверхнях тертя; 2) інтенсивним відділенням водню внаслідок трибодеструкції (розкладу) мастильних матеріалів, а також біографічного водню сталевих і чавунних деталей тертя; 3) дифузією водню і його концентрацією у зоні найбільших температур, яка при терті розташована на деякій глибині від поверхні; 4) особливим характером руйнування поверхні, внаслідок одночасного розвитку великої кількості зародків тріщин з миттєвим утворенням дрібнодисперсного порошку матеріалу.

Вплив водню призводить до збільшення швидкості (інтенсивності) спрацьовування того або іншого виду, а також до самостійного руйнування поверхонь тертя.

При водневому спрацьовуванні диспергуванням водень посилює (залежно від його кількості у поверхневому шарі) диспергування сталі або чавуну. На поверхнях тертя відсутні вирви, задири, переноси металу. Вони можуть

мати блиск і непомітні неозброєним оком риси у напрямі руху. Це характерно для деталей, які працюють в умовах доброго змащування.

Водневе спрацьовування руйнуванням має специфічну особливість: поверхневий шар сталеві або чавунній деталі миттєво руйнується на глибині до 1–2 мкм. Це відбувається, коли поверхневий шар накопичує велику кількість водню, що характерно для поверхонь роторів і золотників керосинових насосів, дисків і барабанів пристроїв гальмування.

### Порядок виконання роботи

1. Провести візуальний огляд зразків.

Визначити види спрацьовування за ознаками поверхонь тертя. Заповнити таблицю 5.1.

**Таблиця 5.1 – Результати досліджень**

Деталь	Умова роботи	Характерна ознака поверхні тертя	Висновок про вид спрацьовування

### Зміст звіту

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Прилади і обладнання що використовуються в лабораторній роботі.
4. Короткі теоретичні відомості.
5. Таблиці, графіки, формули.
6. Висновок.

### Контрольні питання

1. Що таке спрацьовування?
2. Що таке провідний та супутній види спрацьовування?
3. Дати характеристики:
  - абразивного спрацьовування;
  - гідроабразивного (газоабразивного) спрацьовування;
  - гідроерозійного спрацьовування;
  - кавітаційного спрацьовування;
  - спрацьовування від втоми;
  - спрацьовування при заїданні;
  - спрацьовування внаслідок пластичної деформації;
  - корозійно-механічного спрацьовування;
  - окислювального спрацьовування;
  - спрацьовування при фретинг-корозії;
  - водневого спрацьовування.

*Література:* [4, с. 1–20; 5, с. 1–33]



## Література

---

1. Сидоренко В. М. Вісник машинобудування та транспорту: питання трибології / В. М. Сидоренко. – Харків : НТУ ХП, 2021. – 280 с.
2. Іваненко П. П. Технічна трибологія: нові матеріали і методи змащування / П. П. Іваненко, Т. І. Ковальчук. – Дніпро : ДНУ, 2020. – 310 с.
3. Бондаренко Ю. М. Трибологія: основи теорії і практики / Ю. М. Бондаренко. – Київ : Видавничий дім «Києво-Могилянська академія», 2018. – 400 с.
4. ДСТУ 2789–94. Тертя, зношування та змазка. Терміни та визначення. – На заміну.
5. ДСТУ 2823–94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення. – Введено 1996–01–01. – Київ : Держстандарт України, 1994. – 33 с.
6. ISO 7148–1:1988 Plain bearings – Terms, definitions, classification and symbols. – Part 1: Design, bearing materials and their properties.

## Зміст

---

<b>Вступ</b> .....	3
<i><b>Лабораторна робота 1.</b></i> Визначення коефіцієнта тертя за допомогою методу наклонної поверхні .....	5
<i><b>Лабораторна робота 2.</b></i> Визначення коефіцієнта сили сухого тертя (тертя кочення) .....	11
<i><b>Лабораторна робота 3.</b></i> Визначення коефіцієнта тертя гнучких тіл .....	17
<i><b>Лабораторна робота 4.</b></i> Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини методом стокса .....	22
<i><b>Лабораторна робота 5.</b></i> Визначення видів спрацьовування .....	25
<b>Література</b> .....	32