

Р. Р. Обертюх

А. В. Слабкий

**ТРИБОТЕХНІКА МАШИНОБУДІВНОЇ
ГАЛУЗІ**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Р. Р. Обертюх
А. В. Слабкий

ТРИБОТЕХНІКА МАШИНОБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ

Електронний навчальний посібник

Видання 2-е, перероблене та доповнене

Вінниця
ВНТУ
2025

УДК 621.1.016(075)

О-13

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 28.11.2024 р.)

Рецензенти:

В. М. Гурський В.М., доктор технічних наук, професор, НУ «Львівська політехніка»

В. І. Савуляк, доктор технічних наук, професор, ВНТУ

С. І. Сухоруков, кандидат технічних наук, доцент, ВНТУ

Обертюх, Р. Р.

О-13 Триботехніка машинобудівної галузі : навчальний посібник [Електронний ресурс] / Р. Р. Обертюх, А. В. Слабкий. – [Вид. 2-ге, перероб. та доп.]. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 123 с.

У навчальному посібнику викладено основи трибологічних процесів – зовнішнього та внутрішнього тертя в твердих і рідких ланках (деталях) механічних систем машин і механізмів, а також розглянуто основні види та закономірності зношування їх деталей. В кінці посібника для закріплення вивченого матеріалу наведено перелік запитань для самоперевірки, а також в посібнику розміщено практикум із задач, складених за теоретичним змістом розділів посібника, та тестів для самоконтролю знань, набутих під час вивчення дисципліни «Триботехніка машинобудівної галузі».

Зміст посібника відповідає програмі вибіркової дисципліни «Триботехніка машинобудівної галузі» освітньої програми «Галузеве машинобудування» здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, які навчаються за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. Посібник може бути використаний для підготовки з питань трибології та триботехніки здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти інших спеціальностей, наприклад, 131 Прикладна механіка та 132 Матеріалознавство.

Посібник призначено для здобувачів першого рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ОСНОВНІ ОЗНАЧЕННЯ ТРИБОЛОГІЇ ТА ТРИБОТЕХНІКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ	7
1.1 Кристалічна будова твердих речовин та дефекти кристалічної ґратки....	9
2 ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ (ПШ) ТВЕРДИХ ТІЛ. МАКРО- ТА МІКРОГЕОМЕТРІЯ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ І ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	22
2.1 Фізико-механічні характеристики ПШ	24
2.2 Макро- та мікрогеометричні характеристики поверхонь твердих тіл.....	26
2.3 Контакт хвилястих та шорстких тіл. Поняття про три площі контакту..	32
3 ОСНОВНІ ЗАКОНИ ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ	36
3.1 Кут та конус тертя. Круг тертя	40
3.2 Тертя кочення. Основні поняття та означення.....	42
3.3 Тертя під час удару. Фрикційна взаємодія під час удару	43
3.4 Попереднє зміщення під час удару та залежність відношення ударних імпульсів від тангенціальної швидкості удару	47
4 ЗНОШУВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ	48
4.1 Класифікація фрикційних зв'язків та видів їх порушення	49
4.2 Характеристика процесу та види зношування	50
4.3 Вибіркове перенесення (ефект незношуваності).....	58
5 ЗМАЩЕННЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ МАШИН.....	61
5.1 Властивості мастильних матеріалів	61
5.2 Старіння мастильних матеріалів	67
6 МЕТОДИ ОЦІНЕННЯ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ТЕРТЯМ.....	69
6.1 Методи оцінення фрикційних властивостей матеріалів	69
6.2 Класифікація установок для випробування матеріалів тертям	73

7 ПРАКТИКУМ.....	75
7.1 Перелік запитань для самоперевірки	75
7.2 Типові умови задач для практичних занять і самостійної роботи для здобувачів вищої освіти.....	79
7.3 Приклади розв'язування задач.....	87
7.4 Тести для самоконтролю ступеня засвоєння дисципліни.....	97
ЛІТЕРАТУРА	118
Українсько-англійський словник найбільш вживаних термінів	120

ВСТУП

Триботехніка машинобудівної галузі – вибіркова дисципліна підготовки здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, які навчаються за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування, мета вивчення якої – поглиблена теоретична підготовка здобувачів з питань природи різних видів тертя та зношування. Такі знання необхідні майбутнім фахівцям – конструкторам і технологам – для розроблення високонадійних машин і механізмів і прогресивних технологічних процесів матеріалооброблення, згідно з сучасними вимогами та міжнародними стандартами до якості машинобудівної продукції.

Основним завданням сучасного машинобудування є підвищення надійності та довговічності машин і механізмів, які людина використовує у своїй практичній діяльності. Як показує статистичний аналіз, головною причиною виходу з ладу машин є зношування рухомих спряжень і робочих ланок машин під впливом сил тертя. Дослідження багатьох світових наукових установ показують, що приблизно 80 – 90% відмов машин відбувається через зношування їх вузлів і деталей, що відволікає на ремонт значні людські та матеріальні ресурси. Ці витрати обумовлені недооцінкою значимості проблем підвищення зносостійкості та довговічності машин.

Проблемами тертя та зношування займаються трибологія і триботехніка, яка є, по суті, прикладною частиною трибології.

Знання природи різних видів тертя та зношування дозволяє розробити правильні методики проєктного розрахунку деталей машин і механізмів, що є важливим етапом забезпечення їх надійності і довговічності. Потрібно відмітити, що майже усі сучасні методики розрахунку ґрунтуються на використанні інформації про той, чи інший вид зношування, так, наприклад, розрахунок закритих зубчастих передач має своєю метою забезпечити міцність зубців проти викривлення, а знання природи кавітаційного зношування дозволяє проєктувати гідроапаратуру із заданими довговічністю та надійністю.

Під час викладання таких загальноінженерних і спеціальних дисциплін як «Деталі машин та основи конструювання», «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство», «Розрахунок та конструювання металообробного обладнання» тощо через великий обсяг спеціальної інформації теоретичні та фізичні аспекти процесів тертя та зношування, як правило, не розглядаються. Ці дисципліни використовують здобутки трибології та триботехніки у вигляді скінченних розрахункових залежностей, що за відсутності достатньої теоретичної підготовки з питань трибології не завжди дозволяє вибрати оптимальну для заданих умов роботи машини методику проєктного розрахунку її деталей.

Навчальний посібник складається з шести розділів. В першому наведено короткі відомості про основні означення трибології та триботехніки і перспективи їх розвитку та кристалічна будова твердих речовин і дефекти кристалічної ґратки. Другий розділ присвячено описанню властивостей поверхневих шарів (ПШ) твердих тіл, а також макро- та мікрогеометрії поверхонь твердих тіл і їх характеристик. В третьому розділі викладено основні закономірності зовнішнього

тертя ковзання та кочення під час руху твердих тіл, а також розглянуто особливості тертя та фрикційної взаємодії тіл під час удару. В четвертому розділі посібника розглядаються основні закономірності зношування твердих тіл і наведено коротку характеристика різних видів зношування. П'ятий розділ містить інформацію про основні характеристики процесів, що виникають під час змащення вузлів тертя машин і механізмів, та властивості мастильних матеріалів. В шостому розділі посібника наведено коротку характеристику методів оцінення фрикційних властивостей матеріалів деталей машин.

В сьомому розділі посібника розміщено практикум, що складається з переліку запитань для самоперевірки, типових умов задач для практичних занять і самостійної роботи для здобувачів вищої освіти, складених за теоретичним змістом розділів посібника, прикладів розв'язування задач та тестів для самоконтролю знань, набутих під час вивчення дисципліни «Триботехніка машинобудівної галузі».

Для більш глибокого ознайомлення з окремими питаннями трибології та триботехніки механічних систем посібник містить список літератури, а також в кінці посібника наведено українсько-англійський словник найбільш вживаних термінів.

1 ОСНОВНІ ОЗНАЧЕННЯ ТРИБОЛОГІЇ ТА ТРИБОТЕХНІКИ Й ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ

Трибологія (tribology) – це наука про тертя (friction) та процеси (process), що його супроводжують [1]. Назва цієї науки утворена з грецьких слів «трибос» – тертя та «логос» – наука (знання). Як наука трибологія охоплює експериментальні та теоретичні дослідження фізичних, хімічних, біологічних та інших явищ, які тісно пов'язані з тертям. Під терміном «фізичні явища», що їх вивчає трибологія, маються на увазі механічні, теплові, електричні та магнітні процеси, які виникають під час тертя. Трибологічні процеси в технічних системах і процеси тепломасоперенесення взаємопов'язані. Без знання законів тепло-масообміну неможливо розуміння явищ, що виникають під час тертя та зношування (wear) твердих тіл (body).

Триботехніка (tribotechnics) – це впорядковані знання щодо практичного застосування трибології [1], тобто триботехніка є, по суті, впровадженням в практику проектування, виготовлення, експлуатації і ремонту машин результатів теоретичних та експериментальних досліджень трибології. Трибологія вивчає процеси, що проходять під час зовнішнього тертя твердих тіл і внутрішнього тертя в твердих і рідких тілах. Ці процеси є результатом механічно-молекулярної взаємодії контактуючих тіл і значною мірою обумовлюються мікробудовою цих тіл. Таким чином, трибологія як наука тісно пов'язана з матеріалознавством, зокрема з теоретичним розділом цієї дисципліни – фізикою твердого тіла. Кристалічна будова твердих тіл і дефекти кристалічної ґратки сильно впливають на характер протікання процесів зовнішнього тертя твердих тіл. З метою глибокого розуміння фізичного змісту процесів тертя та зношування доцільно розглянути основні типи кристалічних ґраток та їх дефекти.

Деякі трибологічні закони людина пізнала та навчилась практично застосувати дуже давно. Вже в палеоліті під час добування вогню людина використовувала явище перетворення роботи тертя в теплоту. В процесі переміщення великих предметів, наприклад, під час будівництва пірамід в Древньому Єгипті, під несучі балки підкладали круглі дерев'яні котки, замінюючи таким чином тертя ковзання (sliding friction) тертям кочення (rolling friction). В деяких випадках зони тертя змащувались (lubrication) мастилами (lubricant), тобто зовнішнє тертя твердих тіл замінювалось внутрішнім тертям в рідині.

Накопичений досвід заміни тертя ковзання тертям кочення дозволив людині зробити геніальний винахід – створити колесо.

Необхідність зменшення сил тертя в транспортних засобах, які використовувала людина в своїй практичній діяльності, обумовила експериментальні та теоретичні дослідження процесів тертя та зношування, які оформились в науку – трибологію.

В сучасній трибології можна виділити такі основні розділи [1]:

- 1) фізико-хімічна механіка контактної взаємодії твердих тіл з урахуванням впливу середовища під час ковзання, кочення та удару;
- 2) вчення про площі фактичного контакту;

3) дослідження сухого (dry friction) та граничного (boundary friction) (межового) тертя ковзання та кочення і створення на їх основі розрахункових методів оцінювання цих видів тертя;

4) дослідження зношування та розроблення інженерних методів розрахунку деталей машин на знос;

5) теплофізика та теплова динаміка тертя і зношування;

6) гідродинаміка (hydrodynamic) та еластогідродинаміка (elastohydrodynamic);

7) системний аналіз і моделювання тертя та зношування, а також розробка наукових основ трибології;

8) наукові основи створення зносостійких фрикційних та антифрикційних матеріалів.

Поділ трибології на перераховані наукові напрямки значною мірою обумовлено основними положеннями молекулярно-механічної теорії тертя та теорії зношування від втоми, згідно з якими під час тертя проходять три взаємопов'язані процеси (тріада І. В. Крагельського [2]): взаємодія поверхонь тіл під час тертя; зміна властивостей поверхонь внаслідок їх взаємодії та впливу навколишнього середовища; руйнування поверхонь (зношування) внаслідок двох попередніх процесів.

Трибологія як наука динамічно розвивається. На сучасному етапі основними науковими напрямками розвитку трибології та триботехніки є:

1) забезпечення найбільшої довговічності вузлів тертя машин або однакової, порівняно з іншими частинами машин, та їх зносостійкості (wear resistance) під час роботи вузлів тертя в різних середовищах і кліматичних умовах;

2) підвищення роботоздатності матеріалів та вузлів тертя машин в широкому діапазоні температур;

3) мінімізація габаритів конструкцій вузлів машин і забезпечення пов'язаного з цим підвищення питомих навантажень на опори та інші деталі вузлів тертя машин;

4) забезпечення підвищення швидкостей ковзання та кочення деталей машин без небезпеки їх руйнування;

5) забезпечення в одних механізмах і машинах мінімального опору рухові (підшипники), а в інших – максимального (гальма).

Для розв'язання цих головних триботехнічних наукових задач необхідно провести комплекс теоретичних та експериментальних досліджень:

– тонких поверхневих шарів (ПШ) (surface layer (SL) під час тертя ковзання та кочення, включно й використання ефекту вибіркового перенесення (selective transfer) ;

– явищ задирання, схоплення та пітінгу (pitting) під час кочення та ковзання;

– теплових явищ і теплової динаміки під час всіх видів тертя та зношування;

– нових присадок до мастил, які радикально змінюють процеси взаємодії поверхонь під час тертя;

– малов'язких (viscosity) рідин як мастильних матеріалів;

– газоподібних речовин як мастильних матеріалів та умов їх застосування;

- нових самозмащувальних твердих і порошкових мастильних матеріалів;
- нових фрикційних та антифрикційних матеріалів, які б під час їх роботи в вузлах тертя не змінювали свої властивості внаслідок шкідливої дії навколишнього середовища.

Як результат реалізації цих досліджень необхідно розробити засоби **керування процесами тертя та зношування** в різних умовах експлуатації машин майбутнього.

1.1 Кристалічна будова твердих речовин та дефекти кристалічної ґратки

Справжні тверді речовини мають **кристалічну структуру** – періодичне повторення розташування атомів (або молекул) в просторі [3]. Тверде тіло тому і тверде, що енергія взаємодії між атомними частками в ньому велика порівняно з енергією їх теплового руху. Кристал (crystal) – це жорстка конструкція. Аморфне тверде тіло – це рідина, що застигла і є сукупністю метастабільного (не рівноважного) стану атомів чи молекул. Повільність процесу кристалізації за низьких температур робить аморфне тіло стійким. Фізика аморфних (склоподібних) тіл зараз інтенсивно розвивається, але в техніці поки що найбільше застосування мають кристалічні речовини. У твердій фазі речовина існує в рівноважному стані за більш низьких температур, ніж в рідкій або газоподібній фазах. З цієї причини тверді тіла за низьких температур мають найменший рівень вільної енергії.

Будівельним матеріалом кристалів є молекули, атоми або іони, які об'єднуються в кристалічну структуру різними видами зв'язку: ковалентного, іонного, водневого або металевого. Фізична природа цих зв'язків – це електростатичне притягання різноманітно (з позитивним і негативним зарядом чи навпаки) заряджених частинок і відштовхування однойменно заряджених. Види зв'язку в твердих тілах (точніше їх енергія) значною мірою визначають їх поведінку та зношування в трибологічних процесах, тому наведемо коротку характеристику цих зв'язків.

Ковалентний (covalent) **зв'язок** (bond) (гомеополярний (homeopolar) або атомний) виникає між атомами кристала – вузлами кристалічної ґратки тоді, коли атоми мають спільні електрони та чітку просторову орієнтацію хмар зарядів. Ковалентний зв'язок виникає тоді, коли електронні оболонки атомів енергетично мало відрізняються, тобто в утворенні цього виду зв'язку беруть участь електронні оболонки тільки одного рівня. Тверде тіло з ковалентними зв'язками ніби об'єднується в одну макромолекулу.

В природі відносно небагато речовин з ковалентними зв'язками, але ці речовини завдяки своїй високій твердості або дуже високій температурі плавлення мають велике значення в трибології. До цих речовин відносяться, наприклад, алмаз C , кремній Si , карбід кремнію SiC – карборунд і деякі інші.

Іонний (ionic) **зв'язок** (гетерополярний (heteropolar) або електровалентний) – це зв'язок силами електростатичного притягання між позитивно (катіони) та

негативно (аніони) зарядженими іонами. Виникнення іонного зв'язку обумовлено енергією іонізації хімічного елемента, атом якого віддає свій електрон, та ступенем спорідненості атома елемента, що приймає електрон, а також енергію кристалічної ґратки, що утворюється. В природі існує дуже багато речовин, кристалічні ґратки яких утворені іонними зв'язками, але ці речовини мають мале значення для трибологічних процесів.

Водневий (hydrogen) зв'язок (протонний) виникає внаслідок проникнення протона (завдяки своїм маленьким розмірам) в глибину електронної оболонки сильно електронегативного атома. Під час попадання електронів атома в поле протона виникає достатньо сильна електростатична взаємодія між електронами та протоном. Водневий зв'язок може бути як внутрішнім, так і міжмолекулярним зв'язком. Водневий зв'язок має певну направленість (часткова ковалентність), обумовлену деформацією протоном електронної оболонки атома, з'єданого з ним. Водневі зв'язки мають місце в органічних сполуках, деяких неорганічних речовинах і цими зв'язками визначається асоціація молекул води, спиртів, кислот тощо.

Металевий (metallic) зв'язок – це різновид електростатичної взаємодії між іонними остовами атомів, які знаходяться в вузлах кристалічної ґратки, і електронним газом, утвореним електронами, відірваними від зовнішніх оболонок атомів. Металеві зв'язки характерні для металів, які на сучасному рівні розвитку техніки найширше використовуються в триботехнічних системах.

Характерними властивостями металів є їх висока тепло- та електропровідність, обумовлені атомною структурою металів. Відомо, що атоми металів мають мало електронів у зовнішній оболонці, які ж до того слабо зв'язані з основною частиною атома (остовом). Це приводить до того, що метали мають малі іонізаційні потенціали і електрони зовнішніх оболонок атомів легко відриваються. Такі нелокалізовані електрони і забезпечують тепло- та електропровідність металів. Фізична суть цих процесів є предметом квантової механіки.

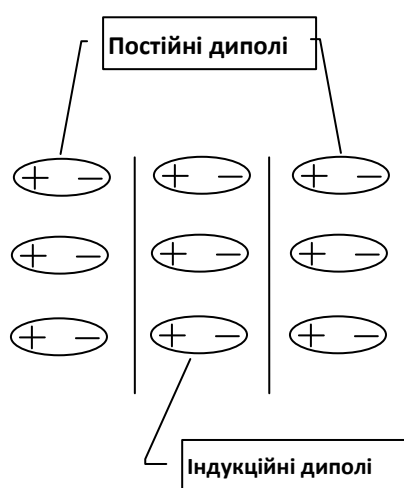


Рисунок 1.1 – Ілюстрація виникнення індукційних сил

Електронний газ об'єднує в одне ціле не тільки окремий кристал метала, а все металеве тіло, яке можна вважати однією макромолекулою.

Окрім розглянутих видів зв'язку між молекулами речовин, які знаходять застосування в триботехнічних системах, може мати місце специфічна взаємодія, яку називають міжмолекулярними силами або силами Ван дер Ваальса [1]. Ці сили діють між молекулами газоподібних і рідких речовин, а також між молекулами в кристалічних ґратках. Міжмолекулярні сили діляться на:

1) дисперсійні (dispersive) (сили Лондона [1]) – результат взаємодії елементарних диполів, що виникають в електрично

нейтральних атомах внаслідок руху електронів навколо ядра атома за достатньо великого зближенні атомів або молекул, побудованих з цих атомів;

2) конформаційні (conformational) – обумовлені електричною взаємодією окремих ланок молекул (ланцюгові молекули та кільцеві структури атомів). Обертання ланок молекул навколо зв'язку (наприклад, в органічній сполуці типу циклогексану) називається конформацією;

3) орієнтаційні (orientation) – сили електростатичної взаємодії між молекулами, що є постійними диполями;

4) індукційні (inductive) – результат електростатичної взаємодії постійного та індукційного диполів (рисунок 1.1).

Енергія взаємодії розглянутих видів міжмолекулярних сил швидко зменшується за зростання відстані між центрами мас молекул, що взаємодіють, і обернено пропорційна шостому степеню цієї відстані [1]. Розглянуті нами види зв'язку і міжмолекулярних сил називають **силами зчеплення** (cohesion) або **когезійними** (cohesion) **силами**, внаслідок дії яких із окремих атомів або молекул утворюються речовини (тіла) різного агрегатного стану та властивостей.

Чим більша енергія зв'язку, тим більш когезійним є тіло і тим важче його подрібнити, розплавити або випарувати. Найбільшу енергію зв'язку дає ковалентна (атомна) взаємодія між структурними елементами речовини, яка до того ж є направленим зв'язком (енергія взаємодії $E_{\text{евз}} = 418 \dots 628$ кДж/моль. Всі інші види зв'язку – ненаправлені. Енергія взаємодії між структурними елементами кристалів, утворених іонним та металевим зв'язками, приблизно однакова ($209 \dots 418$ кДж / моль).

Найслабшими є міжмолекулярні сили ($E_{\text{евз}} = 0,837 \dots 8,37$ кДж/моль). Мірою міцності кристалічної ґратки є енергія ґратки – енергія, яка необхідна для перенесення іонів одного моля кристалічної речовини в нескінченність [1].

В триботехнічних системах найбільше застосування мають метали, кристали яких можна вважати однією великою молекулою. Більшість металів мають просту кристалічну структуру. Розглянемо ці структури .

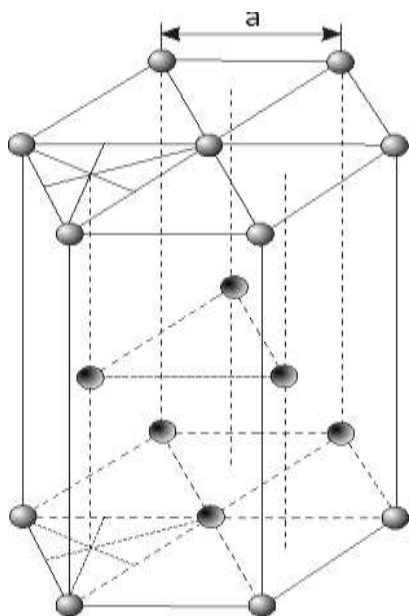


Рисунок 1.2 – Гексагональна щільно укладена ґратка (Г.Щ.У.)

1.1.1 Типи кристалічних структур металів

Наочно кристал можна уявити у вигляді конструкції із суцільно укладених кульок – атомів, іонів або молекул. Таку конструкцію називають кристалічною ґраткою.

Кристалічні структури металів бувають таких типів.

1. Гексагональна (hexagonal) щільно укладена ґратка (рисунок 1.2).

Ця структура утворюється у випадку скла-

дання площин із щільно укладених структурних елементів в простій послідовності: дві площини стикуються одна з одною таким чином, що кожний структурний елемент (кулька – атом або іон) однієї площини розміщується в заглибленні між трьома елементами сусідньої площини. Відстань a між центрами сусідніх елементів – атомів – називається атомним діаметром або параметром кристалічної ґратки.

2. Кубічна гранецентрована (face – centered cubic) або кубічна щільно укладена ґратка (рисунок 1.3) Під час утворення цієї структури щільно укладені площини атомів складаються так, що атоми – вузли ґратки – займають вершини куба та точки перетину діагоналей його граней. Г.Щ.У. та Г.Ц.К. вичерпують всі можливі щільно укладені структури кристалів. Багато металів мають більш прості кристалічні ґратки, які не є щільно укладеними.

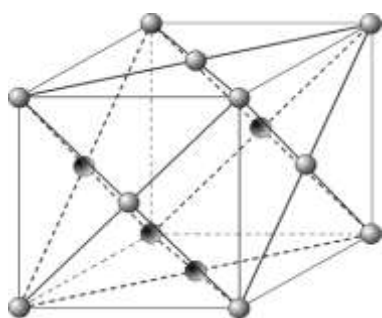


Рисунок 1.3 – Кубічна гранецентрована ґратка (Г.Ц.К)

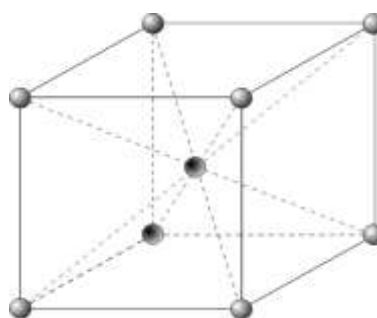


Рисунок 1.4 – Об'ємно центрована кубічна ґратка

3. Об'ємно центрована (body – centered) кубічна ґратка (рисунок 1.4) побудована таким чином, що атоми займають вершини куба і його центра ваги.

4. Проста кубічна ґратка (рисунок 1.5) має в своїх вузлах атоми, розташовані у вершинах куба.

5. Тетрагональна (tetragonal) ґратка (рисунок 1.6) має форму паралелепіпеда з атомами, розміщеними у його вершинах.

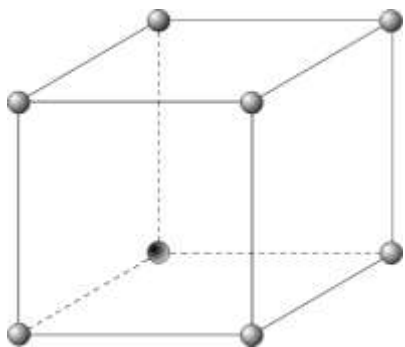


Рисунок 1.5 – Проста кубічна ґратка (К)

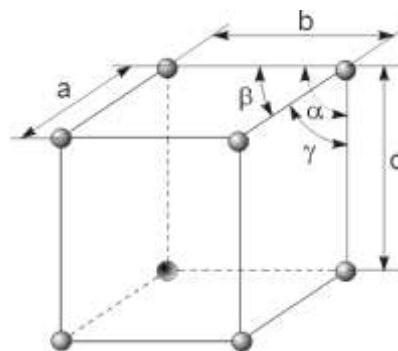


Рисунок 1.6 – Тетрагональна ґратка (Т)

Параметри цієї ґратки: $a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.

Гексагональну щільно укладену ґратку мають метали: Hf_α ; Mg ; Ti_α ; Cd ; Re ; Os ; Ru ; Zn ; Co_β ; Be ; Y ; La ; Zr_α .

Гранецентрована кубічна ґратка характерна для Ca_α ; Ge_β ; Sr_α ; Th ; Pb ; Sc_α ; Ni ; Ag ; Au ; Pd ; Pt ; Rh ; Ir ; Fe_γ ; Cu ; Co_α ; Al .

Метали Rb ; K ; Na ; Li ; Ti_β ; Zr_β ; Ta ; W ; Mo ; Fe_α ; Cr ; Nb ; Va ; Fe_β мають об'ємноцентровану кубічну ґратку.

Марганець Mn_γ , індій In та деякі інші метали мають тетрагональну ґратку (індекси α , β , γ , біля хімічних символів визначають поліморфні модифікації кристалів металів за різних температур).

Проста кубічна ґратка зустрічається лише в полонію Po в певному діапазоні температур [3]. Ця ґратка введена в кристалографію з метою спрощення деяких розрахунків, оскільки багато кристалічних структур можна подати як набір вставлених одна в одну простих кубічних ґраток, наприклад, об'ємноцентрована кубічна ґратка є системою двох простих кубічних ґраток, зміщених одна відносно одної, а гранецентрована кубічна ґратка складається з чотирьох ідентичних простих кубічних ґраток, певним чином розташованих одна відносно одної.

1.1.2 Дефекти кристалічної ґратки

Розглянуті нами в п. 1.2.1 типи кристалічних структур є математично ідеальними кристалами. Теорія ідеальних кристалів [3] дозволяє пояснити багато властивостей кристалічної ґратки – густину речовини, діелектричну проникність, питому теплоємність, пружні властивості.

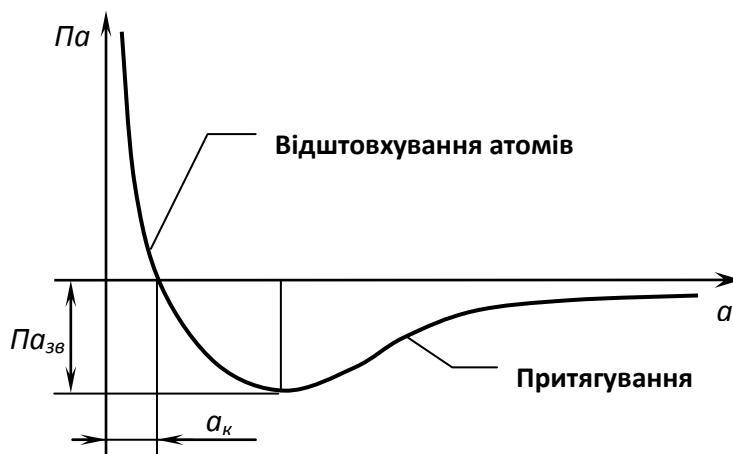


Рисунок 1.7 – Залежність потенціальної енергії атома P_a для твердого тіла від міжатомної відстані a

Ці властивості називають **структурно-нечутливими** або **об'ємними**. Реальні кристали у великій кількості мають порушення структури – дефекти (defect). Перераховані вище властивості кристалічної ґратки практично не залежать від наявності дефектів в кристалічній ґратці, але впливають на інші властивості ґратки – міцність, електропровідність, гістерезисні втрати у ферромагнітних металах тощо.

Ці властивості, які сильно залежать від ступеня досконалості кристала, називаються **структурно-чутливими**.

Дефекти кристалічної ґратки можна класифікувати таким чином:

- теплові коливання;
- точкові дефекти (вакансії, атоми проникнення, сторонні атоми – ізольовані включення домішок);
- поверхневі дефекти (пошкодження зовнішньої поверхні твердого тіла, пошкодження границь зерен і т. п.).

Розглянемо кожний із перерахованих дефектів більш детально.

1.1.2.1 Теплові коливання

Ні один кристал не є абсолютно жорстким, а це значить, що його можна деформувати силами скінченної величини і, затративши скінченну роботу, змістити атоми кристала з їхніх місць в ідеальній ґратці. Сили, необхідні для такої роботи, малі, тому достатньо теплової енергії самих атомів, щоб перенести їх із положення рівноваги на відчутну відстань. Таким чином, атоми не стоять нерухомо в вузлах кристалічної ґратки, а здійснюють теплові коливання відносно **положення рівноваги**. Рівноважні положення атомів у вузлах кристалічної ґратки визначаються за умови рівності сил притягання та відштовхування. За умови рівноваги цих сил потенціальна енергія твердого тіла має бути мінімальною. На рисунку 1.7 наведено залежність потенціальної енергії атома P_a від відстані a між атомами в кристалічній ґратці твердого тіла [3].

За великих міжатомних відстаней приймається, що потенціальна енергія дорівнює нулю, а за $a = a_{кр}$ потенціальна енергія проходить через мінімум, змінює знак і швидко зростає, оскільки густина речовини є величиною скінченною, сталою. Величина $Pa_{зв}$ є потенціальною енергією зв'язку одного атома. Внаслідок теплового руху атоми здійснюють поблизу свого положення рівноваги в вузлах кристалічної ґратки гармонічні коливання певної частоти та амплітуди. Ці коливання породжують в кристалі хвилі збудження, яким згідно з принципом де Бройля [4] можна приписати корпускулярні властивості і розглядати цю хвилю як квазічастинку певної енергії. Такі квазічастинки називаються **фононами**. Фонони переносять збудження в кристалах. Тепловими коливаннями атомів в вузлах кристалічної ґратки значною мірою пояснюються такі явища як теплопровідність, дифузія та електричний опір. Потрібно відмітити, що хоч теплові коливання і мають велике значення для фізичних процесів, що проходять в твердих тілах, але вони не порушують структурну цілісність кристала, оскільки в середньому кожний атом знаходиться на своєму місці.

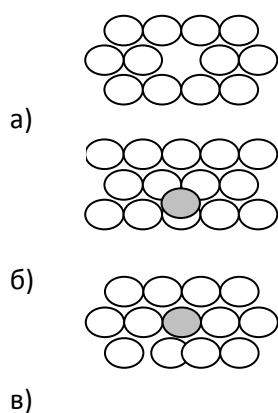


Рисунок 1.8 – Точкові дефекти кристалічної ґратки

1.1.2.2 Точкові дефекти

Точкові дефекти – це порушення кристалічної ґратки в ізольованих одна від одної точках. Точковими дефектами можуть бути: **вакансії** (vacancy) (рис. 1.8, а) – вузли ґратки, в яких немає атомів; **атоми проникнення** (рис. 1.8, б) – лишні атоми, що розміщуються між вузлами ґратки; **інорідні атоми** (рисунок 1.8, в) – ізольовані домішки, що займають місця в ґратці.

Вакансії зароджуються і знищуються в кристалах внаслідок теплових флуктуацій. Внутрішній атом, що випадково отримав надлишок енергії, може перейти на поверхню кристала, утворивши таким чином вакансію. Точне значення енергії утворення вакансії E_v дуже важко розрахувати аналітично, тому цю енергію знаходять експериментально. Знаючи енергію E_v , можна розрахувати число вакансій n_v в кристалі за заданої температури $T(K)$ за законом [3]

$$n_v = N \cdot e^{-E_v/(kT)}, \quad (1.1)$$

де N – число атомних вузлів ґратки;

k – стала Больцмана, Дж/К.

Вакансії можуть виникати у випадку різкого охолодження кристала, наприклад, під час гартування, або під час бомбування твердого тіла атомами або частинками високих енергій, наприклад, опромінення нейтронами в ядерному реакторі.

Швидкі частинки, стикаючись з атомами ґратки, переміщують їх у міжвузля. Виникає вакансія яка називається **дефектом за Френкелем** [3, 4]. Кількість таких вакансій вже залежить не від температури, а тільки від природи кристала та енергії опромінюючих частинок.

Атоми проникнення – це надлишкові атоми, що проникли в кристалічну ґратку, але не займають її вузлів. Ці дефекти бувають двох видів:

- 1) атоми проникнення такого ж типу, як у вузлах регулярної ґратки;
- 2) атоми проникнення другого типу (домішки). Обидва види цих дефектів

можуть співіснувати в одній кристалічній ґратці. Порівняно з вакансією енергія проникнення E_i значно більше. Кількість проникнень n_i в кристалі з N атомними вузлами можна оцінити за законом [3]

$$n_i = a_i \cdot N \cdot e^{-E_i/(kT)}, \quad (1.2)$$

де $a_i = \text{const}$ – ціле число (як правило, мале), яке характеризує кількість однакових міжвузлів в розрахунку на один атом ґратки.

Проникла домішка виникає під час проникнення стороннього атома в між-

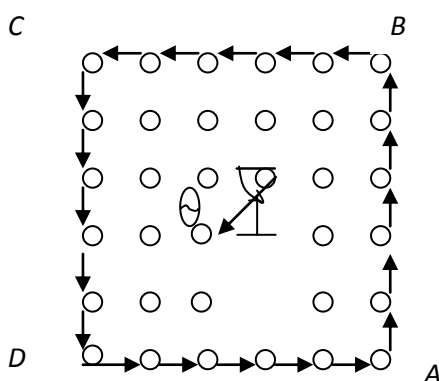


Рисунок 1.9 – Схема крайової дислокації

вузля кристалічної ґратки. За невеликих розмірів атома до-мішки енергія E_i мала. За цієї обставини малі атоми (кисню, вуглецю, водню та азоту) легко утворюють дефекти проникнення в кристалах металів. Цей висновок підтверджується експериментально тим, що металеві кристали поглинають велику кількість названих газів, наприклад, за відповідних умов цирконій поглинає так багато водню, що його атоми займають майже всі міжвузля кристалічної ґратки цирконію [3].

1.1.2.3 Дислокації

Дислокації мають суттєвий розмір тільки в одному напрямку і відносяться до лінійних дефектів кристалічної ґратки. Дислокація є значно складнішим дефектом кристалічної структури за будь-який точковий дефект.

Існують два межових види дислокації – **краєві** (edge dislocation) та **гвинтові** (screw dislocation). Реальна дислокація – це комбінація краєвої та гвинтової, геометричний опис якої зробити дуже важко. З метою спрощення пояснення фізичної суті дислокацій розглянемо окремо властивості краєвих та гвинтових дислокацій.

Краєва дислокація виникає під час появи в кристалі з яких-небудь причин зайвої атомної площини (рисунок 1.9). Поблизу цієї площини (екстраплощина) кристалічна ґратка спотворюється. Це спотворення проходить вздовж екстраплощини, утворюючи **лінійний** дефект кристалічної ґратки. Краєва дислокація може простягатись в довжину на багато тисяч періодів ґратки, може бути прямою, але може й вигинатись в той чи інший бік. Область поблизу дислокаційної лінії називається **ядром дислокації**. Тут найбільше спотворення кристалічної ґратки і найбільші локальні деформації кристала, але уже на відстані декількох атомних діаметрів спотворення ґратки настільки малі, що їх можна не брати до уваги. Область кристала, далека від ядра дислокації, називається **пружною областю**.

Якщо навколо дислокації \perp (див. рисунок 1.9) обвести контур $ABCD$, то ділянка BC буде більше ділянки AD . Різниця $BC - AD = b$ є скалярна величина вектора Бюргерса b (Burgers vector) [3, 5], який є мірою величини дислокації та її напрямку. Вектор Бюргерса b є кратним параметру a кристалічної ґратки. Локальне розширення кристала поблизу ядра дислокації називається **дилатацією** Δ , яку можна розрахувати за формулою [3]

$$\Delta = \Delta V/V = b/r \cdot (\sin \theta), \quad (1.3)$$

де ΔV – приріст об'єму кристала V , обумовлений наявністю зайвої атомної площини;

r – радіальна відстань від будь-якої заданої точки кристала до лінії дислокації;

θ – кут, який визначається за схемою, показаною на рисунку 1.9.

Знаком \perp позначається позитивна краєва дислокація, а знаком Γ – негативна. У випадку закручування краєвої дислокації в спіраль виникає **гвинтова дислокація**, за якої в напрямку, перпендикулярному до дислокації, вже немає повністю не забудованих атомних площин, а всі атоми знаходяться на одній гвинтовій

поверхні, яка починається біля одного краю кристала і закінчується біля протилежного (рисунок 1.10, а, б).

Гвинтова дислокація – це пряма лінія EF (вісь z), навколо якої атомні площини вигнуті по гвинтовій поверхні. Якщо обійти верхню вигнуту атомну площину за годинниковою стрілкою, то прийдемо до краю другої атомної площини (рисунок 1.10, а). Продовжуючи цей обхід можна зробити висновок, що кристал ніби складається з однієї атомної площини, закрученої у вигляді гвинтової поверхні (рисунок 1.10, б).

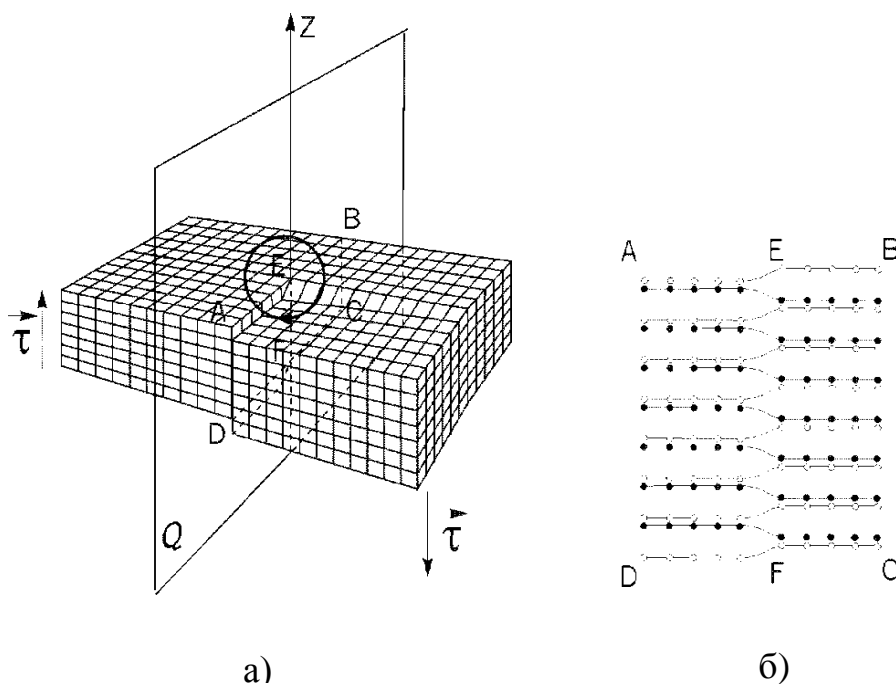


Рисунок 1.10 – Просторова модель утворення гвинтової дислокації (праворі) EF за неповного зсуву атомних площин по площині Q

Як і краєва (лінійна), гвинтова дислокація утворена неповним зсувом кристала на одну атомну відстань по площині Q , але на відміну від краєвої вектор зсувної напруги $\vec{\tau}$ та дислокації EF паралельні (у випадку краєвої дислокації вектор $\vec{\tau}$ перпендикулярний до дислокації). На відміну від краєвої дислокації поблизу центра гвинтової дислокації виникають не дилатації, а закручування чи зсув кристалічної ґратки. Атоми, що знаходяться на гвинтовій поверхні, зміщені зі своїх початкових місць в ідеальному кристалі. Це зміщення описується рівнянням гвинтової поверхні [3]

$$U_z = \vec{b} \cdot \theta / (2\pi), \quad (1.4)$$

де U_z – зміщення атомних площин вздовж осі z дислокації EF ;

\vec{b} – вектор Бюргерса;

θ – кут зміщення, який відраховується від якої-небудь осі, перпендикулярної до дислокації, за збільшення θ від 0 до 2π $U_z = b$.

Напряг гвинтової дислокації може бути як правим так і лівим, а крок гвинтової лінії становить від однієї до декількох атомних відстаней на один повний оберт гвинта. Точкові дефекти та дислокації можуть переміщуватись по кристалічній ґратці. Точкові дефекти рухаються по ґратці хаотично, а на переміщені дислокації накладаються деякі обмеження, оскільки дислокація завжди має бути неперервною лінією. Можливі два основних види руху дислокації – переповзанням (creep) і ковзанням (sliding).

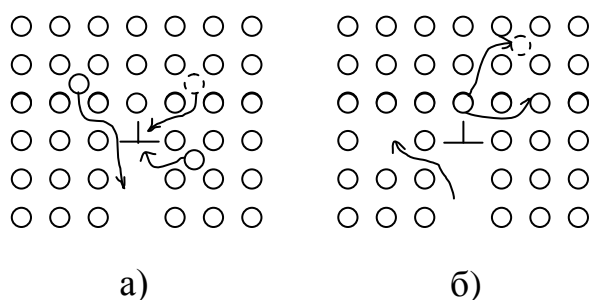


Рисунок 1.11 – Схема переповзання гвинтової дислокації

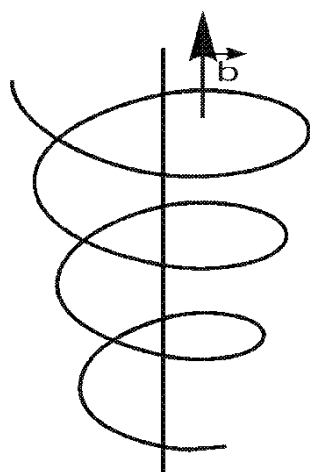


Рисунок 1.12 – Схема переповзання гвинтової дислокації

Переповзанням (creep) і ковзанням (sliding).

Під час переповзання зайва атомна півплощина рухається в глибину кристала або на його поверхню. Розуміти переповзання як буквальный рух півплощини не потрібно. Цей рух здійснюється шляхом переходу окремих атомів із кристала на границю зайвої півплощини (рисунок 1.11, а) або з краю цієї півплощини в глибину кристала (рисунок 1.11, б). Рух дислокацій переповзанням може здійснюватись за такими механізмами:

1) вакансії, які є в кристалічній ґратці, можуть анігілювати біля краю зайвої атомної площини;

2) вакансії можуть виникати поблизу краю зайвої атомної площини під час перестрибування (jumping) атома із сусідньої атомної площини на край зайвої, що визиває рух цієї площини в глибину кристала;

3) на край зайвої атомної площини можуть переходити атоми, прониклі в міжвузля (див. рисунок 1.11, а);

4) перестрибуванням атомів з краю зайвої атомної площини в найближче міжвузля (див. рисунок 1.11, б) ґратки. Переповзання краєвої дислокації має характер прямолінійного переміщення.

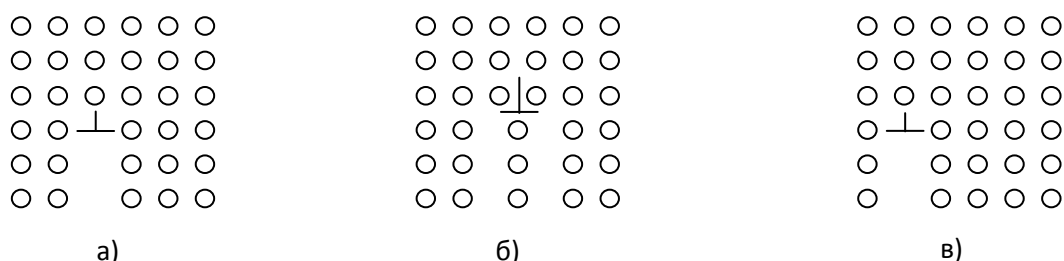


Рисунок 1.13 – Схема переміщення краєвої дислокації ковзанням

В гвинтовій дислокації, де вектор Бюргерса паралельний дислокаційній лінії та немає зайвої півплощини, переповзання здійснюється складним гвинтоподібним рухом за скручування в спіраль (рисунок 1.12). Спіраль створює краєву компоненту дислокації, яка дозволяє гвинтовій дислокації реалізувати переміщення переповзанням. Переповзання гвинтової дислокації викликає розширення спіралі в радіальному напрямку. Рух дислокації можна спостерігати в електронний мікроскоп.

Ковзання дислокацій – це такий її рух, коли зайва атомна півплощина з'єднується з атомною площиною, що знаходиться під площиною ковзання, а сусідня атомна площина стає тепер зайвою (рисунок 1.13, а), б), в).

Рух дислокацій ковзанням здійснюється значно легше, ніж переповзанням, оскільки цей рух не пов'язаний з повільною дифузією атомів. Плавний рух лінії дислокації можна викликати дією на кристал зсувних сил, прикладених до його поверхні. Наявність дислокацій в кристалі значно полегшує його пластичну деформацію.

Чиста гвинтова дислокація також може переміщуватись ковзанням, причому всі атомні площини, які містять гвинтову дислокацію, є площинами ковзання, що дозволяє цій дислокації ковзати в будь-якому напрямку.

Під час дії на кристал зсувних напружень дислокації не тільки рухаються, але й розмножуються [3, 4, 5, 6, 7]. Важливою характеристикою дислокацій є їхня густина [6]

$$\rho_d = \sum_{i=1}^n l_i / V, \quad (1.5)$$

де $\sum_{i=1}^n l_i$ – сумарна довжина дислокацій;

V – об'єм кристала.

Проникнення екстраплощини в кристалічну ґратку приводить до появи навколо дислокації силового поля [3, 7], яке під час зближення дислокацій обумовлює їх взаємодію. Дислокації одного знака, розташовані в одній площині ковзання, взаємно відштовхуються, а різного знака можуть анігілювати. Під час

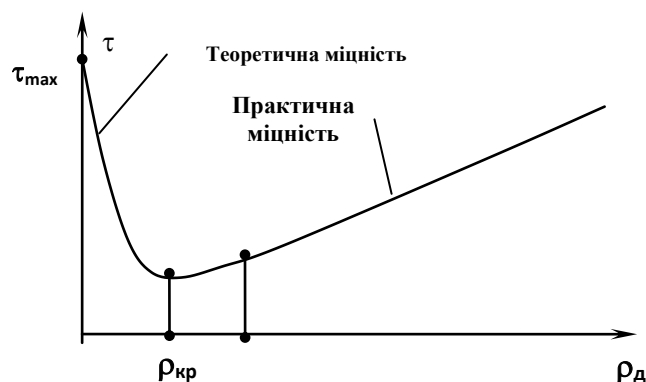


Рисунок 1.14 – Залежність опору деформації від ρ_d

зближення дислокацій, що рухаються в різних площинах ковзання, вони переплітаються, а за великої густини дислокацій це переплітання утруднює їх рух, збільшуючи тим самим величину зусилля, необхідного для пластичної деформації кристала. Явище хаотичного переплітання дислокацій, яке збільшує опір деформуванню кристала, називається **наклепом** (work hardening). На-

клеп є типовим методом отримання міцного матеріалу.

Вплив ρ_d густини дислокацій на величину опору зсувного деформування τ кристалічних матеріалів можна виразити графічною залежністю $\tau = f(\rho_d)$ (рисунок 1.14) [3]. За низької густини дислокацій механічні властивості матеріалу наближаються до теоретичних властивостей ідеального кристала, наприклад, монокристали («вуса») мають міцність, близьку до теоретичної міцності ідеального кристала.

Збільшення густини дислокацій за межу $\rho_{dкр}$ підвищує опір деформуванню (deformation) внаслідок хаотичного переплітання дислокацій.

Максимальну величину зсувного напруження τ_{max} для ідеального кристала визначимо з таких міркувань [7]. Нехай маємо спрощену модель кристалічної ґратки (рисунок 1.15) з параметрами a та b .

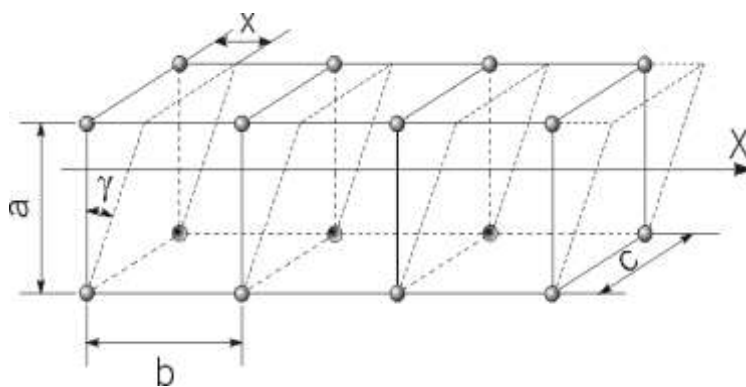


Рисунок 1.15 – Схема деформування кристалічної ґратки

кожний атом діятиме сила F , яка за $x < b/2$ намагатиметься повернути атом в стійке початкове положення. За $x = b/2$ притягування між атомами зрівноважиться їх відштовхуванням і сила $F = 0$ (див. рисунок 1.7), але ця рівновага нестійка. Якщо $x > b/2$, то верхній шар атомів буде прагнути зайняти нове стійке положення, зміщене від почат-

кового на величину b .

Сила F є складною функцією параметрів ґратки a та b і напруження τ . Розклавши цю функцію в ряд Тейлора і обмежившись першим членом ряду, отримаємо

$$F = F_{max} \sin(2\pi x/b), \quad (1.6)$$

де F_{max} – сила опору зсувові атомних площин на одну атомну відстань. Оскільки кут γ малий, то можна взяти $\sin(2\pi x/b) \approx 2\pi x/b$. Змінні F та x можна визначити через параметри ґратки: $F = \tau \cdot b^2$; $x = a \cdot \text{tg} \gamma \approx a\gamma$.

Виразивши напруження зсуву через закон Гука $\tau = \gamma \cdot G$ (G – модуль зсуву) з урахуванням зроблених зауважень, отримаємо:

$$F = F_{max} \frac{2\pi x}{b} = F_{max} \frac{2\pi a \gamma}{b} = F_{max} \frac{2\pi a \tau}{G \cdot b}, \quad (1.7)$$

звідки

$$F_{\max} = \frac{F \cdot G \cdot b}{2\pi a t} = \frac{b^3}{2\pi a}; \quad (1.8)$$

$$\tau_{\max} = F_{\max} / b^2 = b \cdot G / (2\pi \cdot a). \quad (1.9)$$

За $a = b$ матимемо $\tau_{\max} = 0,16G$. Більш точні розрахунки, які враховують реальні залежності сил взаємодії між атомами кристалічної ґратки, дають дещо менше значення $\tau_{\max} = 0,033G$ [7]. Експериментальні значення в цьому випадку в декілька сотень, а іноді і в тисячу раз менші теоретичного, наприклад, для заліза розрахункове значення $\tau_{\max} = 2300$ МПа, а експериментальне – 29 МПа, для міді, відповідно 1540 МПа і 1 МПа [7]. Значні розходження між розрахунковими та дослідними значеннями τ_{\max} можна пояснити тим, що уявлення про рух атомних площин одна по одній під час деформації ідеального кристала недостатньо точно відтворює дійсний механізм процесу деформації. Найбільш ймовірно припустити, що ковзання здійснюється не шляхом одночасного переміщення всіх атомів, розташованих в площині ковзання, на відстань, що дорівнює періоду ґратки (a чи b), а частковим зміщенням атомів на відстань, меншу за період ґратки. В цьому випадку пластична (plastic) деформація буде наставати за значно менших значень зсувних напружень. Процес пластичної деформації реальних кристалів найбільш логічно та послідовно пояснює теорія дислокацій, яка розглядає пластичну деформацію як результат переміщення дислокацій (краєвих та гвинтових) в площині зсуву.

2 ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ (ПШ) ТВЕРДИХ ТІЛ. МАКРО- ТА МІКРОГЕОМЕТРІЯ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ І ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Характер взаємодії контактуючих твердих тіл, наприклад під час тертя, обумовлюється процесами, що проходять в тонких поверхневих шарах (ПШ) тіл, властивості яких суттєво відрізняються від властивостей глибинних шарів твердого тіла.

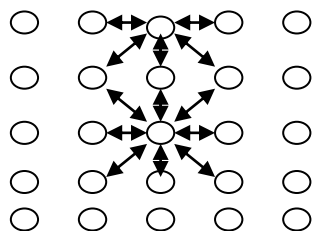


Рисунок 2.1 – Схема взаємодії між частинками твердого тіла, розташованими в глибині тіла (частинка 1) і на його поверхні (частинка 2)

Навіть в ідеальному кристалі поверхневі шари відрізняються за властивостями від глибинних через несиметричність сил, що діють на частинки тіла (атоми чи молекули), розташованих в ПШ, та некомпенсованість зв'язків цих сил (рисунок 2.1).

Рівновага сил, що діють на частинку 1, розташовану в глибині тіла буде дорівнювати нулю, а рівнодійна сил, які діють на частинку 1, розміщену на поверхні тіла, навіть за умови, що тіло знаходиться в глибокому вакуумі, не дорівнює нулю і направлена в середину тіла.

Така силова взаємодія приводить до появи у частинок ПШ надлишкової потенціальної енергії, яка називається поверхневою. Рівень цієї енергії залежить від виду зв'язку між атомами (молекулами) твердого тіла.

Некомпенсованість зв'язків частинок, розташованих в ПШ, обумовлює їх адсорбційну здатність. **Адсорбція** (adsorption) – це процес приєднання до поверхні твердого тіла молекул з навколишнього середовища внаслідок дії на них міжмолекулярних сил. За хімічної взаємодії цих молекул з ПШ цей процес називається **хемосорбцією**. Поверхню твердого тіла називають ще **адсорбентом**, а молекули із зовнішнього середовища, які внаслідок теплового руху підходять до твердого тіла та прилипають до його поверхні – **адсорбатом**. Під час фізичної адсорбції (далі – адсорбція) проявляється тільки міжмолекулярна взаємодія, яка не знищує у молекул адсорбата індивідуальності. Адсорбція є зворотним процесом, коли за отримання з якихось причин додаткової енергії адсорбовані молекули можуть відриватись від поверхні тіла. Цей процес називається **десорбцією**. Внаслідок протікання двох конкуруючих процесів, адсорбції та десорбції, протягом деякого певного проміжку часу настає динамічна рівновага між цими процесами. Час досягнення динамічної рівноваги залежить від тиску (pressure) газів та парів над поверхнею твердого тіла і за нормальних умов змінюється від 10^{-10} с до 10^{-5} с. За нормального тиску на поверхні тіла, якщо його помістити в повітряне чи яке-небудь газове середовище, миттєво виникають плівки адсорбованих молекул. Якщо тиск дуже низький (вакуум), то динамічна

рівновага між процесами адсорбції та десорбції досягається протягом декількох годин. Під час розміщення тіла в газовій суміші, в адсорбованих шарах спостерігається [1] перерозподіл молекул, за якого молекули, що сильно адсорбують, витісняють з поверхні тіла молекули, які слабо адсорбують.

Під час хемосорбції адсорбовані молекули або атоми вступають в хімічний зв'язок з молекулами (атомами, іонами) твердого тіла, розташованими в ПШ. Енергія хімічного зв'язку значно більша за енергію адсорбційного (на декілька порядків), тому частинки речовин, які здатні брати участь в хемосорбційних процесах, витісняють з ПШ частинки, які можуть тільки адсорбувати. З цієї причини на поверхнях реальних твердих тіл, там де це тільки можливо, виникають хемосорбційні плівки, найчастіше це плівки окислів. Власні ПШ твердого тіла розташовані під шарами адсорбційних та хемосорбційних плівок.

Тверде тіло може також поглинати речовину. Процес об'ємного поглинання твердим тілом речовини називається **абсорбцією** (absorption). Вважається, що поглинута речовина з часом рівномірно розподіляється по об'єму тіла. Вплив абсорбції на властивості ПШ твердих тіл поки що досліджено не достатньо.

Під час виготовлення та експлуатації деталей машин проходять суттєві зміни ПШ твердих тіл. Фізико-механічні, хімічні та геометричні зміни властивостей ПШ, які виникають під час оброблення деталей, називають **технологічними**, а зміни, що з'являються в процесі роботи деталі – **експлуатаційними**.

Пластичне деформування ПШ призводить до накопичення в них мікроскопічних дефектів (вакансій, дислокацій і т. п.), які сприяють розпушуванню (вакансії) ПШ та можуть бути причиною появи мікротріщин, а вихід дислокацій на поверхню твердого тіла зменшує міцність матеріалу деталі. Мікротріщини викликають полікристалізацію в ПШ, що може бути причиною залишкових деформацій і напружень. Через пори та мікротріщини в ПШ твердого тіла також можуть проникати молекули поверхнево-активних речовин (ПАР), які є в змащувально-охолоджувальній рідині (ЗОР), що використовується під час оброблення деталей, а також молекули корозійно-активних речовин. Ці молекули створюють умови для появи **ефекту адсорбційного зниження міцності** – ефекту Ребіндера [8].

Інтенсивна пластична деформація ПШ під час механічного оброблення деталей машин та їх експлуатації приводить до ро-

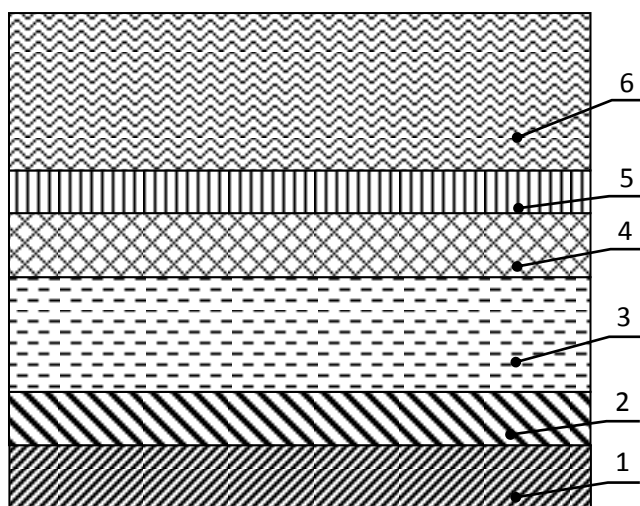


Рисунок 2.2 – Модель будови ПШ твердого тіла

зігрівання ПШ, а це розм'ягчує матеріал ПШ та в декілька разів збільшує швидкості дифузії і хімічних процесів, що зі свого боку активує механічні та трибологічні процеси.

ПШ реального твердого тіла може мати таку будову (див. рисунок 2.2) [1].

Поверхневі та приповерхневі шари 2 власне твердого тіла 1 сильно розпушені та деформовані. В них діють залишкові напруження. Товщина шарів 1 залежить від великої кількості вихідних факторів, способів технологічного оброблення та умов експлуатації деталей і, як правило, не перевищує 100 мкм [9, 10]. До шару 2 безпосередньо прилягає шар 3, який є хемосорбційним шаром. Склад і структура цього шару залежить від умов оброблення, а також середовища, з яким взаємодіяла деталь під час зберігання та експлуатації. Зазвичай шар 3 – це шар окислів, товщина якого коливається в межах від 20 мкм до 200 мкм [11, 12]. Над хемосорбційним шаром розташований шар 4 адсорбованих газів, зокрема парів води, які завжди присутні у повітрі. Товщина шару 4 залежить від тиску газів над поверхнею твердого тіла і температури, з підвищенням якої вона зменшується [1]. Шари 5 та 6 мають органічне походження і відрізняються між собою будовою [13]. Шар 5 має полікристалоподібну будову, механічні властивості якої відрізняються від об'ємних механічних властивостей речовини, з молекул якої складається шар 5. За даними роботи [13] товщина шару 5 знаходиться в межах 25...40 довжин молекул речовини, з якої цей шар складається. Будова шару 5 обумовлена дією поля поверхневих сил (див. рисунок 2.1). Шар 6 складається з органічних молекул, які орієнтуються паралельно поверхні твердого тіла. Потрібно відмітити, що два шари (5 та 6) утворюються тільки за достатньої концентрації органічних молекул, а за їх малої концентрації на поверхні твердого тіла утворюється один моношар органічних молекул [1]. Якщо між шарами 3, 4, 5 та 6 можна виділити більш-менш чітку межу, то між шарами 1, 2 та 3 такої межі не існує [1].

2.1 Фізико-механічні характеристики ПШ

Міцність на стискання σ_{cm} ПШ за відліку від поверхні шару в глибину твердого тіла зростає, тобто змінення міцності сорбційних шарів, які виникають внаслідок процесів адсорбції та хемосорбції, можна характеризувати градієнтом напружень $d\sigma_{cm}/dh > 0$ [1], де h – відстань, яка відраховується від поверхні шару 6 до поверхні твердого тіла 1 (див. рисунок 2.2).

Під час пластичного деформування матеріалу ПШ збільшується його міцність, причому найбільш інтенсивно деформуються шари, які розташовані ближче до поверхні, до того ж ці шари більше й зміцнюються внаслідок явища наклепу. Необхідно відмітити, збільшення концентрації дефектів в ПШ може приводити не тільки до зміцнення, але й до зменшення міцності. Ефект адсорбційного зниження міцності (ефект Ребіндера [8]) найбільш інтенсивно проявляється, якщо в матеріалі ПШ діють розтягувальні напруження, наприклад, під час зовнішнього тертя за ковзаючими мікронерівностями виникають розтягувальні напруження.

Фізико-механічні характеристики, склад і будова ПШ сильно залежить від температури, причому вплив температури, що виникає під час технологічного оброблення деталі машини та в процесі її експлуатації, на міцність ПШ різний. Нагрівання ПШ в процесі оброблення розм'ягчує матеріал ПШ і полегшує пластичну деформацію поверхні. Внаслідок цих процесів зменшується розтріскування матеріалу ПШ, погіршується фізична адсорбція та інтенсифікуються хемосорбційні процеси тощо.

Через складність і багатофакторність процесів, які впливають на фізико-механічні характеристики ПШ теоретично передбачити зміну цих характеристик під час оброблення на сучасному етапі розвитку трибології неможливо. Основним методом вивчення впливу різних факторів на властивості ПШ є експериментальні дослідження, які показують [14], що за збільшення відстані від поверхні шару δ (див. рисунок 2.2) мікротвердість (microhardness) H_μ зростає та досягає максимального значення на деякій глибині (рисунок 2.3 крива 1), а потім монотонно зменшується до деякого значення (пунктирна лінія) об'ємної мікротвердості. Визначити однозначно положення максимуму дуже важко, а деякі експериментальні роботи [15] максимуму мікротвердості ПШ не відмічають, констатуючи її монотонне зменшення. Зміну мікротвердості можна пояснити тим, що під час зростання відстані h від поверхні адсорбованих шарів вона зростає, досягаючи максимуму в хемосорбційному шарі, до об'ємної мікротвердості власне твердого тіла, тому крива 1 певною мірою є універсальною.

Під час експлуатації деталі машини, якщо нагрівання ПШ незначне, зміна мікротвердості твердості проходить за кривою 1. У випадку, коли нагрівання ПШ в умовах експлуатації значне, причому верхні шари поверхні деталі не встигають охолонути і залишаються розм'якшеними, їх мікротвердість буде меншою за мікротвердість шарів, що лежать нижче. В таких умовах експлуатації мікротвердість ПШ буде змінюватись за кривою 2 (рисунок 2.3). Змінення мікротвердості можна характеризувати градієнтом $dH_\mu / dh > 0$, названим

І. В. Крагельським правилом позитивного градієнта механічних властивостей ПШ за глибиною.

Внаслідок складної будови ПШ під час контактування твердих тіл їх взаємодія відбувається не між ними самими, а між сорбційними плівками, які покривають поверхні тіл. Сукупний шар сорбційних плівок двох твердих тіл, що контактують, І. В. Крагельський назвав **третім тілом.**

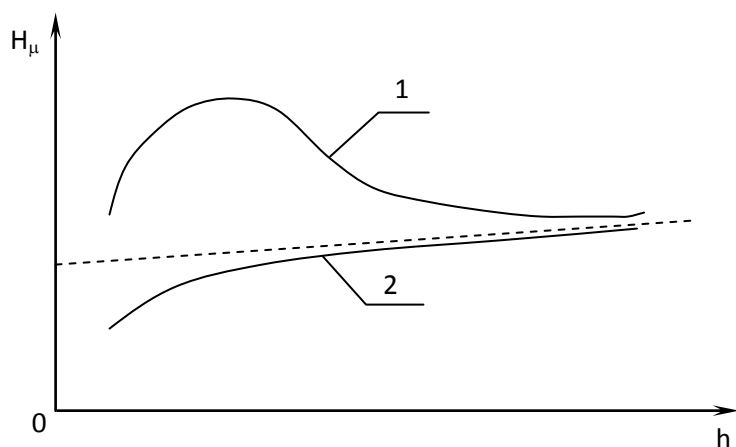


Рисунок 2.3 – Змінення мікротвердості H_μ залежно від відстані від поверхні шару δ (див. рисунок 2.2) h під час технологічного оброблення деталі (крива 1) та в умовах експлуатації (крива 2)

2.2 Макро- та мікрогеометричні характеристики поверхонь твердих тіл

Профіль (profile) поверхні деталі, заданий її креслеником, називається **номінальним**. В процесі оброблення (найчастіше механічного) поверхня деталі машини формується за допомогою інструмента, який є ланкою системи верстат – пристосування – інструмент – деталь (ВПД). Під час оброблення внаслідок дефектів системи ВПД та похибок технологічного процесу на поверхні деталі виникають відхилення від номінального профілю. Ці відхилення називаються **технологічними**. Відхилення від номінального профілю, які обумовлені нерівномірним зношуванням різних ділянок деталі під час її роботи, називаються **експлуатаційними**.

Відхилення діляться на мікроскопічні та макроскопічні. **Макровідхилення** (makrodeviation) – це нерегулярні відхилення поверхні деталі від номінального профілю. До цього виду відхилень відносяться: увігнутість (concavity) (рисунок 2.4, а), бочкоподібність (barrel – shaped profile) (рисунок 2.4, б) і конусність (conicity) (рисунок 2.4, в) для деталей обертання; неплосцинність (випуклість (convexity) та увігнутість) для деталей з плоскими поверхнями (рис. 2.4, г, д). Розрізняють технологічні та експлуатаційні макровідхилення. Технологічні макровідхилення обумовлюються недостатньою точністю верстата, неточним закріпленням інструмента, неправильним вибором режимів оброблення або їх порушеннями, температурними напруженнями та деформаціями в системі ВПД. Причиною експлуатаційних макровідхилень є нерівномірність зношування, внаслідок неправильного устанавлення деталей в рухомому спряженні, вібрації, ударні навантаження та перевантаження в процесі роботи деталі. Якщо своєчасно виявити та ліквідувати причини появи макровідхилень, то ці відхилення частково можна усунути.

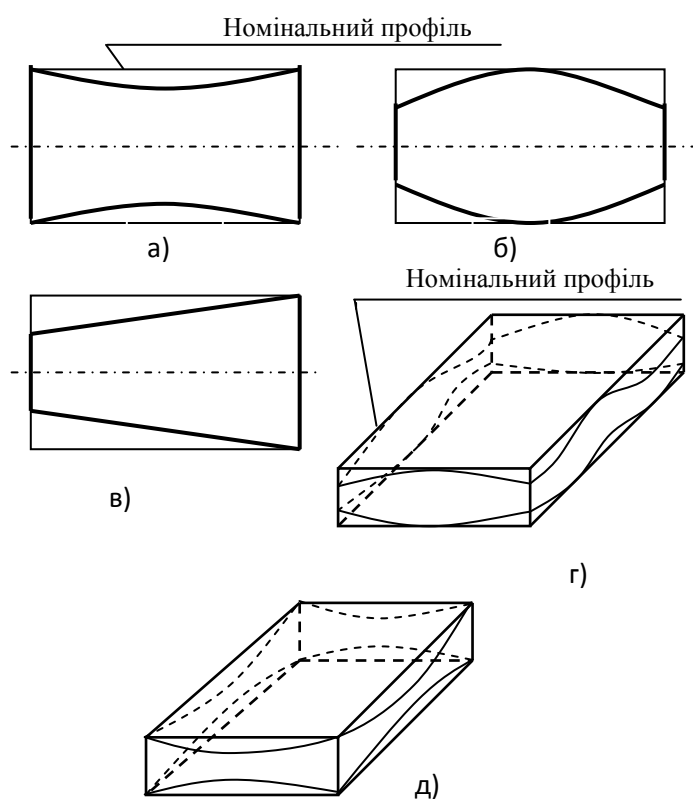


Рисунок 2.4 – Макровідхилення поверхні деталей від номінального профілю



Рисунок 2.5 – Макровідхилення поверхні деталі від номінального профілю

Мікровідхилення (microdeviation) діляться на хвилястість (waviness) 1, шорсткість (roughness) 2 і субмікрошорсткість (submicroroughness) (рисунок 2.5). **Субмікрошорсткість** поверхні деталі – це більш мілкі відхилення, які є на поверхнях мікронерівностей 2 (на рисунку 2.5 субмікрошорсткість умовно не показана). **Хвилястість поверхні** – це періодичні відхилення номінального профілю деталі, які являють собою приблизно однакові за розмірами підняття та западини. Хвилястість поверхні може виникати під час

оброблення деталі (технологічна) та під час її експлуатації (експлуатаційна). Причина появи **технологічної** хвилястості поверхні – недостатня жорсткість системи ВПД, внаслідок якої в цій системі виникають низькочастотні коливання. Ці коливання викликаються неоднорідністю механічних властивостей матеріалу деталей, що обробляються, та нестабільністю режимів оброблення.

Експлуатаційна хвилястість поверхні викликається реологічними властивостями матеріалу поверхонь тертя та динамічними навантаженнями, що діють в рухомому з'єднанні деталей. Хвилі на поверхні реальної деталі мають форму хвиль аперіодичних негармонічних коливань. Із задовільною точністю ці хвилі можна описати синусоїдою, що значно спрощує вихідні формули для розрахунку геометричних характеристик хвилястості. Під час визначення хвилястості поверхні, розраховують:

1) крок хвилі $S_{xв}$ – відстань між вершинами двох сусідніх хвиль, виміряну на профілі поверхні деталі;

2) висоту хвилі $H_{xв}$ – відстань між вершиною хвилі та її западиною. Висота хвилі дорівнює подвійній амплітуді хвилі $A_{xв}$ ($H_{xв} = 2A_{xв}$). Крок і висота хвилі залежать від виду оброблення (токарне, фрезерне, шліфувальне тощо) поверхні деталі та змінюються в межах: $0,25 \text{ мкм} \leq S_{xв} \leq 10^4 \text{ мкм}$; $0,03 \text{ мкм} \leq H_{xв} \leq 500 \text{ мкм}$. Зазвичай $S_{xв}/H_{xв} \geq 40$ [1];

3) радіус кривизни виступів вершин хвиль [1]

$$R_{xв} = S_{xв}^2 / (8H_{xв}). \quad (2.1)$$

Під час вимірювання хвилястості з поверхні деталі знімають хвилеграми, наприклад, за допомогою щупових приладів типу «Калібр – 252» або «Телесерф» [1]. Хвилеграми знімають вздовж і поперек напрямку оброблення. Використовуючи залежність (2.1), визначають радіуси кривизни хвиль вздовж напрямку оброблення $R_{xв.взд}$ та поперек $R_{xв.поп}$. Зведений радіус кривизни хвилі розраховують за формулою

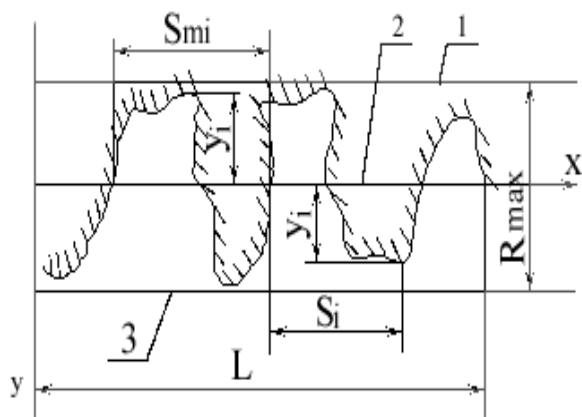
$$R_{xв} = \sqrt{R_{xв.взд} \cdot R_{xв.поп}}. \quad (2.2)$$

Шорсткість поверхні деталі – це нерегулярні мікровідхилення від геометричного профілю хвилястої поверхні твердого тіла (див. рисунок 2.5). Як і хвилястість, шорсткість поверхні визначають під час оброблення та експлуатації. Технологічна шорсткість обумовлена геометрією інструмента, що використовується під час оброблення деталі, та його зношуванням, вібраціями в системі ВПД, утворенням наростів на різці, усадкою стружки, режимами оброблення, властивостями матеріалу деталі та інструмента [15]. Технологічну шорсткість для деяких видів оброблення ділять на поздовжню і поперечну (точіння, фрезерування, шліфування тощо).

Під час роботи деталі в рухомому спряженні параметри шорсткості змінюються. Таку змінену шорсткість називають експлуатаційною та ділять її на два види: нерівноважну та рівноважну. Нерівноважна шорсткість є перехідною від технологічної до рівноважної та характерна для періоду припрацювання деталей рухомого спряження, наприклад, коліс зубчастого зачеплення. Характер змінення параметрів нерівноважної шорсткості визначається напруженим станом в зоні контакту мікронерівностей. Під **мікронерівністю** розуміють частину профілю поверхні тіла між профілем і прямою, що з'єднує дві сусідні западини мікровідхилення.

Під час роботи деталей машин та їх спряжень виникають пружні деформації їхніх зон контактів. Зміна параметрів шорсткості в цих зонах обумовлюється зношуванням поверхонь тертя взаємодіючих деталей. В період припрацювання деталей має місце інтенсивна пластична деформація ПШ менш жорсткого із взаємодіючих тіл і проходить підстроювання цього тіла під шорсткість більш жорсткого тіла [10], що трансформує пластичні деформації зон контактів в пружні. За реалізації пружних деформацій в зонах контактів мікронерівностей деталей спряження нерівноважна шорсткість (nonequilibrium roughness) переходить в рівноважну. У випадку зміни умов тертя можуть змінюватись і характеристики експлуатаційної шорсткості. Вважається [2, 10], що за нормальних умов тертя рівноважна шорсткість відновлюється, хоча механізм цього процесу вивчений ще недостатньо.

Кількісно параметри шорсткості оцінюють шляхом зняття з поверхні деталей профілограм з різним збільшенням по горизонталі та вертикалі. За різних видів оброблення деталей параметри шорсткості та хвилястості поверхні можуть перекриватись. Щоб їх не плутати, шорсткість визначають, згідно з ГОСТ 25142 – 82, на профілі певної



1- лінія западин; 2- середня лінія; 3- лінія виступів.

Рисунок 2.6 – Профілограма поверхні деталі

довжини L , яка називається **базовою**. Розрізняють також **базову лінію** (baseline) (поверхню) – лінію (поверхню) заданої геометричної форми, певним чином проведеної відносно профілю (поверхні) та призначеної для оцінення параметрів шорсткості поверхні деталі [16].

Під час оброблення профілограм (profilogram) (рисунок 2.6) шорсткість поверхні оцінюють (ГОСТ 2789 – 73) такими параметрами:

1) висотою мікронерівностей профілю поверхні R_z у десяти точках:

$$R_z = 0,2 \cdot [\sum_{i=1}^5 |H_{imax}| + \sum_{i=1}^5 |H_{imin}|], \quad (2.3)$$

де H_{imax} , H_{imin} – максимальні відхилення від середньої лінії 2 профілю поверхні відповідно мікроставів та мікрозападин;

2) середньоарифметичним відхиленням профілю поверхні деталі від середньої лінії 2 (див. рисунок 2.6) в межах базової довжини L :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx, \quad (2.4)$$

або для наближених розрахунків

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (2.5)$$

де $y(x)$ – функція відхилень профілю від середньої лінії 2;

n – число вибраних точок профілю на базовій лінії;

y_i – відхилення профілю поверхні в довільному перерізі;

3) середнім кроком мікронерівностей

$$S_m = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} S_{mi}, \quad (2.6)$$

де n_1 – число кроків за виступами в межах базової довжини L (за звичай не менше 5);

S_{mi} – крок нерівностей профілю, що дорівнює довжині відрізка середньої лінії, який перетинає профіль в трьох сусідніх точках і обмежений двома крайніми точками;

4) середнім кроком місцевих виступів в межах базової довжини:

$$S = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} S_i, \quad (2.7)$$

де n_2 – число виступів по вершинах в межах базової довжини L ;

S_i – крок довільної мікронерівності;

5) максимальною висотою мікронерівності R_{max} , якою є відстань між лініями западин 1 та виступів 3;

б) радіусом заокруглення вершин мікронерівностей R , який можна визначити за залежністю, аналогічною (2.1).

Для деяких видів механічної обробки технологічну шорсткість можна розрахувати за формулою [1]:

$$R_z = H_p + \Delta H, \quad (2.8)$$

де H_p – розрахункова висота мікронерівностей яка визначається з урахуванням геометрії інструмента та режимів обробки;

ΔH – відхилення від розрахункової висоти мікронерівностей.

Для токарного оброблення розрахункову висоту мікронерівностей можна визначити за залежністю [1]

$$H_p = S_n^2 / (8r_{pz}), \quad (2.9)$$

де S_n – подача, мм;

r_{pz} – радіус заокруглення різця біля його вершини, мм.

Додаткове відхилення під час точіння деталі [1]

$$\Delta H = \Delta H_y + \Delta H_{nl} + \Delta H_z + \Delta H_{mp} + \Delta H_{iz} + \Delta H_e, \quad (2.10)$$

де відхилення обумовлені: ΔH_y – відновленням матеріалу після зрізання; ΔH_{nl} – пластичною деформацією в зоні утворення стружки; ΔH_z – зрізанням вершин мікронерівностей стружкою, що сходить; ΔH_{mp} – тертям задньої поверхні різця по обробленій поверхні деталі; ΔH_{iz} – зміненням початкового контуру ріжучої кромки різця внаслідок її зношування; ΔH_e – вібраціями різця та оброблюваної деталі.

Аналітичне визначення R_z менш трудомістке ніж R_a , але для розрахунку R_z необхідні дані про багато факторів (див. залежність 2.10), тому на робочих креслениках деталей рекомендується проставляти шорсткість в R_a , оскільки існуючі профілометри проградуєвані в цих величинах.

Субмікрошорсткість поверхні деталі – це більш мілкі відхилення, які є на поверхнях мікронерівностей. Цей вид мікровідхилень обумовлений внутрішніми дефектами матеріалу деталі (вакансіями та дислокаціями), нерівномірністю деформування окремих кристалів, мікротріщинами, що виникають під час деформування кристалів, нерівномірним зростанням хемосорбційних плівок тощо. Розміри субмікрошорсткості на два – три порядки менші розмірів мікронерівностей, через що субмікрошорсткість на геометричні характеристики поверхні суттєво не впливає.

Важливою характеристикою ПШ є розподіл матеріалу в шорсткому шарі твердого тіла. Цей розподіл можна задати опорною кривою профілю поверхні

тіла. Ця крива дозволяє оцінити розподіл вершин мікронерівностей ПШ по висоті. Будується опорна крива t_p таким чином. Вибирається профілограма поверхні з деякою базовою довжиною L (рисунок 2.7), причому профілограму рекомендується знімати під кутом 45° до напрямку руху інструмента під час оброблення поверхні [17]. З метою отримання достовірних результатів потрібно знімати з різних ділянок поверхні не менше п'яти профілограм [1, 7]. На профілі поверхні проводиться середня лінія, лінія виступів і лінія западин.

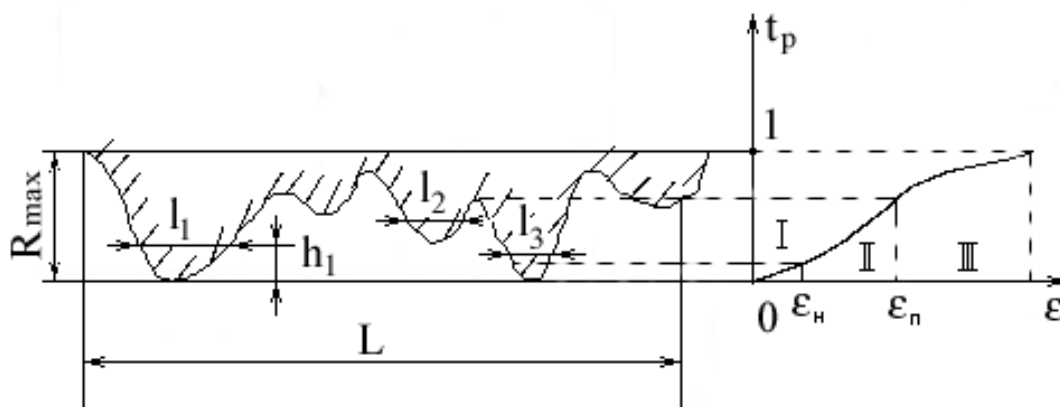


Рисунок 2.7 – Опорна крива профілю поверхні

Паралельно середній лінії проводиться довільне число перетинів профілю. Під час побудови кривої $t_p=f(\epsilon)$ по осі абсцис відкладаються відношення відстані розглядуваного перетину від вершин найвищого виступу h до максимальної висоти мікронерівностей R_{max} ($\epsilon_i = h/R_{max}$), а по осі ординат – відношення сумарної довжини перетинів мікронерівностей $l_1, l_2, l_3, \dots, l_i$ до базової довжини L , тобто $t_p = \sum_{i=1}^n l_i / L$.

На кривій $t_p=f(\epsilon)$ можна виділити три ділянки: I – тут $0 < \epsilon = h/R_{max} \leq \epsilon_n$; II – $\epsilon_n \leq \epsilon \leq \epsilon_n$; III – $\epsilon_n \leq \epsilon \leq 1$.

На першій ділянці за збільшення h сумарна довжина перетинів мікронерівностей $\sum l_i$ зростає не тільки за рахунок збільшення окремих значень l_i , але й за рахунок потрапляння в перетин нових мікронерівностей. Функцію $t_p = f(\epsilon)$ на ділянці можна описати рівнянням [10, 17]

$$t_p = b \cdot \epsilon^\nu, \quad (2.11)$$

де b та ν – параметри, які залежать від виду оброблення. Ділянку I часто називають **початковою ділянкою опорної кривої** (support curve) [1] профілю поверхні. На цій ділянці $\nu = 1,7 \dots 3$; $b = 1 \dots 10$ [1]. Як правило, в машинобудуванні приймають $b = 2$ і $\nu = 2$.

Параметри b і ν можна розрахувати за формулами [8, 12]:

$$\nu = 0,2 (R_{max} / R_{ck})^{3/2}; \quad (2.12)$$

$$b = 0,5 (1 - k_p)^{-\nu}, \quad (2.13)$$

де R_{ck} – величина, що визначає середнє положення лінії виступів профілю для розглядуваного числа оброблених ділянок профілограм;

k_p – коефіцієнт заповнення профілю поверхні.

Інші методики визначення ν та b наведено в [18].

Закономірність (2.11) зберігається до тих пір, поки перетин не пройде через вершину найнижчого виступу. У цьому випадку досягається зближення ε_n , яке можна розрахувати за формулою [1]

$$\varepsilon_n = (b\nu)^{-1/(\nu-1)}. \quad (2.14)$$

За нового зростання h величина $\sum_{i=1}^n l_i$ збільшується тільки за рахунок зростання l_i , оскільки всі мікронерівності знаходяться в перетині, який відповідає ділянці II опорної кривої. На ділянці II опорна крива описується рівнянням [10]:

$$t_p = b \cdot \varepsilon_n^\nu \cdot (\nu \cdot \varepsilon / \varepsilon_n + 1 - \nu). \quad (2.15)$$

Це рівняння виконується до моменту переходу перетину через найглибшу западину, якій відповідає $\varepsilon = \varepsilon_n$. На ділянці III функція t_p буде зростати пропорційно ε^m , де $m < 1$ деякий коефіцієнт [18].

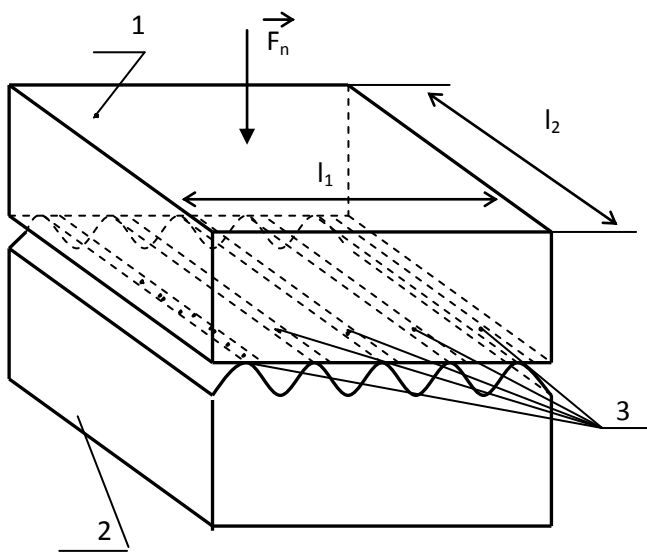


Рисунок 2.8 – Схема контактування двох твердих тіл з номінально плоскими поверхнями

2.3 Контакт (contact) хвилястих та шорстких тіл. Поняття про три площі контакту

Реальні тверді тіла контактують між собою в окремих зонах, що обумовлюється хвилястістю та шорсткістю їхніх поверхонь. З метою кількісної характеристики процесу контактування твердих тіл введено поняття трьох площ контакту – номінальної A_a (НПК), контурної A_c (КПК) та фактичної A_r

(ФПК) (contact areas: SML; MML; BML). НПК збігається з усією площею контактування поверхні тіла (деталі). Пояснити поняття НПК, КПК та ФПК можна на основі схеми, зображеної на рисунку 2.8. Нехай у тіла 1 номінальна поверхня контакту $A_{a1} = l_1 \cdot l_2$ ідеально рівна і гладенька, а у другого тіла 2 – хвиляста та шорстка. Для тіла 2 НПК дорівнює площі хвилястої поверхні $A_{a2} > l_1 \cdot l_2$. Спочатку контакт тіл 1 та 2 здійснюється на самих найвищих мікронерівностях, розташованих на вершинах хвиль. Під час навантаження тіл нормальною силою F_n елементи хвилястості пружно деформуються що приводить до утворення на них площадок торкання 3, сумарна площа яких є КПК другого тіла A_{c2} .

Якщо контактують деталі з криволінійними поверхнями, то КПК збігається з площинами, які можуть бути розраховані на основі залежностей теорії пружності за допущення про абсолютно гладенькі поверхні.

На КПК діє контурний тиск, який визначається за простою залежністю

$$p_c = F_n / A_c. \quad (2.16)$$

В межах контурних площадок торкання 3 контактування здійснюється за окремими мікронерівностями, кожна з яких утворює елементарну ФПК A_{ri} , розміри якої малі і залежать від конфігурацій мікронерівностей, механічних властивостей матеріалів тіл, контурних тисків і виду деформацій в мікроконтактних зонах. На **елементарній ФПК** урівноважуються міжатомні та міжмолекулярні сили притягування та відштовхування. ФПК тіла є сумою елементарних ФПК, тобто

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_{ri}. \quad (2.17)$$

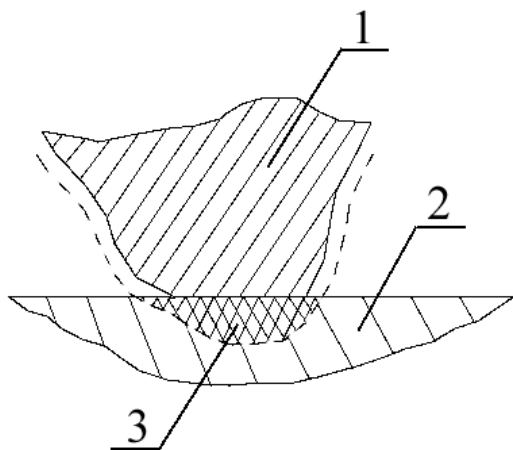


Рисунок 2.9 – Схема взаємодії мікронерівності 1 з жорстким контртілом 2

Під час збільшення ФПК поверхні контактуючих тіл зближуються. Характер взаємодії тіл в зонах ФПК залежить від механічних властивостей матеріалів тіл. В зонах ФПК буде відбуватись зминання мікронерівностей або їх проникнення в поверхню більш м'якого тіла. За зминання мікронерівностей матеріал, що деформується, рівномірно розподіляється по всій поверхні мікронерівностей (рис. 2.9).

Як показують експериментальні дослідження [1, 18] зближення взаємодіючих тіл малі, а значить деформовані об'єми 3 мікронерівностей також є малими. Це дозволяє вважати, що ФПК довільної

мікронерівності практично збігається з площею її перетину. Потрібно відзначити, що процес додавання окремих ФПК в більшості випадків не впливає на співвідношення між ФПК одиничної мікронерівності та її зближення (convergence) [1, 18]. Розмір ФПК залежить від виду контакту двох шорстких поверхонь, який може бути **ненасиченим** (unsaturated) та **насиченим** (saturated).

Ненасичений контакт – це такий контакт твердих тіл, коли число мікронерівностей n_r , що розташовані на ФПК, менше числа мікронерівностей n_c , які є на КПК, тобто $n_r < n_c$, а за **насиченого контакту** $n_r = n_c$. Ненасичений контакт може бути пружним (elastic), якщо деформація мікронерівностей пружна, та пластичним (plastic), коли за значних контурних тисків виникають пластичні деформації мікронерівностей. ФПК за ненасиченого контакту залежно від зближення поверхонь ($\varepsilon \leq \varepsilon_n$) можна оцінити за формулою [1]

$$A_r = \alpha_\tau \cdot A_c \cdot b \cdot \varepsilon^\nu, \quad (2.18)$$

а за насиченого ($\varepsilon > \varepsilon_n$) –

$$A_r = \alpha_\tau \cdot A_c \cdot b \cdot \varepsilon_n^\nu \cdot (\nu \cdot \varepsilon / \varepsilon_n + 1 - \nu) = \alpha_\tau \cdot A_c \cdot t_p, \quad (2.19)$$

де α_τ – коефіцієнт, що враховує напружений стан в зоні контакту та кінематичні особливості взаємодії твердих тіл.

Насичений контакт виникає під час ковзання твердої шорсткої поверхні по рівній поверхні менш жорсткого тіла, яке супроводжується пружним деформуванням матеріалу менш жорсткого тіла через заглиблення жорстких мікронерівностей в менш тверду поверхню контртіла. Ненасичений контакт має місце під час тертя твердих тіл, жорсткість матеріалів яких відрізняється мало.

Проникнення мікронерівностей більш жорсткого тіла в поверхню більш м'якого контртіла (counter body) є найбільш поширеним типом деформації мікронерівностей. За такої деформації ФПК мікронерівності утворюється на її боковій поверхні і її величина залежить від виду деформацій, які виникають в зоні контакту (пластичні, пружні та пружно-пластичні) та від того, чи знаходяться тіла в стані спокою або руху одне відносно одного. Це приводить до того, що ФПК різних мікронерівностей мають неоднакову величину, однак ця різниця величин мала і не перевищує 1...2% [1]. Поняття ФПК та видів контакту твердих тіл широко використовуються для визначення ФПК і зближення між поверхнями контактуючих тіл залежно від величини контурного тиску [1, 18], наприклад, для пружного ненасиченого контакту:

$$1) \text{ контурний тиск} - \quad p_c = \frac{0,4 \cdot E \cdot \Delta^{1/2} \varepsilon^{5/4}}{1 - \mu_n^2}; \quad (2.20)$$

$$2) \text{ ФПК - } A_r \approx \frac{2,1A_c}{\Delta^{2/5}} \left[\frac{p_c(1-\mu_n^2)}{E} \right]^{4/5}; \quad (2.21)$$

3) зближення поверхонь контактуючих тіл –

$$h = R \left[\frac{5p_c(1-\mu^2)\Delta^\nu}{\nu(\nu-1)k_l E} \right]^{\frac{2}{2\nu+1}}, \quad (2.22)$$

де $\Delta = R_{max}/(Rb^{-\nu})$ – комплексний параметр (введений Е. П. Непомнящим) шорсткості поверхні;

R – радіус вершин мікронерівностей (сферична модель);

$k_l = f(\nu)$ – стала інтегрування під час визначення числа мікронерівностей n_r на ФПК;

E, μ_n – відповідно модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу.

Для пластичного ненасиченого контакту ФПК та відносне зближення ε поверхонь можна оцінити за формулами [10, 17, 18]:

$$A_r = F_n / H_{HB}; \quad (2.23)$$

$$\varepsilon \approx (p_c / H_{HB})^{0,5}, \quad (2.24)$$

де H_{HB} – твердість матеріалу тіла за Брінеллем, МПа;

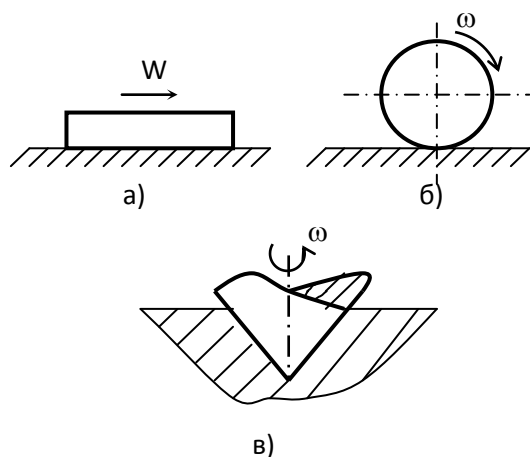
F_n – нормальне навантаження контакту, Н;

A_r в мм²;

p_c – контурний тиск, МПа.

3 ОСНОВНІ ЗАКОНИ ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ

Зовнішнє тертя – це процес дисипації енергії, що протікає під час відносно-го тангенціального переміщення твердих тіл в зоні їх реального контакту, який утворився під дією зовнішнього навантаження. Залежно від виду переміщення зовнішнє тертя ділять на тертя ковзання, вертіння (spinning friction) та кочення [18] (рисунок 3.1, а, б, в). В деяких працях, наприклад [1], тертя ковзання та вертіння об'єднують в один вид – тертя ковзання. Взаємодія під час зовнішнього тертя в загальному випадку здійснюється між різними за будовою твердими тілами і має подвійну атомно-молекулярну та механічну природу [26]. Під час тертя ковзання відносна швидкість всіх точок взаємодіючих тіл однакова, а в зонах фактичного контакту вона змінюється стрибком. На відміну від тертя ковзання під час тертя кочення завжди можна вказати на точку в зоні контакту швидкість ковзання в якій дорівнює нулю.



w - лінійна швидкість тіла;

ω - кутова швидкість тіла, що котиться або обертається.

Рисунок 3.1 – Види зовнішнього тертя

Під час зовнішнього тертя ковзання взаємодія твердих тіл обумовлюється процесами, які відбуваються в тонких (товщина $h \leq 10...20$ мкм) ПШ цих тіл. Це тертя може відбуватись за відсутності мастильного матеріалу (сухе тертя (dry friction) або за такої його кількості в зоні контакту, яка виключає виникнення гідродинамічних ефектів (граничне тертя (boundary friction)). Під час зовнішнього тертя тонкі ПШ взаємодіючих тіл завжди деформуються без порушення їх суцільності, а деформацією шарів матеріалу тіл, що лежать нижче їх ПШ можна знехтувати. Умови, які потрібні для реалізації сухого чи граничного тертя ковзання, виконуються за зближення поверхонь тіл тертя на величину [10,18]

$$h = 0,5 R (1 - 6\tau_n / H_{HB}) \quad (3.1)$$

та величини контурного тиску –

$$p_c \leq \frac{H_{HB}}{2^{v+1} \cdot \Delta^v} (1 - 6\tau_n / H_{HB})^v \approx \frac{0,125}{\Delta^2} \cdot H_{HB} \cdot (1 - 6\tau_n / H_{HB})^2, \quad (3.2)$$

де τ_n – дотичне напруження в зонах фактичного торкання твердих тіл;

R – радіус кривизни мікронерівності, який є середнім геометричним радіусів кривизни вершини мікронерівності вздовж $R_{\text{взд}}$ і поперек $R_{\text{поп}}$ напрямку оброблення поверхні деталі та залежить від виду оброблення. Зазвичай ці радіуси визначають за допомогою профілограм.

Наближене значення p_c знайдено за $v = 2$.

За значної товщини мастильного матеріалу між контактуючими тілами процес тертя переноситься в шар рідини і зовнішнє тертя замінюється внутрішнім тертям. Це тертя характеризує взаємодію тіл, яка проходить в об'ємі **одного об'єкта** (твердого тіла, рідини або газу) та здійснюється по всій поверхні виділеного шару. Швидкість, з якою рухаються шари мастила (газу, твердого тіла), змінюється безперервно з достатньою плавністю. Подібність між зовнішнім і внутрішнім тертям тільки та, що ці обидва види тертя є дисипативними процесами розсіювання енергії.

Для кількісного оцінення тертя введено поняття сили тертя F_f , яка є рівнодійною елементарних сил тертя (сил тангенціальних опорів), що виникають в

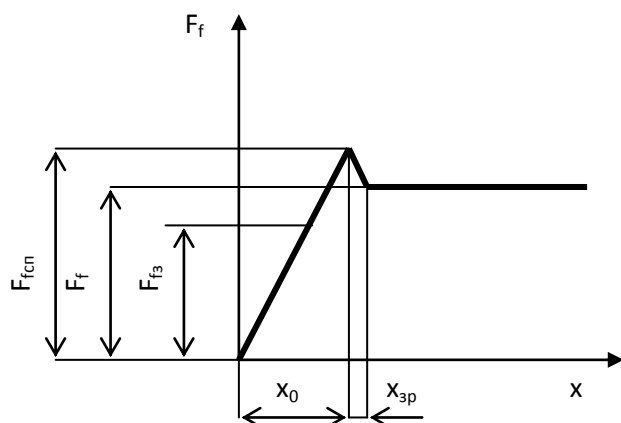


Рисунок 3.2 – Залежність сили тертя від величини зміщення

зонах фактичних контактів окремих мікронерівностей. Тертя вертіння характеризується моментом сил тертя M_f .

Сила тертя відноситься до непотенціальних (неконсервативних) сил. Розрізняють сили тертя спокою F_{fcn} , неповну силу тертя F_{f3} , яку краще називати силою зчеплення [18], оскільки ця сила має частково потенціальний характер, і силу тертя ковзання F_f (рисунок 3.2). Залежність, показана на рисунку 3.2, встановлена експериментально. Згідно з цією

залежністю сила тертя під час зміщення одного тіла відносно іншого на величину x_0 , яка називається попереднім зміщенням, зростає до величини F_{fcn} , а потім на маленькому зміщенні $x_{зр}$ (зрив) зменшується до величини F_f , яка від переміщення не залежить.

В інженерній практиці тертя оцінюється коефіцієнтом тертя f (coefficient of friction), поняття якого вперше (1508 р.) ввів Леонардо да Вінчі, а Амонтон в 1699 році запропонував формулу

$$f = F_f / F_n . \quad (3.3)$$

В 1778 році французький фізик Шарль-Огюст Кулон запропонував двочленну формулу:

$$f = k + A / F_n , \quad (3.4)$$

де k – коефіцієнт, що характеризує властивості взаємодіючих поверхонь тертя, який в деяких працях називають коефіцієнтом тертя руху [19];

A – характеристика зчепності двох тіл, яка не залежить від зовнішнього навантаження F_n .

Кулоном вперше були сформульовані такі закони зовнішнього тертя:

1) сила тертя ковзання пропорційна силі нормального тиску;

- 2) коефіцієнт тертя залежить від матеріалу та стану поверхонь тіл, що взаємодіють;
- 3) величина коефіцієнта тертя не залежить від площі опорних поверхонь;
- 4) сила тертя спокою більша за силу тертя руху;
- 5) коефіцієнт тертя зростає зі збільшенням часу попереднього контакту тіл;
- 6) за малих величин відносної швидкості тіл сила тертя від швидкості не залежить;
- 7) під час збільшенні швидкості прикладання рушійної сили сила тертя зростає.

Геніальна догадка Кулона про подвійну природу тертя була науково обґрунтована в 30-х роках двадцятого століття в працях Ф. Боудена (Англія) та І. В. Крагельського (СРСР), які практично одночасно запропонували адгезійно-деформаційну та молекулярно-механічну теорії зовнішнього тертя, відповідно.

Молекулярно-механічна теорія тертя І. В. Крагельського є більш загальною, оскільки пояснює зовнішнє тертя твердих тіл в більш широкому діапазоні умов роботи рухомих спряжень. Адгезійно-деформаційна теорія Ф. Боудена по суті є окремим випадком молекулярно-механічної за $\tau_n = \sigma_m/2$ (де σ_m – напруження межі текучості матеріалу контактуючих тіл).

Згідно з положенням молекулярно-механічної теорії зовнішнього тертя стисло механізм виникнення сили тертя можна пояснити так. Нехай одне з контактуючих тіл має шорстку поверхню і абсолютну жорсткість ($E = \infty$), а контртіло – менш тверде та гладеньке. Під навантаженням цієї пари тіл довільна мікротвердість першого тіла проникає в контртіло на глибину h_i . За відносного ковзання тіл жорстка мікронерівність буде деформувати ПШ менш жорсткого тіла. Внаслідок цього виникне сила **опору деформуванню**. Під дією зовнішнього навантаження поверхні тіл також зближуються на відстані, за яких виникає міжатомна та молекулярна взаємодія, яка приводить до утворення водневого та координаційного зв'язку, а також можлива макроскопічна електрична взаємодія, обумовлена реологічними властивостями матеріалу тіл. Ці взаємодії створюють опір відносному ковзанню, який називається **молекулярною складовою сил тертя** (molecular component of friction) F_{fm} . Сила опору деформуванню матеріалу ПШ називається **деформаційною складовою сили тертя** (deformation component of friction) F_{fd} . Сили F_{fm} та F_{fd} взаємопов'язані і впливають одна на одну, але в більшості випадків [1, 18] цим взаємовпливом можна знехтувати, тоді силу тертя F_{fi} , яка виникає під час ковзання окремої мікронерівності можна подати як суму F_{fmi} та F_{fdi} [1,18]:

$$F_{fi} = F_{fmi} + F_{fdi}. \quad (3.5)$$

Молекулярну складову сили тертя окремої мікронерівності можна оцінити за залежністю [1, 18]

$$F_{fmi} = \tau_n \cdot A_{ri}. \quad (3.6)$$

Поверхні реальних контактуючих тіл розділені шарами сорбційних плівок, сукупність яких за термінологією І. В. Крагельського називається «третьім тілом». Під час ковзання одного із тіл пари тертя в «третьому тілі» виникає течія та внаслідок в'язкості цього тіла з'являється дотичне напруження τ_n , яке можна визначити за законом Ньютона:

$$\tau_n = \mu_n dw/dz, \quad (3.7)$$

де μ_n – коефіцієнт динамічної в'язкості «третього тіла»;
 dw/dz – градієнт швидкості w по товщині z «третього тіла».

В'язкість третього тіла є функцією багатьох фізичних чинників (температури, енергії активації в'язкої течії рідини тощо), визначається шляхом складних математичних розрахунків [1, 18], які детально розглядаються в спеціальних курсах з трибології.

Деформаційну складову елементарної сили тертя для умов пластичного ненасиченого контакту можна визначити за формулою [1]

$$F_{f\partial i} = 1,68 H_{HB} R^{1/2} h_i^{3/2}, \quad (3.8)$$

а у випадку пружного деформування ПШ [1]

$$F_{f\partial i} = 0,25 \cdot \alpha_{ef} \cdot E h_i^2 / (1 - \mu_n^2), \quad (3.9)$$

де H_{HB} – твердість матеріалу контртіла;

E – модуль пружності матеріалу контртіла;

α_{ef} – ефективний коефіцієнт гістерезисних втрат, який є функцією напруженого стану в зоні контакту мікронерівності.

Повну силу тертя знаходять інтегруванням (3.5) за всією ФПК із урахуванням виду контакту тіл (насичений чи ненасичений). Коефіцієнт тертя ковзання реальних тіл в загальному випадку визначається як сума:

$$f = f_\partial + f_m, \quad (3.10)$$

де f_∂, f_m – деформаційна та молекулярна складові коефіцієнта тертя.

Детальні теоретичні та експериментальні дослідження з обґрунтування та розрахунку коефіцієнтів тертя ковзання за формулами зі структурою типу (3.10) та особливостями залежно від виду контакту та умов контактування, наведено в роботах [1, 2, 10, 18]. Ці формули мають вигляд складних багаточленних математичних залежностей, що містять багато структурних елементів.

Наприклад, найпростішу структуру має формула для розрахунку коефіцієнта тертя пружного контакту жорстких припрацьованих деталей за $v = 2$ та $p_r = 1,45 \cdot (\tau_0 / (\Theta \cdot \alpha_{ef}))^{0,5}$ – фактичний тиск (тиск на ФПК):

$$f = (\tau_0 \cdot \Theta \cdot \alpha_{ef})^{0,5} + \beta, \quad (3.10, a)$$

де τ_0 – зсувне дотичне напруження;

$\Theta = (1 - \mu_n^2)/E$ – пружна стала матеріалу контактуючих тіл;

β – п'єзокоефіцієнт молекулярної складової тертя (коефіцієнт зміцнення молекулярного зв'язку).

Складова f_m суттєво залежить від фізико-хімічного стану поверхні тертя, а f_d від цього не залежить. Для матеріалів, що мають високий модуль пружності, в умовах сухого та межового тертя складовою f_d можна знехтувати порівняно з f_m , чим широко користуються в більшості технічних розрахунків, визначаючи силу тертя за залежністю Амонтона $F_f = f \cdot F_n$.

3.1 Кут та конус тертя. Круг тертя

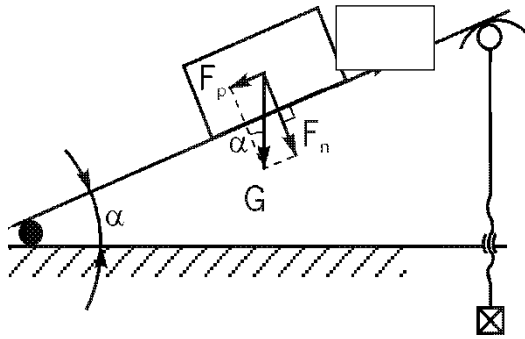


Рисунок 3.3 – Схема визначення кута тертя

Розглянемо стан спокою і руху тіла вагою G , розташованого на похилій площині, кут нахилу α якої до горизонту можна міняти (рисунок 3.3). За повного значення кута α , тіло утримується на площині в стані спокою за рахунок сили тертя F_f між площиною та тілом за умови $F_f > F_p$, де $F_p = G \cdot \sin \alpha$ – складова ваги тіла G , яку можна розкласти на дві сили F_p та $F_n = G \cdot \cos \alpha$ – нормальну до похилої площини. Під час

збільшення кута α до величини $\alpha_{кр}$ тіло почне ковзати по площині за умови рівності сил $F_f = f \cdot F_n$ та F_p , де f – коефіцієнт тертя між тілом і площиною:

$$G \sin \alpha_{кр} = G \cos \alpha_{кр} f, \quad (3.11)$$

звідки

$$f = \operatorname{tg} \alpha_{кр} = \operatorname{tg} \rho, \quad (3.12)$$

де $\rho = \operatorname{arctg} f$ називається **кутом тертя** (friction angle).

За $\alpha < \rho$ тіло на похилій площині залишається в спокої.

Поняття кута тертя можна також визначити з аналізу руху тіла по горизонтальній площині під дією на нього сили F , направленої під кутом α до нормалі $n - n$ (рисунок 3.4).

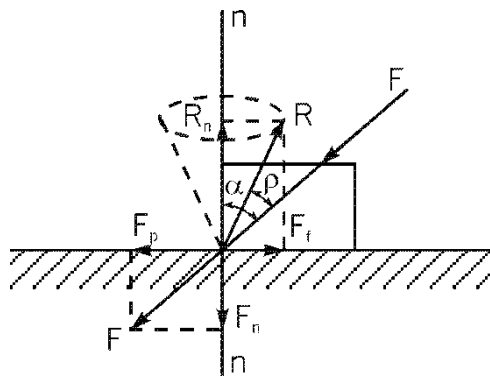


Рисунок 3.4

Перенесемо силу по лінії дії на горизонтальну площину та розкладемо на складові F_p та F_n . Реакцію площини R також розкладемо на складові R_n та F_f , де $R_n = F_n$ оскільки тіло по вертикалі не рухається, а F_f – сила тертя, що перешкоджає рухові тіла під дією складової $F_p = F_n \cdot \operatorname{tg} \alpha$. Внаслідок тертя між площиною та тілом, реакція R буде відхилена від нормалі $n - n$ на кут тертя ρ . Якщо $\alpha < \rho$ то, рух тіла неможливий, оскільки $F_p = F_n \cdot \operatorname{tg} \alpha = F_f$ за будь-якої величини сили $F = F_n / \cos \alpha$. Якщо тіло рухати за $\alpha = \rho$ в усіх напрямках, то реакція R опише лінійну конічну поверхню, яка називається **конусом тертя** (friction cone). У випадку знаходження вектора зовнішньої сили, що проходить через вершину цього конуса, всередині конуса тертя тіло знаходиться в стані спокою.

Під час обертального руху тіла, наприклад, вала в підшипнику ковзання, рухові тіл протидіє момент сили тертя (рисунок 3.5). Під час обертання вала момент інерції $M = I_b \cdot \varepsilon$ притисне вал до поверхні підшипника в т. A (де I_b – момент інерції маси вала, ε – кутове прискорення). Повна реакція R_f відхилиться від центра вала на кут тертя ρ . Цю силу R_f розкладемо на нормальну F_n , яка врівноважується повним навантаженням вала і силу тертя $F_f = f \cdot F_n$, що протидіє рушійному моменту M (тут f' – коефіцієнт тертя в обертальній парі тіл). Момент тертя можна визначити за залежністю

$$M_f = F_f r_m = f' \cdot F_n \cdot r_m = R_f \sin \rho \cdot r_m = R_f r_f, \quad (3.13)$$

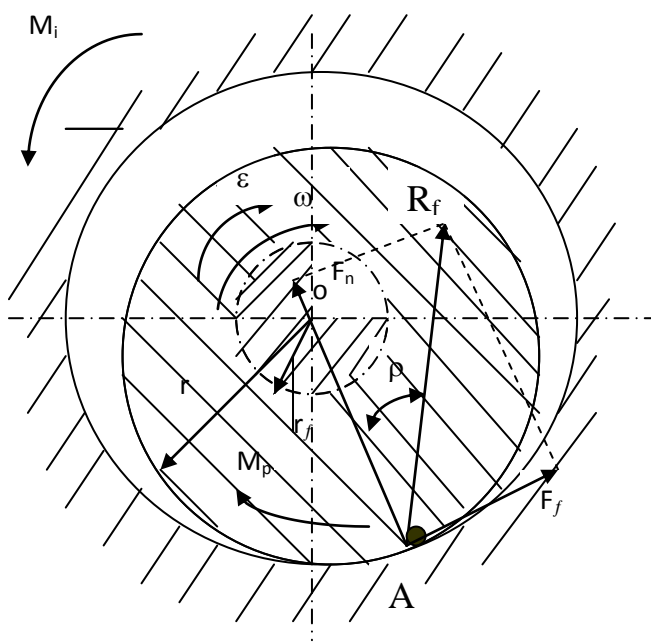


Рисунок 3.5 – Схема для визначення круга тертя

де $F_f = R \cdot \sin \rho$; $r_f = r_m \cdot \sin \rho$. За малих значень кута тертя $\rho \sin \rho \approx \operatorname{tg} \rho$ та $f \approx f'$, матимемо $r_f = r_m \cdot f'$ – радіус (friction radius) круга тертя (friction ring) (тут f – коефіцієнт тертя плоских поверхонь; r_m – радіус тіла (вала) в обертальній парі).

Якщо кут тертя має значну величину, то для непритертих підшипників і валів $f' = 0,5 \cdot \pi \cdot f$, а для притертих – $f' = (4/\pi) \cdot f$ [19].

3.2 Тертя кочення. Основні поняття та означення

Під час кочення, наприклад абсолютно твердого колеса радіуса r по нерухомій основі, матеріал якої має скінченний модуль пружності, контакт між колесом та основою здійснюється не по лінії миттєвої

осі обертання OO_1 (рисунок 3.6), а по деякій поверхні, що утворюється під час деформації основи. Реакція основи F_R під час навантаження колеса силою F_n зміщується відносно лінії OO_1 на величину k . Щоб заставити колесо крутитись,

достатньо на нього подіяти силою F_p , момент якої відносно точки O_1 чисельно дорівнює моменту опору кочення:

$$F_p \cdot r = k \cdot F_R, \quad (3.14)$$

звідки

$$k = (F_p \cdot r) / F_R = (F_p \cdot r) / F_n, \quad (3.15)$$

де k – коефіцієнт тертя кочення, який є розмірною величиною, м; $F_R = F_n$. Коефіцієнт тертя кочення ще називають коефіцієнтом тертя другого роду. Поряд з коефіцієнтом тертя кочення використовується безрозмірна характеристика f_k – коефіцієнт опору коченню. Цей коефіцієнт чисельно дорівнює відношенню роботи A_φ рушійної сили F_p на одиничному шляху до нормального навантаження F_n колеса [18].

$$f_k = A_\varphi / (F_n \cdot \Delta l) = (F_p \cdot r \cdot \Delta \varphi) / (F_n \cdot r \cdot \Delta \varphi) = k / r, \quad (3.16)$$

де $\Delta l = r \Delta \varphi$ – шлях, який проходить колесо під час повороту на кут $\Delta \varphi$.

Коефіцієнт тертя кочення залежить від матеріалів тіл, що беруть участь в процесі тертя кочення, та стану поверхонь цих тіл.

Приблизно можна вважати, що коефіцієнт тертя кочення не залежить від кутової швидкості тіла, що котиться, та швидкості його ковзання відносно іншого тіла [20].

Кочення може бути чистим, коли точка O_1 (рисунок 3.6) не ковзає по нерухомій площині, та кочення з ковзанням, коли поряд з обертанням колеса точка O_1 ковзає по площині. Ці режими руху колеса залежать від співвідношення між силами F_n та F_p та коефіцієнтами f_k і f , де f – коефіцієнт тертя ковзання:

- $F_n > F_p \geq f_k \cdot F_n$ – чисте кочення;
- $F_p \geq f \cdot F_n$ – кочення з ковзанням;
- $F_p > f \cdot F_n$ – чисте ковзання.

Зазвичай $f_k \ll f$, це означає, що для початку кочення $F_p = f_k \cdot F_n$ потрібна значно менша рушійна сила F_p , ніж для початку його ковзання.

Якщо ж сила F_p зростатиме, то до кочення за $F_p = f \cdot F_n$ ще додасться ковзання.

Вивченню природи тертя кочення присвячені праці багатьох учених: Ш. Кулона, Ж. Дюпюї, О. Рейнольдса, А. Ю. Ішлінського та інш. З деякими результатами досліджень цих та інших учених можна ознайомитись у праці [18].

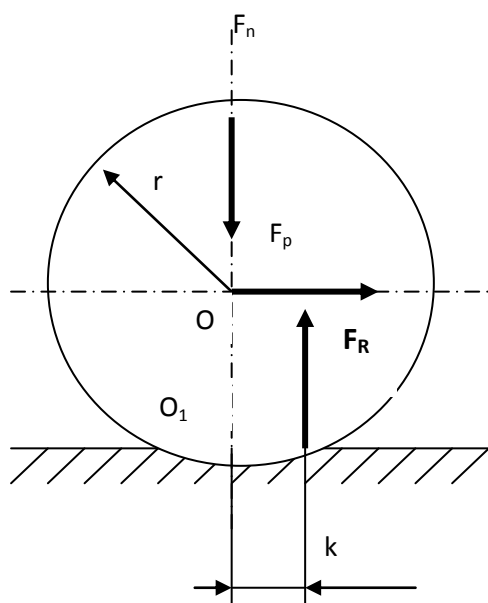


Рисунок 3.6 – Розрахункова схема процесу тертя кочення

3.3 Тертя під час удару. Фрикційна взаємодія під час удару

Під час ударної взаємодії двох тіл будь-якої форми має місце наявність кутових і поступальних швидкостей обох тіл відносно трьох координатних осей прямокутної системи координат (система координат Декарта). Фрикційна взаємодія (frictional interaction) тіл під час удару може відбуватись в різних видах [18], що за відповідних співвідношень кутових і поступальних швидкостей взаємодіючих тіл, які визначають результуючий вектор тангенціальної швидкості на площадці дотику тіл, що не дорівнює нулю, можна отримати зчеплення тіл або тертя ковзання між ними.

Результат описаної взаємодії між тілами залежить від величини відносного переміщення тіл, що ударно взаємодіють. Це відносне переміщення тіл визначається тангенціальною швидкістю удару, часом ударної взаємодії та силою тертя між тілами. Якщо величина відносного переміщення тіл, що ударно взаємодіють, не перевищує величину межового зміщення ($x_0 + x_{zp}$, див. рис. 3.2), то удар починається та закінчується в області попереднього зміщення x_0 , і за зростання тангенціальної швидкості тіл виникає ковзання [18].

Питаннями процесів тертя, що виникають під час удару тіл, займались Г. Коріоліс (в 1835 р. опублікував теорію більярдної гри) і Є. Раус (1897 р.), який встановив взаємозв'язок тангенціального та нормального імпульсів (impulse) під час удару для двох випадків: 1) коли ковзання тіл (чи одного тіла) закінчується під час дії нормального імпульсу удару (impact impulse); 2) ковзання продовжується до моменту закінчення удару. Кут тертя ρ Є. Раусом визначався за формулою

$$\rho = \arctg f = \arctg \left(\int_0^t F_t dt \right) / \left(\int_0^t F_n dt \right), \quad (3.17)$$

де F_t, F_n – тангенціальна та нормальна сили під час удару;

t – час ударної взаємодії тіл.

Дослідженнями Коріоліса та Рауса встановлено: за наявності ковзання протягом всього періоду ударної взаємодії тіл відношення тангенціального та нормального імпульсів під час удару для цієї пари тіл є **постійною величиною**; якщо ковзання зупиняється до закінчення удару, то за збереження постійності нормального імпульсу переданий тангенціальний імпульс залежить тільки від тангенціальної швидкості ударної взаємодії тіл.

В теорії удару [34] використовується коефіцієнт відновлення нормального імпульсу, за аналогією з яким З. Хорак в 1931р. введено коефіцієнт відновлення тангенціального імпульсу, який характеризує пружне відновлення в тангенціальному напрямку тіла, що деформується.

Теоретичні та експериментальні дослідження коефіцієнтів відновлення нормального та тангенціального імпульсів виявили їх залежність від параметрів удару: коефіцієнт відновлення нормального імпульсу зростає зі збільшенням тангенціальної швидкості ударної взаємодії тіл; коефіцієнт тертя під час удару

в області ковзання **не постійний**, причому може залежно від тангенціальної швидкості удару монотонно зменшуватись, для деяких матеріалів проходити через максимум і в той самий час в області надвисоких швидкостей ковзання (50 – 800 м/с) [35] спостерігався мінімум коефіцієнта тертя.

Відновлення тангенціального імпульсу обумовлено пружною частиною попереднього зміщення і мало впливає на процес ковзання, спричиняючи лише незначну зміну швидкості ковзання [18], оскільки на початку удару вектор швидкості контактної деформації збігається за напрямом з вектором тангенціальної швидкості, що викликає зменшення швидкості ковзання. На стадії відскоку ударно взаємодіючих тіл вектор тангенціальної швидкості змінює свій напрям на протилежний, що спричиняє зростання **відносної** тангенціальної швидкості в контакті тіл, причому сама тангенціальна швидкість в процесі ударної взаємодії тіл є змінною величиною, оскільки кінетична енергія взаємодіючих тіл витрачається на роботу проти сил тертя.

Якщо ударна взаємодія тіл супроводжується обертанням хоча б одного з тіл, то може бути зчеплення тіл або їх ковзання з перекочуванням. За деяких умов може мати місце чисте кочення ударно взаємодіючих тіл.

Потрібно зауважити, що варіантів ударної взаємодії тіл може бути дуже багато, а розглянуті нами стадії фрикційної взаємодії тіл під час удару не залежать від виду їх контакту. Розглянемо найбільш типові варіанти ударної взаємодії тіл, звівши їх до плоскої задачі: 1) швидкість руху змінюється тільки в одного з ударно взаємодіючих тіл; 2) закономірності тертя під час ударної взаємодії тіл для випадків центрального прямого та косого ударів.

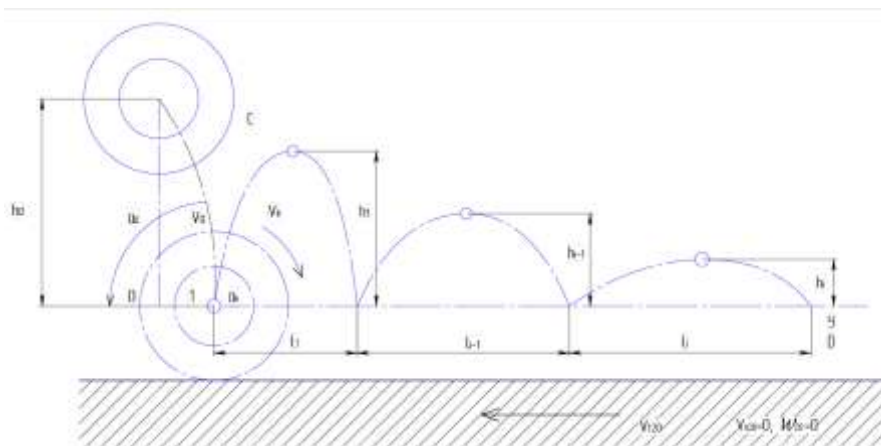


Рисунок 3.7 – Схема ударної взаємодії тіл для варіанта плоскої задачі

Схема ударної взаємодії тіл, що відповідає відміченим вище типовим варіантам, проказана на рисунку 3.7. Тіло C , наприклад у формі плоского колеса, падає на поверхню плоского тіла D , розташованого горизонтально, з висоти h_0 . Маса тіла D $m_D \gg m_C$ (тут m_C – маса тіла C). Тіло C , відносно нерухомої системи плоских координат XOY , рухається з тангенціальною v_{t10} та нормальною v_{n10} швидкостями і обертається навколо осі, перпендикулярної площині XOY , з кутовою швидкістю ω_{10} . Тіло D рухається в напрямку, показаному на рис. 3.7,

тільки з тангенціальною швидкістю v_{t20} . Вектори тангенціальних швидкостей тіл C і D розташовані в площині XOY . В цій самій площині розташовані центри ваги C і D , що обумовлює таке ж розташування векторів швидкостей тіл C і D до та після їх ударної взаємодії.

Оскільки $m_D \gg m_C$, то після удару тангенціальна (поступальна) швидкість тіла D не зміниться, тобто $v_{t20} = v_{t21}$, а діючі на тіла в момент їх ударної взаємодії тангенціальний і нормальний імпульси приведуть тільки до зміни швидкостей руху тіла C , що обумовить його відскік від тіла D в площині XOY під кутом до горизонту в бік результуючого вектора тангенціальної швидкості v_t , яку можна визначити за простою формулою теоретичної механіки

$$v_t = \omega_{10} \cdot R - v_{t10} - v_{t20}, \quad (3.18)$$

де R – радіус тіла (колеса) C .

Тангенціальний імпульс під час описаної ударної взаємодії виникає внаслідок наявності сил тертя.

Якщо після закінчення ударної взаємодії тіл C і D $v_t = 0$ за $\omega_{10} \neq 0$, то з (3.18) отримуємо потрібну кутову швидкість тіла C

$$\omega_{10} = (v_{t10} + v_{t20})/R, \quad (3.19)$$

за якої буде реалізовано **не тертя ковзання, а тертя кочення** як результат ударної взаємодії тіл C і D .

Після першого співударяння (див. рис. 3.7) за швидкості v_{t10} , що забезпечує ковзання та політ тіла C по параболічній траєкторії, тіло C знову зіткнеться з поверхнею тіла D , але вже з тангенціальною v_{t11} та кутовою ω_{11} швидкостями відносно тіла D . Тіло C знову відскочить під кутом під до горизонту і цей процес послідовних співударянь тіла C з поверхнею тіла D буде здійснюватись до моменту повного затухання нормальної швидкості удару або втрати стійкості руху, причому з кожним наступним ударом відносна тангенціальна швидкість тіла C в зоні контактування буде спадати.

Внаслідок такої взаємодії тіл C і D ударний процес переходить від ковзання із швидкістю, що зменшується від удару до удару, до попереднього зміщення за послідовного зменшення його величини до кочення із швидкістю, що затухає.

Згідно з формулою (3.17) середнє значення коефіцієнтів тертя ковзання та зчеплення можна знайти за залежністю через відношення тангенціального та нормального імпульсів під час удару

$$f_m = (\int_0^t F_t dt) / (\int_0^t F_n dt) = (\int_0^t F_f dt) / (\int_0^t F_n dt), \quad (3.20)$$

де $F_t = F_f$; F_f – сила тертя ковзання. Тангенціальний та нормальний імпульси під час удару пов'язані зі зміною кількості руху тіла C під час його співударяння з тілом D :

$$m_C \cdot \Delta v_{tC} = \int_0^t F_f dt; \quad m_C \cdot \Delta v_{nC} = \int_0^t F_n dt, \quad (3.21)$$

де Δv_{tC} , Δv_{nC} – відповідно змінення тангенціальної та нормальної швидкостей тіла C . Враховуючи (3.21) в (3.20), отримаємо:

$$f_m = \Delta v_{tC} / \Delta v_{nC}. \quad (3.22)$$

У випадку **центрального прямого удару тіла C по тілу D** ($v_{t20} = 0$, $v_{t10} = 0$ та $\omega_{10} = 0$) сили тертя, які виникають внаслідок деформування площадок контакту, симетричні відносно центра прикладання навантаження і в сумі дорівнюють нулю, а, зазвичай, робота, яка витрачається на тертя, набагато менша роботи пружного та пластичного деформування.

У цьому випадку відбувається проникнення жорсткої сфери (циліндра) у півпростір, що деформується, з максимальною нормальною силою F_n (силою тиску), яка створює відбиток площею A_r (ФПК).

ФПК можна визначити за простою формулою

$$A_r = F_n / H_{HB}, \quad (3.23)$$

де H_{HB} – твердість тіла C за Брінеллем, МПа.

З метою спрощення викладок, ударну взаємодію тіл C і D для випадку **косо-го удару** розглянемо за таких припущень: $v_{t20} = 0$; $\omega_{10} = 0$ або $v_{t10} = 0$ (схема «нерухомої доріжки»); $v_{t20} \neq 0$; $\omega_{10} = 0$ та $v_{t10} = 0$ (схема «біжучої доріжки»).

Для випадку «нерухомої доріжки» за $v_{t20} = 0$ та $\omega_{10} = 0$ формулу (3.22) можна записати у вигляді [18]

$$f_m = (v_0 \cdot \cos \alpha_0 - v_k \cdot \cos \alpha_k) / (v_0 \cdot \sin \alpha_0 - v_k \cdot \sin \alpha_k), \quad (3.24)$$

де v_0 – швидкість тіла C до удару;

α_0 – кут між вектором швидкості тіла C до удару та площиною співударяння (тіло D);

v_k і α_k – відповідно, швидкість тіла C та кут між вектором цієї швидкості та площиною співударяння після удару (див. рис. 3.7).

Середнє значення коефіцієнта тертя ковзання або зчеплення для випадку «біжучої доріжки» для кожного співударяння тіл C і D різне та визначається довжиною l_i і висотою h_i відскоку i -го співударяння [18] (див. рис. 3.7). Для першого співударяння (див. рис. 3.7) середнє значення коефіцієнта тертя ковзання або зчеплення для випадку «біжучої доріжки», можна розрахувати за формулою [18]

$$f_{1m} = 0,25 \cdot |l_1 / (h_1 + \sqrt{h_1 \cdot h_0})|, \quad (3.25)$$

де l_1 , h_1 , h_0 – відповідно, довжина та максимальна висота відскоку тіла C і висота падіння тіла C (якщо v_{n10} задається вільним падінням тіла C) після першого його співударяння з тілом D .

3.4 Попереднє зміщення під час удару та залежність відношення ударних імпульсів від тангенціальної швидкості удару

Попереднє зміщення x_0 (див. рис. 3.2) під час удару та залежність відношення тангенціального P_t і нормального P_n ударних імпульсів від тангенціальної швидкості v_t удару ($P_t / P_n = f(v_t)$) вивчались переважно експериментально багатьма дослідниками [18]. Ці експерименти показали, що в області зчеплення тіл, які ударно взаємодіють, зі зростанням тангенціальної швидкості v_t спостерігається зростання відношення P_t / P_n , що, на думку дослідників, обумовлено збільшенням попереднього зміщення x_0 . Під час подальшого зростання тангенціальної швидкості v_t , процес фрикційної взаємодії тіл, що співударяються, характеризується швидким спадом впливу попереднього зміщення x_0 і в зоні ковзання за збільшення тангенціальної швидкості v_t відбувається поступове зменшення коефіцієнта тертя f .

Узагальнення результатів описаних експериментів дозволило отримати просту формулу (автор М. А. Бронець) для розрахунку середнього коефіцієнта тертя під час руху автомобільних шин по сухому асфальту (асфальтобетону):

$$f_m = (\tau_0 / p_r) + \beta, \quad (3.26)$$

де $\tau_0 \approx 1,7 \text{ МПа}$ – початкове дотичне напруження [18] експериментальної залежності дотичного напруження τ від нормального тиску p_r повітря в шинах;

$\beta = \text{tg} \alpha \approx 0,76$ [18] (тут α – кут нахилу експериментальної кривої $\tau = f(p_r)$ (прямої лінії) до координати (абсцис) p_r).

Формула (3.26) чітко узгоджується з молекулярно-механічною теорією тертя, де τ_0 / p_r – деформаційна, а β – молекулярна складові коефіцієнта тертя.

4 ЗНОШУВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

Зношування – це процес руйнування (destruction) поверхневих шарів твердого тіла під час механічної дії на нього іншого тіла або середовища. Якщо механічна дія проявляється як сила тертя, то зношування визначають як процес руйнування **поверхні під час тертя**. Акт руйнування поверхні тіла під час зношування локалізується в малому об'ємі матеріалу, який видаляється із зони тертя у вигляді часток зносу. Величину зносу оцінюють за зменшенням розмірів в напрямку, перпендикулярному до поверхні тертя (лінійне зношування).

Багатьма теоретичними та експериментальними працями [18] підтверджено, що відокремлення часток зносу підготовлюється багатократною дією навантажень і температурних імпульсів на одиничні мікронерівності. Внаслідок постійного накопичення незворотних змін виникає неоднорідність структури та напруженого стану матеріалів пари тертя. Це призводить до утворення концентраторів напружень і виникнення мікротріщин, які змикаючись, утворюють частинки зносу. В багатьох випадках руйнуванню поверхні тіла під час зношування передуює зміна його властивостей [18], що пояснює принцип багатократності навантаження поверхні. Ученими Керріджем і Ланкастером [18] експериментально було встановлено, що фрагменти речовини, які відділяються з тіла в процесі зношування, не зразу перетворюються в частинки зносу, а спочатку прилипають до контртіла і акумулюються на ньому внаслідок адгезійного перенесення. Відділення часток зносу та винесення їх із зони тертя відбувається за досягнення межового ступеня акумуляції. Цими дослідженнями було виявлено, що в середньому кожна частка зносу складається із п'ятдесяти перенесених фрагментів. Е. Рабіновичем [18] було зроблено спробу визначити граничні розміри перенесених фрагментів і часток зносу. В основу цих розрахунків покладено ідею, що робота, затрачена на відділення частинки матеріалу, дорівнює приросту поверхневої енергії системи тертя, пов'язаному з утворенням під час руйнування нових поверхонь, і здійснюється за рахунок пружної енергії, накопиченої в мікрооб'ємах під час тертя. Е. Рабіновичем запропоновано залежності для оцінення розмірів фрагмента $d_{фр}$ та частинки зносу $d_{зн}$:

$$d_{фр} \geq 24 \cdot P_k / (E \cdot \varepsilon_{max}^2); \quad (4.1)$$

$$d_{зн} \geq 6 \cdot P_{ад} / (\mu_n^2 \cdot E \cdot \varepsilon_{max}^2), \quad (4.2)$$

де P_k , $P_{ад}$ – відповідно енергії когезійного та адгезійного зв'язку;

E – модуль пружності матеріалу тіла, що зношується;

ε_{max} – попередня відносна пружна деформація мікрооб'єму;

μ_n – коефіцієнт Пуассона.

Порівняння розмірів фрагмента та частинки зносу дозволяє зробити висновок, що об'єм частинки зносу приблизно в 125 раз більше об'єму фрагмента, що близько до даних Керріджа та Ланкастера.

Частинки зносу можуть відокремлюватись від поверхонь тертя і за іншими, ніж описаний, механізмами, хоча єдиної класифікації способів утворення часток зносу на сьогодні ще немає. Найбільш розробленою є класифікація, запропонована М. Б. Петерсоном [18]; вона переважно справедлива в умовах сухого тертя (таблиця 4.1), оскільки теорія зношування за наявності мастила до цих пір розвинута недостатньо.

Таблиця 4.1 – Класифікація способів утворення часток зносу

Спосіб відокремлення часток зносу	Місце утворення часток зносу		
	Нерівність	Об'єм	Плівка
1. Адгезія та зріз місточків	+	+	
2. Поверхневе руйнування або відрив	+	+	
3. Втомленість	+	+	+
4. Різання	+	+	
5. Плавлення		+	
6. Хімічна реакція		+	
7. Пластична деформація	+	+	+
8. Зіскоблювання продукту реакції			+
9. Енергобаланс за Е. Рабіновичем	+	+	
10. Задирання		+	

4.1 Класифікація фрикційних зв'язків та видів їх порушення

Фрикційним зв'язком (frictional bond) називають одиничну пляму (spot) контакту (contact spot), що утворилася за одночасної дії нормальних і тангенціальних навантажень та яка зникає у випадку зняття нормального навантаження.

Розрізняють *три види фрикційних контактів* (frictional contact) (зв'язків): *пружний, пластичний і мікрорізання* (micromachining).

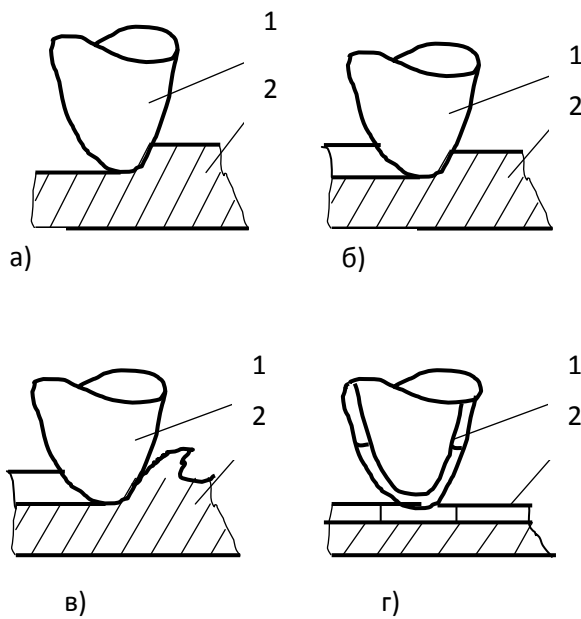
Характер порушення фрикційних зв'язків і процеси, що проходять в ПШ і мікрооб'ємах тіл пари тертя залежать від геометричних, механічних, фізичних і хімічних факторів. Із цих факторів найпотужнішим є геометричний, який характеризується відношенням глибини проникнення або величини стискання тіл (h) до радіусу одиничної мікронерівності (R), тобто – h/R . Від цього відношення залежить вид фрикційного контакту. Другим за значимістю є фізико-механічний фактор, який визначається відношенням τ/σ_m , де τ – напруження межі тангенціальної міцності молекулярного зв'язку; σ_m – напруження текучості матеріалу основи тіла. В цьому випадку розрізняють порушення зв'язку по поверхні розділу двох тіл або по плівках, що покривають ці тіла, без впливу на

шари основного матеріалу зв'язків по глибинних його шарах, внаслідок чого зовнішнє тертя переводиться у внутрішнє.

І. В. Крагельський в 1962 році опублікував класифікацію порушення фрикційних зв'язків, розділивши ці порушення на п'ять видів (рисунок 4.1, а), б), в), г).

1. Пружне відтиснення матеріалу виступами контртіла 1 (рисунок 4.1, а). Це порушення має місце, коли діюче навантаження та адгезія (adhesion) не приводять до появи в зоні контакту напружень, що перевищують напруження текучості σ_m . Зношення в цьому випадку можливе лише через фрикційну втомленість (frictional fatigue).

2. Пластичне відтиснення матеріалу (рисунок 4.1, б) відбувається за досягнення контактними напруженнями межі текучості, але матеріал тіла обтікає



виступи контртіла 1, що заглибились в тіло 2. Руйнування поверхні в цьому випадку є результатом малоциклової фрикційної втомленості.

3. Мікрорізання (рисунок 4.1, в) – виникає за досягнення контактними напруженнями або деформаціями руйнівних значень, за яких порушується режим обтікання виступів контртіла 1 та відбувається швидке руйнування тіла 2.

4. Адгезійне порушення фрикційного зв'язку по тій самій поверхні, на якій він виник (рис. 4.1, г) не приводить до безпосереднього руйнування основного матеріалу тіла 2, але змінює величину діючих в контактні напружень і деформацій, чим сприяє процесам втомленості (fatigue).

5. Когезійний відрив виникає тоді, коли міцність фрикційного зв'язку вища за міцність матеріалу, що лежить нижче. В цьому випадку відбувається глибоке виривання речовини, що спричиняє руйнування матеріалу тіла 2 вже під час перших актів взаємодії тіл 1 і 2.

4.2 Характеристика процесу та види зношування твердих тіл

4.2.1 Характеристика процесу зношування

Типову залежність зношування твердого тіла H від часу роботи t вузла тертя або шляху тертя L_f подано на рисунку 4.2. На цьому графіку можна виділити три стадії процесу. I – припрацювання. Це нерівноважна стадія процесу зношу-

вання, частка якої в загальному ресурсі часу роботи спряження деталей машин (вузол тертя) мала. Стадія I характеризується значною інтенсивністю зношування

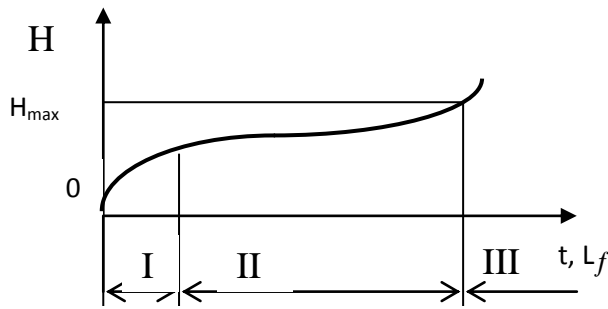


Рисунок 4.2 – Залежність зносу H від часу роботи t (або шляху тертя L_f) вузла тертя

вання dH/dL_f , де H – знос, L_f – шлях тертя (friction path) – відстань, яку проходить тіло від початку попереднього зміщення до повного зупинення рухомих деталей спряження. II – стадія постійної інтенсивності зношування на якій $dH/dL_f = const$. Ця стадія найбільш тривала. III – стадія катастрофічного зношування.

Зношування проходить на ділянках поверхонь твердих тіл, де реалізується їх силова взаємодія, тобто на фрикційних контактах, які в сумі становлять ФПК. За $dH/dL_f = const$ ФПК також постійна в будь-який момент часу.

Під час зсуву одного тіла відносно іншого на величину середнього діаметра плями контакту існуючі фрикційні зв'язки порушуються і виникають нові в такій самій кількості, а в будь-якій точці поверхні, що належить фрикційному контакту, здійснюється повний цикл навантаження. Таким чином зсув на середній діаметр плями контакту можна розглядати як елементарний акт взаємодії.

Руйнування поверхні під час зсуву на середній діаметр плями контакту може відбутись лише на деяких ділянках ФПК A_r . В кількісному відношенні це відповідає відділенню шару речовини товщиною Δh з кожної плями контакту. За такого припущення об'єм матеріалу ΔV , що видаляється з поверхні у вигляді частинок зносу, можна визначити за залежністю [18]

$$\Delta V = \Delta h \cdot A_r. \quad (4.3)$$

Величина Δh характеризує умовну, а не реальну товщину матеріалу, що видаляється з кожної плями контакту. У випадку зношування поверхонь на величину ΔH число фрикційних зв'язків N , які виникли та порушилися в кожній точці поверхні, що зношується, можна знайти як відношення

$$N = \Delta H / \Delta h. \quad (4.4)$$

Загальне число фрикційних зв'язків на поверхні зношування n_r можна знайти, якщо умовно розділити цю поверхню на смужки в напрямку ковзання шириною d_{1m} , де d_{1m} – середній діаметр плями контакту в напрямку, перпендикулярному до напрямку ковзання. Довжину кожної смужки потрібно вибрати такою, щоб на ній виникло N фрикційних зв'язків, тоді

$$n_r = a \cdot N / d_{1m}, \quad (4.5)$$

де a – розмір тіла, що зношується, в напрямку перпендикулярному до напрямку ковзання.

Введемо поняття густини плям контакту тіл, що зношуються

$$\rho_r = n_r / A_a, \quad (4.6)$$

де A_a – номінальна площа контакту (НПК).

Якщо допустити, що НПК дорівнює площі тертя $A_f = A_a$, то шлях тертя L_f можна знайти за формулою [18]

$$L_f = A_f / a = N \cdot (d_{1m} \cdot \rho_r)^{-1}, \quad (4.7)$$

де $A_f = A_a = N \cdot a \cdot (d_{1m} \cdot \rho_r)^{-1} = n_r / \rho_r$,

або
$$L_f = n_r \cdot (a \cdot \rho_r)^{-1}. \quad (4.8)$$

За означенням [18], лінійна інтенсивність зношування

$$I_h = \Delta H / L_f \quad (4.9)$$

є макрохарактеристикою процесу зношування, а мікрохарактеристикою (питомою інтенсивністю) називають величину

$$i_h = \Delta h / d_{2m} = \Delta V / (A_r \cdot d_{2m}), \quad (4.10)$$

де d_{2m} – середній діаметр плями контакту в напрямку ковзання.

За існуючої моделі мікронерівностей можна вважати, що $d_{1m} = d_{2m} = d_m$, тоді зв'язок між характеристиками i_h та I_h виразиться співвідношенням [18]

$$I_h = 4 \cdot \pi^{-1} \cdot i_h \cdot A_r / A_a \approx i_h \cdot A_r / A_a. \quad (4.11)$$

Лінійна інтенсивність I_h зручна для користування, оскільки є безрозмірною величиною. Цю характеристику зношування можна також виразити через питоми об'ємне зношування $w = V / (F_n \cdot L_s)$ (тут V – зношений об'єм; L_s – шлях ковзання) та номінальний тиск p_a в контакті [18]:

$$I_h = w \cdot p_a. \quad (4.12)$$

Оскільки випробування на зношування проводяться, зазвичай, на зразках малого розміру, то, як правило, $p_a = p_c$, де $p_c = F_n / A_c$ – контурний тиск.

Лінійну інтенсивність зношування можна також визначити за однією із таких формул [18]:

$$I_h = \Delta V / (A_f \cdot L_f); \quad (4.13)$$

$$I_h = \Delta H / L_f \quad (4.14)$$

або в більш загальному вигляді, коли $H = var$ та $L_f = var$,

$$I_h = dH / dL_f; \quad (4.15)$$

$$I_h = (\lambda_f / \rho) \cdot [\Delta m / (A_a \cdot L_f)], \quad (4.16)$$

де $\lambda_f = A_a / A_f$; ΔV , Δm – відповідно, об'єм і маса зношеного матеріалу на шляху тертя L_f ; ρ – густина матеріалу.

Інколи доцільно використовувати розмірні характеристики зношування:

масову –
$$I_m = \Delta m / L_f; \quad (4.17)$$

об'ємну –
$$I_v = \Delta v / L_f; \quad (4.18)$$

енергетичну (енергетична оцінка зношування [1]) –

$$I_w = dH / W_f = I_h / F_f, \quad (4.19)$$

де W_f – робота сил тертя;

F_f – сила тертя.

Шлях тертя L_f пов'язаний із швидкістю взаємного ковзання v_s деталей спряження ($v_s = v_1 - v_2$, де v_1 і v_2 – абсолютні швидкості руху тіл спряження в точці контакту) співвідношенням:

$$dL_f = v_s dt_f = dW_f / F_f, \quad (4.20)$$

де t_f – тривалість процесу тертя (duration of the friction process);. За $F_f = const$ та $v_s = const$:

$$L_f = v_s \cdot t_f = W_f / F_f. \quad (4.21)$$

Підставляючи, наприклад, у формулу (4.15) вираз (4.19), отримаємо

$$I_h = \lambda_f \Delta m / (\rho \cdot A_a \cdot t_f v_s) = I_t \cdot v_s^{-1}, \quad (4.22)$$

де $I_t = \lambda_f \Delta m / (\rho \cdot A_a \cdot t_f)$ – швидкість зношування (wear rate).

Показані залежності для розрахунку інтенсивності зношування не дозволяють виявити залежність питомого зношування i_h від фізико-механічних властивостей матеріалів спряження, умов навантаження та мікрогеометричних характеристик поверхонь тертя. Співвідношення між цими характеристиками залежить від конкретного механізму руйнування поверхні. Очевидно, що інтенсивність зношування буде постійною за виконання умови

$$\Delta v = \Delta V_1 / n_1 = \Delta V_2 / n_2 = \dots = \Delta V_m / n_m = const, \quad (4.23)$$

де n_i ($i = 1, \dots, m$) – число циклів (cycle) взаємодії тіл спряження, яке приводить до руйнування об'єму матеріалу ΔV_i .

Припустимо, що $\Delta V_i = V_\varepsilon$, де V_ε – прониклий об’єм матеріалу, який бере участь в контактній деформації. Об’єм V_ε можна вирахувати із використанням функції розподілення ординат профілю (опорної кривої профілю поверхні) (2.11) за залежністю [18]

$$V_\varepsilon = \alpha \cdot A_c \cdot R_{max} \cdot b \cdot \int_0^\varepsilon \varepsilon_i^\nu \cdot d\varepsilon_i = A_c \cdot b \cdot \varepsilon^{\nu+1} \cdot R_{max} \cdot \alpha / (\nu + 1), \quad (4.24)$$

де ε – зближення тіл;

α – коефіцієнт, що враховує відмінність геометричної характеристики поверхні – опорної кривої $t_p(\varepsilon)$ – від відносної площі фактичного контакту $\lambda_r = A_r/A_c = \alpha \cdot t_p(\varepsilon)$ [1], яка виникає через деформацію мікронерівностей під навантаженням; $0,5 \leq \alpha \leq 1$ ($\alpha = 0,5$ за пружного фрикційного контакту і $\alpha = 1$ за пластичного контакту);

R_{max} – максимальна висота мікронерівностей поверхні;

b, ν – параметри апроксимації початкової ділянки опорної кривої (див. п. 2.2).

Враховуючи в (4.10) вираз (4.24) та умову (4.23), отримаємо основне рівняння зношування [1, 18]

$$\begin{aligned} i_h &= V_\varepsilon / (A_r \cdot d_m \cdot n) = A_c \cdot b \cdot \varepsilon^{\nu+1} \cdot R_{max} \cdot \alpha / [(\nu + 1) A_r \cdot d_m \cdot n] = \\ &= b \cdot \varepsilon^{\nu+1} \cdot R_{max} \cdot \alpha / [(\nu + 1) A_r \cdot d_m \cdot n \cdot \lambda_r], \end{aligned} \quad (4.25)$$

де n – число циклів фрикційної взаємодії.

Величина, обернена зношуванню, називається зносостійкістю $Z_h = 1/I_h$. Можна також визначити зносостійкість за іншими видами напручування – t_f або W_f , тоді

$$Z_h = 1/I_h; \quad Z_w = 1/I_w = [\lambda_f dH / (A_d dW_f)]^{-1}. \quad (4.26)$$

Найбільше застосування має зносостійкість Z_h , оскільки є безрозмірною величиною. На практиці значення зносостійкості коливається в дуже широких межах: $Z_h = 10^3 \dots 10^{13}$ [1], тому її оцінюють за логарифмічною або показниковою шкалами:

$$\lg Z_h = K + \lg \alpha_K; \quad (4.27)$$

$$Z_h = \alpha_K \cdot 10^K, \quad (4.28)$$

де K – ціле число, яке визначає номер класу зносостійкості;

$1 \leq \alpha_K < 10$ – мантиса логарифму $0 \leq \lg \alpha_K < 1$.

Таблиця 4.2 – Класи зносостійкості

K	Z_h	K	Z_h
3	$10^3 \dots 10^4$	8	$10^8 \dots 10^9$
4	$10^4 \dots 10^5$	9	$10^9 \dots 10^{10}$
5	$10^5 \dots 10^6$	10	$10^{10} \dots 10^{11}$
6	$10^6 \dots 10^7$	11	$10^{11} \dots 10^{12}$
7	$10^7 \dots 10^8$	12	$10^{12} \dots 10^{13}$

В Україні встановлено десять класів зносостійкості – від 3 до 12 включно (таблиця 4.2 [1]). В кожному класі нижня межа зносостійкості Z_h не входить до його складу.

Кожний клас зносостійкості розділяється на п'ять розрядів (таблиця 4.3).

Визначення класу зносостійкості партії однотипних виробів виконується за результатами випробувань заданої вибірки виробів. Під час статистичного оброблення даних випробувань оцінюють допустимий (толерантний) інтервал розсіювання результатів, вважаючи, що вони підпорядковуються закону нормального розподілу (розподіл Гаусса).

Таблиця 4.3 – Розряди зносостійкості

Розряд зносостійкості	α_k	$lg\alpha_k$
1	1,0...1,59	0...0,2
2	1,59...2,51	0,2...0,4
3	2,51...3,98	0,4...0,6
4	3,98...6,31	0,6...0,8
5	6,31...10,0	0,8...1,0

Допустимий інтервал розсіювання результатів вибирається залежно від ступеня відповідальності рішення щодо зносостійкості виробу і може дорівнювати 95% або 99%. Граничні значення зносостійкості, що попадають в межі інтервалу розсіювання, округлюються до меж найближчого розряду зносостійкості.

Для умовного позначення зносостійкості виробу встановлена літерно-цифрова форма, наприклад *КІ 10/4*, де *К* – клас зносостійкості; *І* (літера російська) – зносостійкість; 10 – десятий клас зносостійкості; 4 – четвертий розряд зносостійкості. Це позначення значить, що зносостійкість виробу лежить в межах $3,58 \cdot 10^{10} \leq Z_h < 6,31 \cdot 10^{10}$. Якщо діапазон зносостійкості виходить за межі одного класу чи розряду, то її позначають подвійним літерно-цифровим символом – *КІ 9/2 – 10/4*.

4.2.2 Види зношування

Відомі класифікації видів зношування, характерних для практики машинобудування [1, 18, 21], розділяють види зношування на два великі класи, об'єднані загальними ознаками. До першого класу відносять адгезійне, окисне та корозійно-механічне зношування, а до другого класу – ерозійне газо- та гідроабразивне зношування.

Адгезійне зношування (adhesive wear) проявляється за високої навантаженості спряжень і виражається в заїданні та схоплюванні поверхонь, що характеризується глибинним вириванням матеріалу і перенесенням його з однієї поверхні тертя на іншу та дією нерівностей, що виникли, на спряжену поверхню.

Окисне зношування (oxidative wear) – це руйнування під час тертя окислів матеріалів пари тертя, які утворюються під час дії на поверхні тертя кисню повітря або кисню, що міститься в мастилі. Окисне зношування виникає за помірних умов експлуатації та відсутності агресивних середовищ або каталізуючих умов.

Корозійно-механічне зношування (corrosion-mechanical wear) – це руйнування поверхонь тертя в умовах одночасної дії механічних навантажень та агресивних середовищ. За цього виду зношування на поверхнях тертя утворюються нові, менш стійкі хімічні з'єднання, які в процесі роботи трибоспряження видаляються разом з продуктами зношування. Цей вид зношування є найбільш поширеним під час експлуатації машин і механізмів. До підкласу корозійно-механічного зношування можна віднести фретінг, стомлення, електромеханічне та електроерозійне руйнування поверхонь тертя та водневе зношування.

Фретінг (fretting) – це механічне зношування тіл за коливального відносно-го мікрозміщення поверхонь тертя. Переважно фретінг проходить за відсутності окислювального середовища на фрикційному контакті. Супроводжується фретінг захопленням та руйнуванням мікрооб'ємів від втомленості. Якщо відносно проковзування поверхонь супроводжується окисненням, то такий процес зношування називається **фретінг-корозією** (fretting-corrosion). На поверхнях тертя з'являються раковини, в яких зосереджуються спресовані оксиди, що мають специфічний колір. В основній своїй масі ці оксиди залишаються в зоні контакту. Фретінг-корозія знижує втомну міцність спряження в 3...6 раз.

Втомне зношування (руйнування) (fatigue wear) поверхонь тертя є результатом повторного деформування мікрооб'ємів матеріалу, що призводить до виникнення мікротріщин і відділення частинок матеріалу. Цей процес називається викришуванням. Будь-яке видалення або переміщення матеріалу, що призводить до утворення на поверхні деталі заглибин та ямок, називається **пітінгом**. Локальне пошкодження поверхні тертя під час пітінгу характеризується **пітінг-фактором** $P = H/l$, де H – середнє значення зносу поверхні; l – глибина локального пошкодження.

Втомне зношування поверхонь (циклова втомленість (cyclic fatigue) виникає як під час тертя ковзання (зубчасті та черв'ячні передачі тощо) так і під час тертя кочення (підшипники кочення).

Електромеханічне зношування (electromechanically wear) – це руйнування поверхонь під час тертя та різання, яке виникає під дією слабкого електроструму, що проходить через фрикційний контакт, і сукупності механічних факторів, наприклад, пластичної деформації контакту. Цей вид зношування здебільшого визначається такими явищами, як термоелектронна емісія, електронна емісія, контактна різниця потенціалів та іншими термоелектричними явищами.

Електроерозійне зношування (electroerosive wear) – руйнування поверхні відбувається внаслідок дії на неї електричних розрядів під час проходження через фрикційний контакт електричного струму. Цей вид зношування є характерним для тертя електроконтактів, струмоприймачів тощо.

Водневе зношування (hydrogen wear) – це процес руйнування металевого елемента пари тертя внаслідок поглинання металом водню. Явище водневого зношування, як один із процесів руйнування поверхонь під час тертя ковзання, встановлено біля 25 років тому назад Д. М. Гаркуновим та А. А. Поляковим. Це явище на сучасному етапі розвитку трибології інтенсивно вивчається.

Процеси, що відбуваються під час водневого зношування, важко піддаються аналітичному та експериментальному дослідженню, тому що ці дослідження тісно пов'язані з іншими науками, такими як електрохімія, органічна хімія, хімія полімерів і мастильних матеріалів, механохімія тощо. Водневе зношування проявляється у вузлах тертя різних за призначенням машин. Його розповсюдження по об'єму майже таке саме, як і абразивного зношування. Рівень інтенсивності водневого зношування залежить від концентрації водню в ПШ деталей пари тертя. Водень виділяється з матеріалів пари тертя або із навколишнього середовища, з мастила за його деструкції, пластмаси, води, палива і т. п. Під час водневого зношування в зоні тертя відбуваються такі процеси:

- інтенсивне виділення водню під час тертя та безперервне його надходження в ПШ сталевих або чавунних деталей пари тертя;
- адсорбція водню на поверхнях тертя;
- дифузія водню в шар сталі, що деформується, із швидкістю, величина якої визначається градієнтами напружень і температури;
- накопичення водню в ПШ деталей пари тертя;
- одночасний розвиток великої кількості зародків мікротріщин в усій зоні деформування внаслідок накопичення водню та миттєве утворення мілкодисперсного металевого порошку в ПШ.

Розрізняють два види водневого зношування [22] – руйнуванням (ВЗР) і диспергуванням (ВЗД). ВЗР відбувається за накопичення ПШ, наприклад, сталевій деталі, великої кількості водню. Для сталей і чавунів процес поглинання водню є ендотермічним (супроводжується поглинанням теплоти). Під час тертя мастильний матеріал десорбується і водень займає велику кількість десорбційних центрів на поверхні деталей, потрапляючи в зародкові тріщини, міжкристалічні межі та інші місця. За періодичного деформування внаслідок тертя ПШ об'єм дефектних місць (порожнин) змінюється. Водень, який проходить в ці порожнини, молізується і за відсутності можливості вийти з цих порожнин, створює в них високий тиск, який, зростаючи, за подальшого накопичення водню, викликає руйнування за усіма тріщинами, що утворились і з'єднались. Зовні це зношування проявляється як процес руйнування сталевій поверхні на глибину декількох десятків мікрометрів і намащування сталі на поверхню іншої деталі, виготовленої не із сталі, а з іншого матеріалу.

За ВЗД яких-небудь змін в ПШ деталей внаслідок звичайного зношування під час диспергування (тонке розмелювання твердих або рідких тіл) не спостерігається. Залежно від кількості водню в ПШ сталеві або чавунні деталі насичуються воднем. Зносостійкість сталі за незначного насичення їх воднем підвищується (зростає твердість ПШ), а за наступного зростання концентрації водню зносостійкість спадає. Таким чином, ВЗД збільшує зношування сталевих деталей через розпушування їх ПШ за відповідної концентрації водню.

Загальна ознака другого класу видів зношування – це руйнування поверхонь потоком твердих частинок, якими можуть бути як сторонні частинки, що подаються в зону тертя зовні, так і фрагменти руйнування деталей пари тертя.

Під **абразивним зношуванням** (abrasive wear) розуміють руйнування поверхонь дією твердих частинок, які присутні в зоні тертя.

Ерозійне зношування – це руйнування поверхонь тертя потоком абразивних частинок, які можуть переноситись рідиною або газом. Швидкість зношування визначається кінетичною енергією частинок, кутом їх зіткнення з поверхнею та концентрацією в потоці. Під час удару частинок по поверхні, якщо вони мають достатню енергію, поверхня тіла пластично деформується або в її об'ємах відбуваються структурні фазові перетворення та настає викришування (ерозійний пітінг).

Кавітаційне зношування (cavitation wear) виникає тоді, коли в примежовому шарі потоку рідини біля поверхні тіла, що обмивається цим потоком, поряд із зонами підвищеного тиску виникають зони розрідження. У випадку зменшення тиску в цих зонах нижче тиску насичених парів рідини, в них утворюються газові порожнини (бульбашки). Це порушує суцільність потоку. Бульбашки, потрапляючи в зони високого тиску, закриваються і викликають ефект гідравлічних ударів, які обумовлюють коливання тиску поблизу поверхні тіла, внаслідок чого інтенсифікуються процеси її руйнування та хімічні реакції в ПШ.

4.3 Вибіркове перенесення (ефект незношуваності (wear resistance))

Аналіз навантажених рухомих з'єднань, які зустрічаються в живих організмах, показує, що в них мають місце всього два типи вузлів тертя – відкриті та закриті [1]. У відкритих вузлах тертя – зубах тварин – твердий матеріал працює по твердому. В закритих вузлах тертя – суглобах – кістки рухомого спряження покриті м'якими хрящами, на поверхнях яких розташовані контактуючі між собою тонкі полімерні плівки. В цій парі тертя м'який матеріал працює по м'якому. В машинобудуванні поки що такі вузли тертя не застосовуються. Суглоби живих організмів працюють десятки років без зношування і мають здатність до самовідновлення.

В природі діють два протилежні за своєю суттю закони – деструктивний (збільшення ентропії в замкнутій термодинамічній системі) і самоорганізації (зменшення ентропії у відкритій термодинамічній системі, наприклад, в живому світі). Встановлено [23, 24], що у відкритих системах, які постійно отримують із зовнішнього середовища від'ємну ентропію (негентропію) та речовину, можуть виникати стаціонарні нерівноважні стани з високим ступенем впорядкування. Ці нові структури можуть виникати в природі за виконання таких необхідних умов [23, 24]:

- система має бути термодинамічно відкритою, тобто вільно обмінюватись енергією та (або) речовиною з навколишнім середовищем;
- рівняння динаміки системи мають бути нелінійними;
- відхилення від рівноваги перевищують критичне значення;
- мікроскопічні процеси проходять узгоджено (кооперовано).

Ні одна із викладених умов не порушує термодинамічних і загальнонаукових законів. Так, перша умова це фактично другий закон термодинаміки, тільки викладений у більш загальній формі. Друга та третя умови – нелінійна термодинаміка, яка обумовлює самовільне виникнення упорядкування, а четверта умова є проявом причинності процесів, які за наявності особливих зв'язків ведуть до спонтанного виникнення нових структур.

Вузли тертя в неживій природі є відкритими термодинамічними системами та задовольняють вимоги самоорганізації, а саме:

- 1) до них від двигуна підводиться енергія;
- 2) як правило, вузли тертя змащуються;
- 3) мастильний матеріал складається з великої кількості однакових елементів – молекул;
- 4) в мастилі можуть бути міцели та іони металів (міцела – це молекулярна конструкція, яка складається із ядра з позитивно заряджених іонів, оточених кільцем поверхнево активних молекул – диполів).

Приклад самоорганізації – вузол тертя компресора домашнього холодильника. Компресор холодильника працює десятки років в умовах постійних пусків та зупинок практично без зношування. Деталі вузлів тертя холодильника виготовлені із сталі і змащуються сумішшю мастила (50%) та холодильної речовини, наприклад, фреону чи хладону (50%). Під час роботи на поверхнях тертя – шийках колінчастого вала та спряжених з ним підшипниках, поршні та циліндри самовільно утворюється тонка мідна плівка товщиною 1...2 мкм. Ця плівка сформована з іонів міді, що виникають в мастильному матеріалі за незначної корозії мідних (або латунних) трубок охолоджувача. В зону тертя іони приносить охолоджувальна суміш фреону та мастила. Після того як в зоні контакту утворюється плівка міді змінюються умови тертя деталей компресора. Ця зміна виражається в тому, що знижується тиск, знижується сила тертя та спадає температура. Внаслідок цих змін процеси окислення мастила та розчинення міді трубок можуть зупинитись і режим тертя стабілізується, за якого мідна плівка не руйнується. Вона переходить по чергово з однієї поверхні тертя на іншу. Продукти зношування утримуються в зазорі спряжених деталей електростатичними силами. Захисна мідна плівка має особливу будову – розпушену, пористу структуру і поводить себе як квазірідина (тверде тіло, яке має у своїй структурі більше 10% вакансій, поводить себе як рідина). Ця плівка утворюється в процесі тертя та за її багатократного деформування не руйнується й не піддається втомному зношуванню. Покриваючи шорсткості сталевих деталей, мідна плівка, яку назвали **сервовітною** (від латинського слова *servovite* – спасати життя), практично виключає їх прямий контакт і ці деталі не зношуються. Плівка сприймає всі зовнішні навантаження, рівномірно розподіляючи їх по всій поверхні тертя, що суттєво продовжує термін служби вузла тертя.

Утворення сервовітної плівки відноситься до явищ самоорганізації неживої природи. Це явище було названо **вибірковим перенесенням (ВП)** (*selective transfer(ST)*) або **ефектом незношуваності** (*wear resistance*). Відкрили цей ефект Д. М. Гаркунов та І. В. Крагельський. Вибіркове перенесення – складне явище

природи, за реалізації якого відомі методи визначення площ контакту, формули зближення поверхонь, криві опорної поверхні, а також методи та прилади для дослідження властивостей контакту не придатні. Під час фрикційного розігрівання поверхонь тертя до $T \geq 338 \text{ K}$ інтенсифікуються окислювальні процеси, що може призвести до повного припинення ВП. На сучасному етапі дослідженнями ВП твердо встановлено, що сервовітна плівка утворюється за таких сполучень матеріалів пари тертя:

- 1) бронза – сталь за змащування гліцерином;
- 2) бронза – сталь за змащування під високим тиском звичайними мастилами типу ЦІАТІМ – 201 і зворотно-поступального руху деталей пари тертя;
- 3) сталь – сталь за змащування металоплакірувальними мастильними матеріалами, які мають у своєму складі дрібні частинки бронзи, міді, свинцю, срібла або золота (наприклад, суміш пластичного мастила ЦІАТІМ – 201 з порошками міді, бронзи чи латуні та свинцю);
- 4) твердо спечений порошковий матеріал, наприклад, такого складу – тонкодисперсна суміш порошків ВК3, ВК6, ВК8 з добавками литого карбиду вольфраму ($WC+W_2C$), зв'язкою якої є мідно-нікелевий сплав, що має високу рідкотекучість і забезпечує потрібну міцність твердого сплаву;
- 5) сталь – політетрафторетилен (ПТФЕ), наповнений закисом міді, за змащування гліцерином.

Потрібно зауважити, що ВП існує, як правило, у вузькому діапазоні умов реалізації, тому до деталей пари тертя, в яких здійснюється ВП, висуваються такі вимоги [29]:

- легкість відновлення (restoration) металів з оксидів;
- гарна адсорбція мастила;
- каталітична дія металевої поверхні на трибохімічні реакції;
- відсутність забруднення на робочих поверхнях.

Необхідно, щоб мастильні матеріали, які застосовуються для змащення цих деталей, мали:

- здатність до утворення металоорганічних полімерних продуктів;
- вибіркоче розчинення легувальних елементів та матеріалів пари тертя;
- малу молекулярну масу;
- відновлювальну дію;
- малу окисну здатність;
- здатність забезпечувати гарне тепловідведення (heat dissipation);
- гарну змочувальну здатність;
- стабільність характеристик і властивостей.

Шорсткість поверхні деталей пари тертя має бути не менше $R_z 10$. Бажано, щоб деталі пари тертя здійснювали знакозмінний рух.

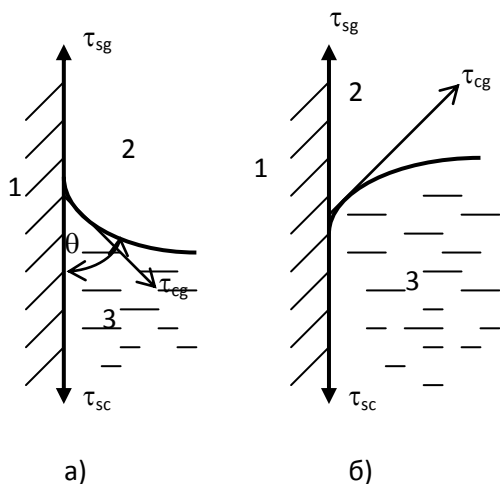
ВП використовується в деяких вузлах тертя літаків, кораблів, глобоїдних редукторах тощо. Більш детально з особливостями ВП можна ознайомитись за працями [1, 2, 18, 21, 22].

5 ЗМАЩЕННЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ МАШИН

Змащення (lubrication) вузлів тертя машин – це один із відомих шляхів підвищення триботехнічної надійності машин і механізмів.

Пари тертя змащують з метою зменшення опору під час тертя в рухомих спряженнях машин і механізмів та зношування їхніх деталей. Під час введення мастильного матеріалу в зони контакту рухомих з'єднань зовнішнє тертя між твердими тілами переноситься в шар рідини і, таким чином, замінюється внутрішнім рідинним тертям.

Мастильним матеріалом може бути рідина або тверде тіло з такою будовою, яка забезпечує зниження коефіцієнта тертя. Взаємовплив деталей пари тертя і мастильного матеріалу має бути таким, щоб забезпечити зменшення опору тертя та обмежити зношування елементів вузлів тертя.



1 – тверде тіло; 2 – газ (повітря); 3 – рідина.

Рисунок 5.1 – Форма меніска рідини за змочування (а) та незмочування (б) поверхні твердого тіла

5.1 Властивості мастильних матеріалів

Щоб мастильні матеріали могли виконувати своє призначення вони потрібно, щоб вони мали певний набір властивостей, а саме:

- 1) гарне змочування (wetting) поверхонь контакту деталей вузла тертя, що знаходяться в триботехнічному спряженні;
- 2) здатність відводити надлишкову теплоту, що виділяється під час роботи пари тертя;
- 3) здатність послаблювати дію зовнішнього навантаження та рівномірно розподіляти його по всій поверхні контакту;
- 4) зменшувати коефіцієнт тертя;
- 5) здатність демпфірувати ударні, вібраційні та інші динамічні навантаження деталей вузла тертя;
- 6) швидко відновлювати цілісність мастильної плівки у випадку її руйнування;
- 7) зберігати свої основні функції в заданому температурному режимі роботи трибоспряження;
- 8) забезпечувати нормальну роботу вузлів тертя в заданому діапазоні швидкостей і навантажень;
- 9) зберігати протягом заданого терміну хімічну стійкість під час взаємодії з навколишнім середовищем.

Змочувальна дія рідини обумовлена взаємодією сил зчеплення рідини з поверхнею твердого тіла та її поверхневим натягом. У випадку змочування рідиною твердого тіла спостерігається увігнутий меніск рідини (рисунок 5.1, а), а у випадку незмочування рідина має випуклий меніск (рисунок 5.1, б). Під час знаходження рідини в посудині чітко виділяються три поверхні розділення фаз: тверде тіло-газ, рідина-газ та тверде тіло-рідина. Між цими фазами виникає поверхневий натяг, який можна характеризувати дотичними напруженнями: τ_{sg} – між твердим тілом і газом; τ_{cg} – між рідиною та газом; τ_{sc} – між твердим тілом та рідиною.

Увігнутий меніск на поверхні розділу рідини та газу має місце за $\tau_{sg} > \tau_{sc}$ і стабілізується за досягнення статичної рівноваги напружень [1]:

$$\tau_{sg} = \tau_{sc} + \tau_{cg} \cdot \cos \theta, \quad (5.1)$$

де θ – **кут змочування** (contact angle). Рівняння (5.1) називається рівнянням змочування.

Виразимо із рівняння (5.1)

$$\cos \theta = (\tau_{sg} - \tau_{sc}) / \tau_{cg}. \quad (5.2)$$

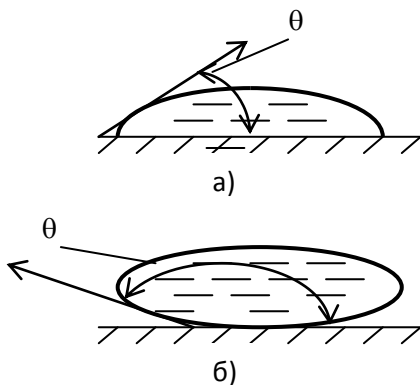


Рисунок 5.2 – Схеми визначення кута змочування для випадків, коли рідина змочує (а) тверде тіло і не змочує (б) його

За $\cos \theta < 0$ меніск увігнутий і рідина змочує стінку посудини, а за $\cos \theta > 0$ меніск випуклий і змочування відсутнє. Якщо $\theta = 0$, то змочування буде повним, а за $\theta = 180^\circ$ – абсолютне незмочування. Кут змочування за контакту рідини з твердим тілом, що має плоску поверхню, визначається за схемами, наведеними на рисунку 5.2, а), б).

Кут змочування в технічній літературі називають ще граничним кутом [1]. Величина цього кута залежить від когезійних сил притягування між молекулами рідини, сил притягування молекул рідини частинками (іонами, молекулами, остовами атомів), що утворюють поверхню твердого тіла, сил притягування молекул рідини, які не мають контакту з поверхнею твердого тіла, але знаходяться на відстані міжмолекулярної взаємодії, та гравітаційних сил (сил ваги).

Із перерахованих сил, що визначають кут змочування, тільки когезійні сили його збільшують, а інші зменшують.

Якщо не враховувати силу ваги, то значення кута змочування відносно легко розрахувати, оскільки залежність між поверхневим натягом і кутом змочування лінійна [1].

Тверде тіло	Вихідний матеріал	1
		2
		3
		4
	9	5
		6
Рідина	7	
	8	
	7	
	9	6
Тверде тіло	Вихідний матеріал	5
		4
		3
		2
		1

1 – основний матеріал; 2 – зона пружних деформацій; 3 – зона пластичних деформацій; 4 – текстурована зона; 5 – шар окисів; 6 – шар Бейльбі (шар адсорбованих органічних молекул, що мають полікристалоподібну будову); 7 – зона граничної плівки; 8 – гідродинамічна зона; 9 – продукти реакції

Рисунок 5.3 – Схема фрикційного контакту за змащування поверхонь тертя

Змащувальна дія мастила починається після змочування поверхонь контакту пар тертя та поширення мастильної рідини по всій поверхні тертя. Молекули мастильного матеріалу та поверхня твердого тіла взаємодіють між собою електростатичними та електродинамічними полями. Ефект цієї взаємодії найбільш сильно проявляється на межі розділу фаз і в пристінній зоні. Тут молекули рідини утримуються на поверхні твердого тіла у вигляді упорядкованої структури, орієнтованої під певним кутом до поверхні. Значний ступінь упорядкованості та упаковка молекул рідини в пристінній зоні надають рідині властивостей квазікристалічного тіла, властивості якого суттєво відрізняються від властивостей об'єму рідини, що знаходиться в «гідродинамічній» зоні (рисунок 5.3). Цей пристінний шар рідини називається **граничним шаром**. Компоненти рідини,

що знаходяться в цьому шарі, на поверхні твердого тіла беруть участь в адсорбції та хемосорбції. Найбільш активні складові мастила дифундують (переважно на межах зерен) всередину ПШ твердого тіла, змінюючи його властивості. Молекули рідини, що знаходяться в гідродинамічній зоні, віддалені від поверхні твердого тіла, яка практично на них не впливає, але міжмолекулярні сили в самій рідині утруднюють переміщення цих молекул. Залежно від товщини шару рідини між поверхнями контакту деталей трибопряження тертя може бути «сухим», граничним, напіврідинним і рідинним. Наприклад, для підшипників ковзання встановлена [25] залежність (крива Герсі – Штрібека) коефіцієнта тертя f від характеристики (characteristic) режиму їх роботи (operating mode characteristic) $\lambda = \mu \cdot \omega / p_m$ (рисунок 5.4), де μ – динамічна в'язкість мастила; ω – кутова швидкість вала; $p_m = F_r / A$ – питома навантаження на підшипник (тут F_r – радіальне навантаження, A – площа діаметрального осевого перетину підшипника – нормальна до лінії дії F_r).

Аналізуючи криву $f = \varphi(f_{\min}, \lambda)$ можна відмітити на ній характерні точки.

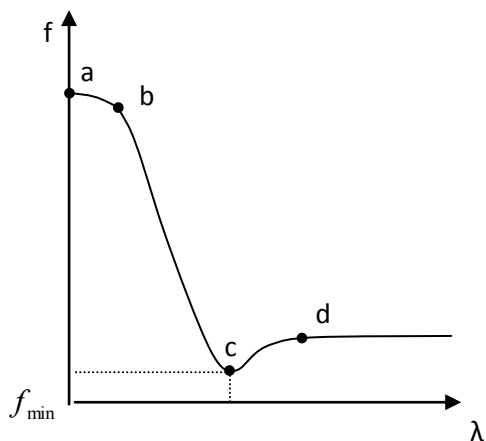
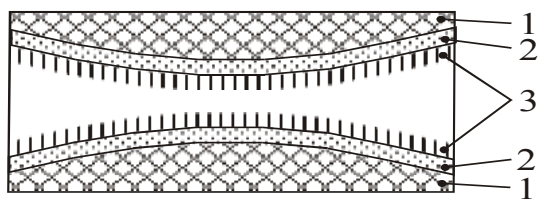


Рисунок 5.4 – Залежність коефіцієнта тертя f від характеристики режиму роботи підшипника ковзання λ

Точка «а» відповідає режиму сухого тертя, коли на поверхнях контакту практично немає мастильної плівки. На ділянці «ab» реалізується режим граничного тертя, який характеризується відносною товщиною мастильного шару ($h_{\text{відн}} < 1$), де $h_{\text{відн}} = h / (R_{a1} + R_{a2})$ (тут h – товщина мастильного шару, мкм; R_{a1} , R_{a2} – середня висота мікронерівностей контактуючих поверхонь, мкм) [1]. За граничного тертя опір рухові та зношування поверхонь залежать від властивостей поверхонь деталей і поверхневої активності молекул мастила, а в'язкість мастила практично не впливає на процеси граничного тертя, оскільки товщина мастильної плівки мала порівняно із

висотою мікронерівностей. Модель мастильної плівки за граничного тертя показана на рисунку 5.5. Ділянка «bc» характеризує режим напіврідинного тертя. Якщо вважати матеріали деталей пари тертя абсолютно жорсткими, то товщина мастильної плівки за напіврідинного тертя оцінюється діапазоном $1 \leq h_{\text{відн}} \leq 5$ [1]. Прийнято, [1] що для повного відділення мікронерівностей деталей вузла тертя товщина мастильного шару має в п'ять раз перевищувати сумарну висоту мікронерівностей поверхонь контактуючих деталей пари тертя $R_{a\Sigma} = R_{a1} + R_{a2}$. Точка «с» якраз відповідає товщині мастильної плівки $h_{\text{відн}} = 5$. Мастильні матеріали, що використовуються в машинобудуванні, не дозволяють отримати товщину мастильного шару $h_{\text{відн}} > 100$, тому відповідно до цих зауважень режим рідинного тертя або гідродинамічне мащення обмежено діапазоном

$5 \leq h_{\text{відн}} \leq 100$ [1]. У випадку врахування реального факту пружних деформацій поверхонь контакту деталей пари тертя (особливо під час дії великих навантажень) здійснюється так зване еластогідродинамічне (elastohydrodynamic) мащення (lubrication) [1], для якого $1 \leq h_{\text{відн}} \leq 10$.



1 – основний матеріал контактуючих поверхонь; 2 – шар окислів або захисних плівок; 3 – мастильний матеріал у вигляді адсорбованих молекул.

Рисунок 5.5 – Модель мастильної плівки за граничного тертя

Режиму рідинного тертя відповідає ділянка «cd» кривої $f = \varphi(\lambda)$. За цього виду тертя деталі пари тертя повністю розділяються шаром мастила, що виключає їх зношування через тертя, оскільки весь процес тертя переноситься в шар рідини. Тиск рідини в мастильному шарі виникає внаслідок відносного руху поверхонь деталей вузла тертя (гідродинамічне чи газодинамічне мащення) або під дією зовнішнього джерела тиску (газостатичне чи гідростатичне мащення). Гідродинамічними ефектами пояснюється деяке зростання

коефіцієнта тертя на ділянці «cd». Опір руху деталей вузла тертя за рідинного тертя визначається напруженням зсуву шарів рідини один відносно одного. За помірних зовнішніх навантажень для широкого класу рідин напруження зсуву τ_s визначається законом Ньютона

$$\tau_s = \mu \cdot dw/dh, \quad (5.3)$$

де μ – динамічна в'язкість мастила, Па·с;

dw/dh – градієнт швидкості w потоку рідини в мастильному шарі товщиною h .

В'язкість мастильного матеріалу є важливою фізичною характеристикою рідини, яка визначає процес рідинного тертя. Величина в'язкості залежить від тиску і температури [26]:

$$\mu_p = \mu_0 \cdot e^{\alpha \Delta p}, \quad (5.4)$$

$$\mu_t = \mu_0 \cdot (t_0 / t)^m, \quad (5.5)$$

де μ_0 , μ_p , μ_t відповідно динамічна в'язкість мастила за тиску p_0 (або температури t_0), тиску p та температури t ;

$$\Delta p = p - p_0;$$

α – п'єзокоефіцієнт;

$m = 2 \dots 3$ – для індустріальних мастил [26]. На рідинне мащення також впливає густина ρ мастильного матеріалу, яка зменшується за зростання температури за законом

$$\rho_t = \rho_0 \cdot (1 - \beta \cdot \Delta t), \quad (5.6)$$

де ρ_0 – густина мастила за початкової температури t_0 ;

β – коефіцієнт об'ємного теплового розширення мастила, $(^\circ\text{C})^{-1}$;

$\Delta t = t - t_0$.

У випадках високих навантажень вузлів тертя необхідно також враховувати стисливість рідин, яка впливає на густину за законом

$$\rho_p = \rho_0 / (1 - \varepsilon \cdot \Delta p), \quad (5.7)$$

де ε – коефіцієнт стисливості, Па^{-1} ;

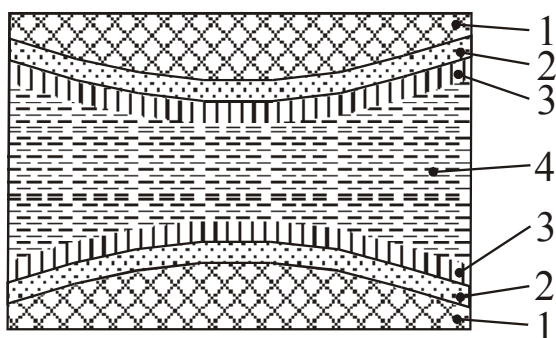
ρ_0 – густина рідини за тиску p_0 .

На практиці мастильні матеріали частіше характеризуються не динамічною, а кінематичною в'язкістю $\nu = \mu/\rho$, залежність якої від тиску та температури з врахуванням (5.4), (5.5), (5.6) та (5.7) виразиться формулами:

$$\nu_p = (1 - \varepsilon \cdot \Delta p) \cdot e^{\alpha \Delta p}; \quad (5.8)$$

$$\nu_t = [\nu_0 / (1 - \beta \cdot \Delta t)] \cdot (t_0 / t)^m. \quad (5.9)$$

Модель мастильної плівки за рідинного тертя зображено на за рідинного тертя зображено на рисунку 5.6.



1 – тверде тіло; 2 – шар окислів або захисних плівок; 3 – адсорбційний шар мастильного матеріалу; 4 – гідродинамічний шар мастильного матеріалу

Рисунок 5.6 – Модель мастильної плівки за рідинного тертя

В реальних вузлах машин має місце змішане тертя, тобто є ділянки контакту деталей, де діє граничне, напіврідинне або рідинне тертя. Під час аналізу змішаного тертя необхідно враховувати фізичні (в'язкість, густину, стисливість і т. п.) та фізико-хімічні (здатність до адсорбції і хемосорбції, хімічну спорідненість присадок й поверхні) властивості рідини, а також фізичні та хімічні властивості деталей вузла тертя. Встановлено [1], що в умовах змішаного тертя товщина мастильного шару перевищує $R_{a\Sigma} = R_{a1} + R_{a2}$ в 2...5 раз. Цей вид тертя переважно залежить від якості мастильного матеріалу, швидкості руху деталей пари тертя та навантаженості зони тертя. Швидкість зсуву мастильного матеріалу із сукупністю з навантаженням зони тертя може в деяких випадках приводити до реологічних аномалій в мастилі, що проявляється через виникнення в ньому рис не ньютонівської рідини, яка не підкоряється закону Ньютона (див. залежність (5.3)).

Під час оцінювання сили змішаного тертя $F_{f_{зм}}$ в першому наближенні можна вважати, що

$$F_{f_{зм}} = F_{f_c} + F_{f_p}, \quad (5.10)$$

де $F_{f_c} = F_n \cdot f_c$ – сила сухого тертя;

f_c – коефіцієнт сухого тертя;

F_n – нормальне навантаження вузла тертя;

$F_{f_p} = f_p \cdot F_n$ – сила рідинного тертя;

$f_p = K \cdot \tau_{sm} / p$ – коефіцієнт рідинного тертя [1] (тут K – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує геометрію контакту тертя);

$\tau_{sm} = \mu \cdot w_m / h_m$ – середнє напруження зсуву в рідині;

w_m – середня швидкість руху в зазорі мастильного матеріалу;

h_m – середня товщина мастильного шару;

$p = F_n / A_f$ – середній тиск мастильного матеріалу на площі тертя A_f .

Розділивши праву та ліву частини формули (5.10) на F_n , отримаємо вираз для коефіцієнта змішаного тертя:

$$f_{зм} = f_c + f_p = f_c + K \cdot \mu \cdot w_m \cdot A_f / (h_m \cdot F_n). \quad (5.11)$$

5.2 Старіння мастильних матеріалів

Під дією теплоти, що виділяється під час роботи вузлів тертя машин, кисню повітря та інших зовнішніх факторів, мастило у вузлах тертя старіє. Пил, металеві частинки, паливо, вода та інші забруднення погіршують експлуатаційні властивості мастильних матеріалів, які визначаються їх хімічним складом. Окислення, термохімічні процеси та сторонні речовини змінюють його хімічний склад, що призводить до зміни його експлуатаційних характеристик. Розглянемо більш детально вплив на властивості мастила термохімічних процесів, окислення та домішок.

Термохімічні процеси (thermochemical process), визиваючи теплове розкладання, дегідрування та осмолювання частини вуглеводневих компонентів мастила, знижують в його складі вміст найбільш летучих фракцій, що приводять до збільшення молекулярної маси, в'язкості та густини мастила, змашувальні властивості якого різко погіршуються.

Ступінь старіння мастила можна оцінювати за зміною його кольору, оскільки смоли, які утворюються в процесі старіння, мають чорний колір.

Під час **окислення** мастила, внаслідок приєднання до найменш стійких компонентів мастила кисню, утворюються продукти окислення, частина з яких має кислотний характер. Окислене мастило стає агресивним середовищем відносно металевих деталей вузла тертя та сприяє їх корозії. Процес окислення може мати дегідрувальний характер, оскільки кисень, забираючи у вуглеводів атоми водню, утворює з ними воду. Вільні зв'язки, які виникли внаслідок цього процесу, сприяють об'єднанню дегідрованих молекул в хімічні сполуки з великою молекулярною масою, тобто стимулюються таким чином типові реакції

смолоутворення внаслідок конденсації. Якщо в цих реакціях беруть участь молекули, що мають в своєму складі атоми кисню, то утворюються смоли з кислотними властивостями.

З навколишнього середовища внаслідок зношування та під час корозії трубопроводів і місткостей в мастильний матеріал потрапляють сторонні речовини (домішки) у вигляді пилу, абразивних продуктів зношування, води, палива та ін. Тверді мінеральні частинки цих забруднень стають центрами, на яких адсорбуються смолисті продукти окислення та утворюються міцели. Ці міцели сприяють виникненню колоїдних фаз шламу в мастилі. Стабілізація колоїдних шламів та емульгування забруднень інтенсифікуються, якщо в мастильному матеріалі є вода, продукти корозії, полярні сполуки та поверхнево активні речовини (ПАР). Внаслідок цих процесів відбувається **старіння мастила** (lubricant aging), за якого змінюється його хімічний та фазовий склад.

Зі старінням мастила можна боротись шляхом повної або часткової його заміни чи очищенням його від продуктів старіння фільтрами. Добавлянням в мастильний бак свіжого мастила процес старіння загальмовується, оскільки знижується концентрація продуктів старіння, а фільтри можуть видаляти частину цих продуктів. Більш докладну інформацію про мастильні матеріали, способи мащення та ущільнення вузлів тертя машин можна знайти в праці [27].

6 МЕТОДИ ОЦІНЕННЯ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ТЕРТЯМ

6.1 Методи оцінення фрикційних властивостей матеріалів

Для того щоб вибрати оптимальні для заданих умов роботи матеріали тертя, необхідно знати їх фрикційні властивості. Інформацію про ці властивості отримують під час проведення експериментальних досліджень та випробувань матеріалів тертя. Фрикційні матеріали оцінюють переважно за трьома методами, а саме:

- 1) за геометричними, фізичними та механічними характеристиками;
- 2) за власне фрикційними характеристиками пар твердих тіл вузла тертя;
- 3) за результатами випробування вузлів тертя машин на стендах і в реальних механізмах.

Результати, які отримують за кожним з цих методів, не завжди збігаються та бувають неоднозначними. Причиною цього є формування в зоні контакту третього тіла (за Крагельським І. В.), природа та властивості якого залежать від властивостей поверхонь контакту, доступу навколишнього середовища в зону фрикційної взаємодії та температури, яка розвивається в зоні контакту. Перераховані обставини суттєво ускладнюють методи та обладнання для експериментального оцінювання фрикційних властивостей матеріалів пар тертя.

Мікрогеометричні характеристики поверхонь твердих тіл – деталей вузла тертя – визначають шляхом зняття профілограм. Профілограми знімають з декількох (не менше п'яти) ділянок поверхні. Для профілеграфування вибирають ділянки, які є найбільш характерними для досліджуваної поверхні. Довжина профілограми, знятої з кожної ділянки, має бути не менше базової довжини, що відповідає величині шорсткості цієї поверхні. Якщо на профілограмі відмічається суттєва хвилястість, то довжину профілограми кожної ділянки зменшують з метою виключення впливу хвилястості, а кількість ділянок збільшують. За результатами обробки профілограм визначають параметри мікрогеометрії поверхні.

Під час оцінювання параметрів тертя та зношування поверхонь деталей вузлів тертя потрібно знати фактичну площу контакту (ФПК).

Для визначення ФПК в лабораторних і у виробничих умовах використовують три групи методів: інформаторів, оптичних та електричних. Під час застосування методу інформаторів як інформатори використовують люмінесцентні фарби (luminescent paint), вугільні та прозорі плівки (пудри), радіоактивні речовини, тонку фольгу та дріт малих діаметрів [18]. Інформатори в процесі контактування та силової взаємодії змінюють свою форму та розміри, змінюють властивості контактуючих поверхонь або залишають на них сліди, за якими оцінюють величину ФПК.

Точність і достовірність методу інформаторів, переважно, визначається товщиною їх шару, яка має бути в декілька раз меншою висоти мікронерівнос-

тей. В іншому випадку мікрозападини будуть заповнені інформатором, що дасть змогу виявити лише ті зони контакту, вершини мікронерівностей яких більше товщини шару інформатора. Для інформаторів, які практично використовуються, товщина шару становить 0,01...50 мкм [18].

Розглянемо більш детально метод інформаторів.

1. Метод використання люмінесцентної фарби [28]. Фарба тонким шаром (0,1...0,01 мкм) наноситься на одну з контактуючих поверхонь. Ця фарба має певні в'язко-пластичні, адгезійні та оптичні властивості, які дозволяють без спотворення передавати інформацію про фактичний контакт в широкому діапазоні діючих в контакті тисків. Інформацію про контакт отримують у вигляді відтиску зон контакту внаслідок перенесення фарби з однієї поверхні на іншу. Це перенесення може здійснюватись як на попередньо пофарбовану поверхню контртіла, так і не фарбовану. Таким чином можна отримувати негативне та позитивне зображення відтисків зон контакту. ФПК, отримана таким чином, вимірюється та фотографується методами люмінесцентного аналізу. Фарби, які використовуються у цьому методі, є розчинами каніфолі, олеїнової кислоти та дефектоля золотисто-зеленого в бензолі [18].

2. Метод вугільних плівок [18, 21]. Цей метод ґрунтується на руйнуванні на плямах торкання тонкого шару напиленої у вакуумі плівки графіту. Наносять плівку таким чином. Поверхню металу покривають тонким шаром розчину вазеліну в чотирихлористому вуглєці ($\rho = 10 \text{ кг/м}^3$). Після випаровування леткого розчинника на поверхні залишається тонкий шар (0,01...0,015 мкм) вазеліну, на який шляхом випаровування спектрально чистих вугільних електродів електричною дугою, що горить у вакуумній камері (куди поміщається і зразок вкритої вазеліном поверхні), наноситься плівка графіту. Напилені таким способом плівки мають тонку аморфну структуру, достатньо контрастні та точно відбивають мікрорельєф поверхні. Цей метод дозволяє легко візуально спостерігати плівки товщиною в тисячні частки мікрометра, не потребує складного устаткування, має високу розрізняльну здатність та дає змогу визначити ФПК на поверхнях з шорсткістю $R_a = 0,08 \dots 0,16$ мкм.

3. Метод прозорих плівок (transparent film). Це метод визначення ФПК за допомогою целюлозної плівки товщиною 25 мкм, що наноситься на досліджувану поверхню. Під час деформування плівки на точках контакту вона втрачає прозорість, коли її товщина зменшиться до 1 мкм. Таким чином за зонами потемніння плівки можна оцінити розмір ФПК.

4. Метод радіоактивних ізотопів – фізичний метод дослідження взаємодії матеріалів тертя, який базується на вивченні перенесення та розподілення кількості речовини з природною або штучною радіоактивністю. Цей метод використовується для визначення ФПК (метод перенесення речовини) та неперервної реєстрації процесу зношування деталей.

5. Метод проявлення. Багатьма дослідженнями [18] встановлено, що будь-яка перебудова поверхні з метою створення більш упорядкованої структури, як правило, знижує каталітичну активність поверхні, а розпушування поверхні

(диспергувальна дія), навпаки, підвищує цю активність внаслідок збільшення площі контакту та зростання активних ділянок. Електрохімічні процеси активізуються на ділянках, де діють контактні напруження. Встановлено [18], що деформації та напруження знижують електродний потенціал і прискорюють корозію. Ці властивості поверхні можуть бути використані для знаходження місць контакту. Чисті металеві поверхні за наявності певних речовин утворюють захисні плівки, наприклад, відносно заліза з розчину, що вміщує іони золота Au, міді Cu чи срібла Ag, на місцях контакту осаджуються ці метали.

Методом проявлення інформація про ФПК може бути отримана під час використання таких процесів [18]:

- утворення фосфатних плівок на сталі. Недоліком цього способу є те, що отримані фосфатні плівки розпушені, мають великокристалічну структуру та мало підходять для виявлення тонкої структури поверхні контакту;

- кислотне оксидування, яке дає тонкі дрібнокристалічні плівки, але має високу контрастність зображення;

- міднення поверхні за допомогою розбавлених розчинів солей $CuSO_4$, $CuCl_2$ та $Cu(NO_3)_2$.

- міднення з екранувальною плівкою – це комбінований спосіб визначення ФПК, який є сполученням методів відбитка зони контакту за допомогою тонких плівок, що друкуються, та проявлення зони контакту вибірково осадженням міді. Визначення зони контакту та обробку інформації про контакти виконують за допомогою звичайних мікроскопів, робоча зона яких освітлюється поляризованим світлом.

З метою встановлення достовірності результатів, вимірювання ФПК здійснюють різними методами, так, наприклад, ФПК, знайдені методом люмінесцентних та металевих плівок дають розходження не більше $\pm 5\%$ [18].

Оптичні методи визначення ФПК можна розділити на дві групи: 1) обидва взаємодіючі тіла прозорі; 2) прозоре тільки одне з тіл. Ці методи дозволяють оцінювати ФПК не тільки в статичі, але й в процесі роботи вузла тертя, а також спостерігати цей процес візуально.

Під час використання першої групи оптичних методів, зразки пари тертя готують у вигляді прозорих моделей [18], які під час проведення досліджень навантажують нормальною силою F_n . В напрямку дії сили F_n через моделі пропускають пучок світла, який відхиляється від цього напрямку тільки в місцях, де немає взаємодії поверхонь моделей тіл, оскільки світло переходить із середовища з більшою густиною в середовище з меншою густиною (повітря).

Спостерігаючи деталі на просвіт, візуально або на фото визначають ФПК. Цей метод можна використати тільки для поверхонь з великою шорсткістю (грубих), коли має місце значне розсіювання світла в шорсткому шарі поверхонь. Друга група оптичних методів ґрунтується на явищі порушення повного внутрішнього відбиття світла на ділянках контакту оптично прозорого матеріалу з непрозорим.

Принципову схему типового приладу, побудованого на використанні цього явища, зображено на рисунку 6.1 [18].

Прилад виконано на базі мікроскопа МВТ

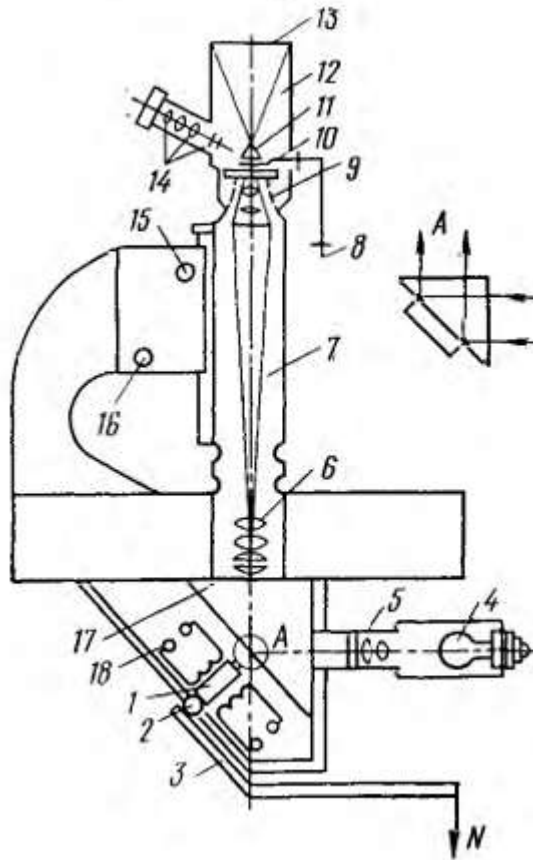


Рисунок 6.1 – Схема приладу для вимірювання ФПК

Зразок 1 вставляється в спеціальну оправку і притискається за допомогою важільної системи 3 через кульку 2 до призми 17. Освітлюється зразок лампою розжарювання 4 з конічним тілом розжарювання. В корпусі освітлювача розміщені лінза та діафрагма поля 5. Світлові промені від лампи 4 потрапляють на призму 17 внутрішнього відбиття (див. місцевий вид А), проходять через об'єктив 6 і потрапляють в окуляр 9. Маховичками 15 та 16, розташованими на корпусі мікроскопа, виконується грубе та точне настроювання мікроскопа. До тубуса 7 мікроскопа прикріплюється мікрофотонасадка 12, оптична система якої складається із призми 11 і системи лінз 14, що використовуються для наведення чіткості зображення ФПК. Натисканням на кнопку спускового механізму 8, важелем 10 призма 11 відводиться від ходу світлових променів і зображення ФПК фокусується на фотопластинку 13. Вважаючи, що світловий потік є пропорційним площі контакту, будують тарувальний графік, за яким розраховують ФПК. Для безпосереднього вимірювання ФПК на окуляр жорстко закріплюють спеціальну насадку з фотоелементом. Під час вивчення температурної залежності ФПК, зразок 1 нагрівають тепловими елементами 18. Розглянутий прилад дозволяє досліджувати залежність ФПК від навантаження, часу контактування та температури.

Контакт твердих тіл залежно від співвідношення ФПК та НПК деякою мірою є проникним для ультразвукових хвиль. Здатність твердих тіл проводити ультразвук використовується для *акустичного методу* дослідження контакту твердих тіл [18]. Акустичний метод застосовується для дослідження ФПК оптично прозорих та непрозорих матеріалів в статиці і під час відносного переміщення тіл пари тертя.

Електричні методи оцінювання ФПК ґрунтуються на змінній величині перехідного електричного опору стику поверхонь внаслідок збільшення під навантаження числа точок контакту [26]. Як і оптичні, електричні методи дозволяють оцінювати змінення ФПК без рознімання стику досліджуваних зразків, але цими методами неможливо з необхідною точністю визначити величину ФПК, оскільки для розрахунків потрібно знати число одиничних контактів в загальній зоні контакту. Електричні методи також не вирішують питання про форму, розміри та структуру ФПК.

6.2 Класифікація установок для випробування матеріалів тертям

Усі установки [18] для випробування матеріалів тертям можна розділити на два класи за кінематичною ознакою:

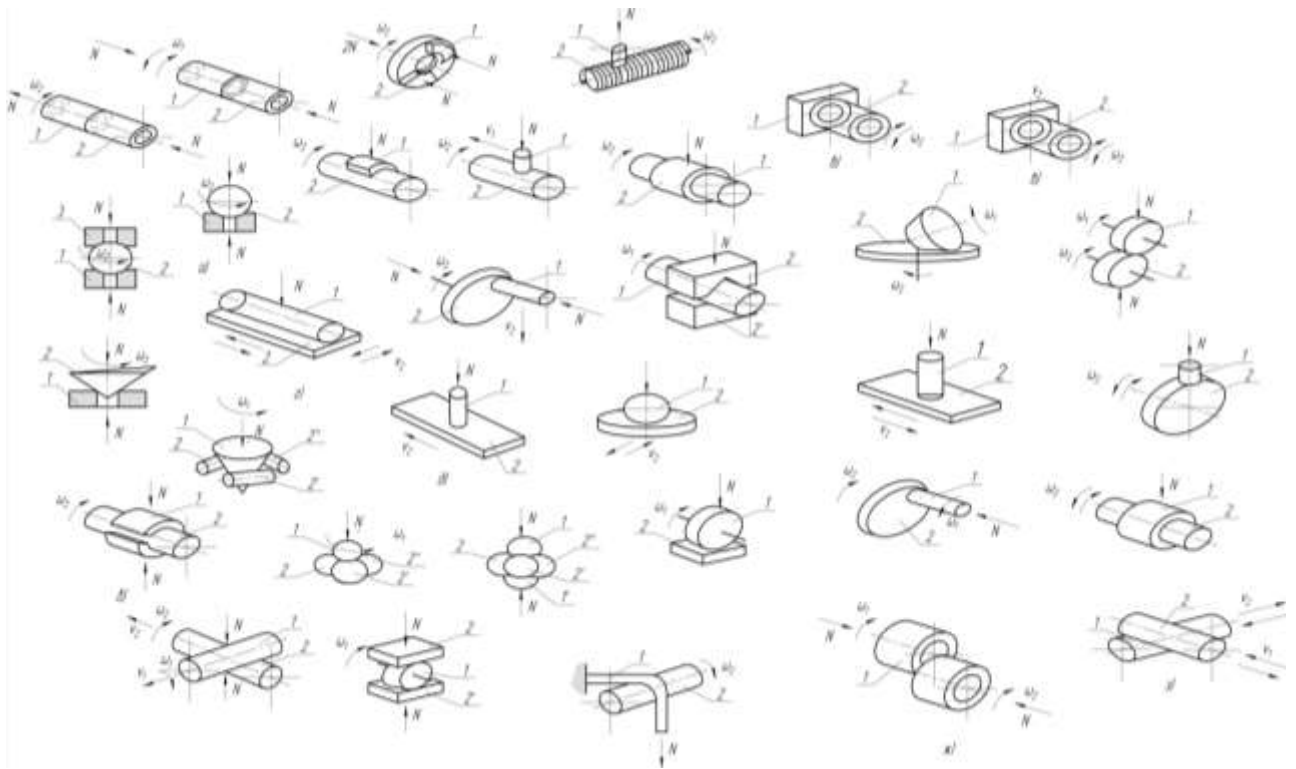
1) однонаправленого відносного переміщення; 2) знакозмінного відносного переміщення. Установки кожного з цих класів ділять на дві групи – машини торцевого тертя та машини тертя з контактом по твірній. Кожна група також ділиться на дві підгрупи за коефіцієнтом взаємного перекриття K_{en} : а) $0,5 < K_{en} \leq 1$; б) $0 \leq K_{en} < 0,5$.

Таким чином, всього може існувати вісім різних типів машин, які дозволяють моделювати різні види руйнування поверхонь тертя, а також виявляти вплив окремих факторів, зокрема фізико-хімічних явищ, на процеси тертя та зношування (таблиця 6.1, рис. 6.2, а), б), в), г), д), е), ж), з).

Таблиця 6.1 – Класифікація установок для випробування матеріалів тертям

	Відносне переміщення (див. рисунок 6.2)			
	Одно направлене (клас I)		Знакозмінне (клас II)	
	Торцеве тертя	Тертя по твірній	Торцеве тертя	Тертя по твірній
$0,5 < K_{en} \leq 1$	а	б	в	г
$0 \leq K_{en} < 0,5$	д	е	ж	з

Характери руйнування поверхонь за однонаправленого та знакозмінного переміщення різко відрізняються. Наприклад, зворотно-поступальний рух призводить до значного зношування (фретінг-корозія), а змінення коефіцієнта K_{en} змінює величину зношування на декілька порядків. Торцеве тертя та тертя по твірній дають різний ефект в умовах граничного мащення, оскільки міняються умови утворення і руйнування мастильних плівок.



1 – тіло; 2 – контртіло; F_n – нормальне навантаження; ω_1, ω_2 – відповідно кутові швидкості тіла та контртіла; v_1, v_2 – лінійні швидкості тіла і контртіла

Рисунок 6.2 – Схеми контактування тіла (1) і контртіла (2) в установках для випробування матеріалів тертям

З метою моделювання різних режимів навантаження, теплового впливу, швидкості прикладення навантаження тощо на характер взаємодії тіл тертя, кожна установка може бути обладнана різними вимірювальними приладами та пристроями, що дозволяють змінювати той чи інший параметр в потрібному діапазоні.

На основі схем контактування, поданих на рисунку 6.2, розроблено ряд типових машин тертя [18, 21], які використовуються для різних фрикційних випробувань, наприклад, схеми а), б), в) застосовуються для моделювання фрикційних спряжень з вищими кінематичними парами (зубчасті колеса, підшипники кочення та ін.), визначення фрикційної теплостійкості матеріалів із зношування матеріалів за великих навантажень.

Детально з методами моделювання трибологічних процесів та фрикційних випробувань матеріалів можна ознайомитись за працями [1, 2, 10, 18, 21, 28], де подано різноманітну методичну, нормативну та довідкову інформацію з питань тертя та зношування деталей машин.

7 ПРАКТИКУМ

З метою закріплення основних положень дисципліни «Триботехніка машинобудівної галузі» і набуття практичних навиків розв'язування задач за тематикою її теоретичних розділів, «практикум» посібника, на нашу думку, доцільно та методично правильно буде викласти у чотирьох підрозділах: 1) перелік запитань для самоперевірки набутих здобувачами теоретичних знань в процесі вивчення дисципліни, які для зручності користування викладені по розділах посібника; 2) практичне закріплення основних положень дисципліни шляхом розв'язування задач за тематикою розділів дисципліни; 3) приклади розв'язування задач за тематикою розділів дисципліни, з метою полегшення виконання підрозділу 2) практикуму; 4) для контролю рівня набутих знань і підготовки до складання іспиту з дисципліни здобувачам рекомендуються типові тести за тематикою розділів дисципліни.

7.1 Перелік запитань для самоперевірки

1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ОЗНАЧЕННЯ ТРИБОТЕХНІКИ

- 1.1. Що вивчають трибологія та триботехніка?
- 1.2. З яких основних розділів складається трибологія?
- 1.3. Назвіть основні наукові напрямки розвитку трибології на сучасному етапі.
- 1.4. Що розуміють під поняттям кристалічної структури?
- 1.5. Які види зв'язку є між структурними елементами кристала?
- 1.6. Дайте означення ковалентного, іонного, водневого та металевих зв'язків.
- 1.7. На які види діляться міжмолекулярні сили?
- 1.8. Схематично зобразіть і наведіть коротку характеристику основних типів кристалічних ґраток металів.
- 1.9. Які властивості твердих тіл відносяться до структурно-чутливих?
- 1.10. Яким чином класифікують дефекти кристалічної ґратки?
- 1.11. Зобразіть залежність потенціальної енергії атома твердого тіла від міжатомної відстані і поясніть цю залежність.
- 1.12. Яка фізична суть фонона?
- 1.13. Які дефекти кристалічної ґратки відносять до точкових ?
- 1.14. Запишіть залежність для розрахунку числа вакансій в кристалі за заданої температури.
- 1.15. За якою залежністю можна оцінити число проникнень надлишкових атомів в кристалі?
- 1.16. Які лінійні дефекти кристалічної ґратки називають крайовими та гвинтовими дислокаціями?
- 1.17. В чому полягає різниця між краєвою та гвинтовою дислокацією?
- 1.18. Що характеризує вектор Бюргерса?
- 1.19. Що розуміють під поняттям дилатації?

- 1.20. Як позначаються позитивна та негативна краєві дислокації?
- 1.21. За якими механізмами може здійснюватись рух дислокацій переповненням?
- 1.22. Що розуміють під поняттям ковзання дислокацій?
- 1.23. Що розуміють під поняттям густини дислокацій?
- 1.24. Яке явище називають наклепом ?
- 1.25. Зобразіть залежність напруги зсуву в кристалі від густини дислокацій і поясніть цю залежність.
- 1.26. Виведіть залежність для розрахунку максимально можливої напруги зсуву під час деформування ідеального кристала.

2 ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ТВЕРДИХ ТІЛ. МАКРО- ТА МІКРОГЕОМЕТРІЯ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- 2.1. Які фізичні процеси називають адсорбцією та десорбцією?
- 2.2. Що розуміють під поняттям хемосорбції?
- 2.3. В чому полягає відмінність між адсорбцією і абсорбцією?
- 2.4. Яке явище природи називають ефектом Ребіндера?
- 2.5. Схематично зобразіть модель будови ПШ твердого тіла та поясніть цю модель.
- 2.6. Як змінюється мікротвердість ПШ під час оброблення деталей і в процесі їх експлуатації?
- 2.7. Що розуміють під третім тілом під час контакту двох твердих тіл?
- 2.8. Які відхилення профілю поверхні деталі називають технологічними та експлуатаційними?
- 2.9. Які відхилення поверхні тіла від номінального профілю відносять до макровідхилень?
- 2.10. Які дефекти кристалічної ґратки; відносяться до точкових ?
- 2.11. Які причини появи технологічної та експлуатаційної хвилястості поверхні деталі?
- 2.12. Якими величинами кількісно характеризують хвилястість поверхні?
- 2.13. Дайте означення шорсткості поверхні.
- 2.14. В чому полягає різниця між технологічною та експлуатаційною шорсткістю поверхні деталі?
- 2.15. Якими величинами кількісно оцінюють шорсткість поверхні?
- 2.16. Що розуміють під субмікрошорсткістю поверхні деталі?
- 2.17. Як будують опорну криву профілю поверхні деталі? Яка мета побудови цієї кривої?
- 2.18. Наведіть означення номінальної, контурної та фактичної площ контакту двох твердих тіл.
- 2.19. Що розуміють під насиченим та ненасиченим контактами твердих тіл?
- 2.20. За якими залежностями можна оцінити ФПК за ненасиченого та насиченого контактів твердих тіл?

2.21. За якими залежностями можна оцінити ФПК та зближення поверхонь за пружного та пластичного ненасиченого контактів твердих тіл?

3 ОСНОВНІ ЗАКОНИ ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ

- 3.1. Яке явище природи називають зовнішнім тертям?
- 3.2. На які види ділиться зовнішнє тертя?
- 3.3. Наведіть залежності, що характеризують умови реалізації сухого тертя ковзання.
- 3.4. Наведіть залежність сил зовнішнього тертя від величини зміщення контактуючих тіл та поясніть цю залежність.
- 3.5. Запишіть залежності для коефіцієнта тертя ковзання у формі законів Леонардо да Вінчі – Амонтона та Кулона і поясніть їх відмінність.
- 3.6. Сформууйте основні закони зовнішнього тертя, запропоновані Кулоном.
- 3.7. Поясніть фізичну суть молекулярно-механічної природи зовнішнього тертя.
- 3.8. За якими залежностями можна оцінити молекулярну та деформаційну складові сили тертя окремої мікронерівності?
- 3.9. Що розуміють під поняттями кута, конуса та круга тертя?
- 3.10. Наведіть означення коефіцієнта тертя кочення.
- 3.11. Що розуміють під поняттям коефіцієнта опору коченню?
- 3.12. За яких умов може здійснюватись чисте кочення та кочення з ковзанням?
- 3.13. Які особливості має тертя між тілами під час удару?
- 3.14. Які види фрикційної взаємодії між тілами можуть мати місце під час удару?
- 3.15. Як впливає попереднє зміщення під час удару на залежність відношення ударних імпульсів від тангенціальної швидкості удару?

4 ЗНОШУВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

- 4.1. Яке явище називають зношуванням твердих тіл?
- 4.2. Наведіть класифікацію способів утворення частинок зносу.
- 4.3. Що називають фрикційним зв'язком?
- 4.4. На які види ділять фрикційні зв'язки?
- 4.5. Наведіть з поясненням класифікацію порушення фрикційних зв'язків.
- 4.6. Як залежить величина зносу від часу або шляху роботи вузла тертя?
- 4.7. Запишіть і поясніть залежності для визначення лінійної, об'ємної і масової інтенсивностей зношування.
- 4.8. Запишіть основне рівняння зношування. Які основні параметри поверхонь контактуючих тіл пов'язує це рівняння?
- 4.9. Що розуміють під зносостійкістю деталі?
- 4.10. На скільки класів і розрядів ділять зносостійкість деталей?
- 4.11. Як виконується визначення класу зносостійкості деталі?

- 4.12. Як умовно позначається зносостійкість виробу?
- 4.13. Наведіть класифікацію видів зношування і дайте їх коротку характеристику.
- 4.14. Який процес називають пітінгом? Яким параметром кількісно характеризують пітінг?
- 4.15. Дайте коротку характеристику водневого зношування.
- 4.16. Якими процесами супроводжується водневе зношування?
- 4.17. На які види поділяють водневе зношування? Наведіть їх коротку характеристику.
- 4.18. За яких умов роботи пар тертя виникає кавітаційне зношування?
- 4.19. Які умови обумовлюють виникнення нових структур у природі?
- 4.20. Яке явище природи називають вибіркоvim перенесенням?
- 4.21. Що називають сервовітною плівкою? Які властивості має ця плівка?
- 4.22. Назвіть прізвища вчених, що відкрили явище вибіркового перенесення.
- 4.23. Перерахуйте матеріали пар тертя та мастильні матеріали, які сприяють виникненню сервовітної плівки.
- 4.24. Які умови роботи вузла тертя необхідно забезпечити, щоб виникло явище вибіркового перенесення?

5 ЗМАЩЕННЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ МАШИН

- 5.1. Для чого потрібно змащувати вузли тертя?
- 5.2. Які властивості потрібно мати мастильним матеріалам?
- 5.3. Чим обумовлена змочувальна дія мастила?
- 5.4. Що розуміють під поняттям граничний шар рідини?
- 5.6. Наведіть схему фрикційного контакту за змащування поверхонь тертя.
- 5.7. Що розуміють під поняттям характеристики режиму роботи підшипника ковзання?
- 5.8. Наведіть залежність коефіцієнта тертя від характеристики режиму і поясніть цю залежність.
- 5.9. Запишіть залежності динамічної та кінематичної в'язкості від температури і тиску.
- 5.10. За якою залежністю можна оцінити коефіцієнт тертя у разі змішаного тертя?
- 5.11. Якими процесами викликається старіння мастильних матеріалів?
- 5.12. Якими засобами можна загальмувати процес старіння мастила?

6 МЕТОДИ ОЦІНЕННЯ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ТЕРТЯМ

- 6.1. За якими методами оцінюють фрикційні матеріали?
- 6.2. Як визначають мікрогеометричні характеристики поверхонь контакту деталей вузла тертя?

6.3. Які методи використовуються для експериментального визначення ФПК? Наведіть коротку характеристику цих методів.

6.4. Зобразіть схему приладу для вимірювання ФПК оптичним методом повного внутрішнього відбиття світла.

6.5. Які принципи покладено в основу класифікації установок для випробування матеріалів тертя?

6.6. Зобразіть схеми взаємодії тіла та контртіла в установках вимірювання матеріалів тертя за однонаправленого торцевого тертя.

7.2 Типові умови задач для практичних занять і самостійної роботи для здобувачів вищої освіти

Задача № 1

Здійснюється поздовжнє точіння деталі різцем з ріжучою частиною з твердого сплаву ВК8. Радіус заокруглення біля вершини різця $r_{pz} = 15$ мкм. Точіння здійснюється з подачею $s_n = 0,1$ мм. Оцінити технологічну шорсткість R_z , якщо сумарне відхилення від розрахункової висоти H_p мікронерівностей $\Delta H = 0,02$ мм (обумовлено різними факторами процесу точіння – відновленням матеріалу деталі після зрізання, пластичною деформацією в зоні утворення стружки, зрізанням стружкою, що сходить, вершин мікронерівностей, тертям задньої поверхні різця по обробленій поверхні деталі, зміненням початкового контуру ріжучого пругу різця внаслідок його зношування та вібраціями системи ВПД). За табл. 1 співвідношень параметрів R_a , R_{max} , і R_z та базової довжини L визначити цю довжину та методом пропорції орієнтовне значення R_a .

Таблиця 1

R_a , мкм	$R_z = R_{max}$, мкм	L , мм
До 0,025	До 0,10	0,08
Зв. 0,025 до 0,4	Зв. 0,10 до 1,6	0,25
Зв. 0,4 до 3,2	Зв. 1,6 до 12,5	0,8
Зв. 3,2 до 12,5	Зв. 12,5 до 50	2,5
Зв. 12,5 до 100	Зв. 50 до 400	8

Задача № 2

Проаналізувати змінення розрахункової висоти мікронерівностей під час точіння $H_p = s_n^2 / (8r_{pz})$ (тут s_n – подача різця; r_{pz} – радіус заокруглення біля вершини різця) для випадків: 1) $s_n = var$, $r_{pz} = const$ на основі графічної залежності відносних величин $\varphi(H_p / r_{pz}) = \psi(s_n / r_{pz})$ для точок – $s_n = (0; 0,5r_{pz}; r_{pz}; 1,5r_{pz}; 2r_{pz}; 2,5r_{pz})$; 2) $s_n = const$, $r_{pz} = var$ на основі графічної залежності відносних величин $\varphi(H_p / r_{pz}) = \psi(s_n / r_{pz})$ для точок – $r_{pz} = (0; 0,5s_n; s_n; 1,5s_n; 2s_n; 2,5s_n)$. Визначити область мінімальних значень H_p залежно від співвідношення s_n / r_{pz} , а також за якого цього співвідношення висота мікронерівностей буде однаковою залежно від s_n і r_{pz} ?

Задача № 3

Два шорстких тіла, оброблених струганням, перебувають в стані пружного насиченого контакту. Матеріал тіл – сталь з $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па. На КПК діє контурний тиск $p_c = 10$ МПа, комплексний параметр Непомнящого $\Delta = R_{max}/(Rb^{1/b}) = 0,049$ (параметри шорсткості: $v = 2,00$; $b = 2,00$), коефіцієнт Пуассона $\mu_n = 0,3$. Тіла навантажено нормальним зусиллям $F_n = 10000$ Н.

Визначити: ФПК, відносне зближення ε контактуючих поверхонь, коефіцієнт α_τ напруженого стану.

Задача № 4

Два шорстких тіла перебувають в стані ненасиченого пластичного контакту. Контакт тіл навантажено нормальним зусиллям $F_n = 20000$ Н, що створює контурний тиск $p_c = 10$ МПа. Твердість тіл за Брінеллем 2000 НВ (2000 МПа). Оцінити КПК A_c , ФПК A_r та відносне зближення ε контактуючих поверхонь тіл.

Задача № 5

Визначити зближення h та контурний тиск p_c за яких буде реалізовано зовнішнє тертя ковзання між двома тілами вузла тертя, якщо твердість матеріалів тіл $H_{HB} = 2000$ МПа, дотичне напруження в зоні ФПК $\tau_n = 50$ МПа, а параметри: $\Delta = 1,4 \cdot 10^{-1}$; $v = 2,00$; $R = 425$ мкм.

Задача № 6

Дві деталі, виготовлені зі сталі 45, рухаються одна відносно одної в режимі сухого тертя ковзання. Фізико-механічні властивості сталі 45: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа – модуль пружності; $\sigma_m = 360$ МПа; $\tau_n = 0,5 \sigma_m$ – відповідно напруження текучості та дотичне напруження в зонах фактичного торкання деталей. Середнє зближення мікронерівностей в області однієї мікронерівності $h_i = 0,18$ мм. Середньо геометричний радіус мікронерівності $R = 425$ мкм. Коефіцієнт Пуассона $\mu_n = 0,3$. Твердість поверхні деталей $H_{HB} = 2000$ МПа.

Визначити: 1) ФПК мікронерівності за формулою

$$A_{ri} = \pi \cdot R \cdot h_i + 0,9 \cdot \pi \cdot R^{7/6} \cdot h_i^{1/6} \times [H_{HB}(1 - \mu_n^2)/E]^{1/3};$$

2) молекулярну F_{fmi} складову сили тертя мікронерівності та деформаційні F_{fdi} складові елементарної сили тертя за умов пластичного ненасиченого контакту та у випадку пружного деформування, взявши зведений коефіцієнт гістерезисних втрат $\alpha_{ef} = 0,04$. Для визначення молекулярної та деформаційних складових елементарних сил тертя потрібно скористатись формулами, наведеними в конспекті лекцій дисципліни «ТрТ МГ»;

3) молекулярну F_{fmi} складову сили тертя мікронерівності за умов пружного насиченого контакту;

4) повну F_{fi} елементарну силу тертя для умов пластичного ненасиченого та пружного насиченого контактів.

Задача № 7

Досліджується процес тертя між припрацьованими деталями підшипника ковзання, що складається із втулки з бронзи *Бр АЖМц 10-3-1,5* та вала зі сталі *ШХ-15*. Модулі пружності: сталі *ШХ-15* $E_{cm} = 2 \cdot 10^5$ МПа; бронзи *Бр АЖМц 10-3-1,5* $E_{\sigma p} = 7,5 \cdot 10^4$ МПа. Коефіцієнт Пуассона $\mu_n \approx 0,3$, зсувне дотичне напруження $\tau_o = 20$ МПа, п'єзокоефіцієнт молекулярної складової матеріалу контактуючих тіл $\beta = 0,100$ та молекулярна складова коефіцієнта тертя $f_m = 0,12$. Процес тертя проходить без змащення. Молекулярну складову коефіцієнта тертя виразити формулою $f_m = \tau_o / p_r + \beta$ (p_r – фактичний тиск).

Розрахувати: тиск p_r ; α_{ef} – коефіцієнт гістерезисних втрат; сумарний коефіцієнт тертя f ; деформаційну складову f_δ коефіцієнта тертя.

Задача № 8

Легковий автомобіль рухається по сухому асфальту. Процес тертя шин по асфальту характеризується зсувним дотичним напруженням $\tau_o \approx 17 \cdot 10^3$ МПа та п'єзокоефіцієнтом $\beta \approx 0,76$. Тиск повітря в шинах $p_r = 2,1 \cdot 10^1$ МПа. Використовуючи біноміальний закон М. А. Бронівця ($f = \tau_o / p_r + \beta$), розрахувати коефіцієнт тертя шин по асфальту для умов: а) (f_a), наведених в тексті задачі; б) (f_δ) у випадку розлитого по асфальту мастила, за якого $\tau_o \approx 5 \cdot 10^3$ МПа і $\beta \approx 0,76$. Припустивши, що гальмівний шлях пропорційний відношенню f_a / f_δ , оцінити цей шлях l_{ezm} , якщо шлях екстремного гальмування по сухому асфальту $l_{ecc} = 5$ м.

Задача № 9

Опорою вала є підшипник ковзання. Діаметр шипа вала $d_\sigma = 50$ мм. Вал навантажено радіальною силою в точці реакції підшипника $F_r = F_n = 20000$ Н. Підшипник не притертий, змащення відсутнє. Беручи коефіцієнт тертя у випадку плоскої поверхні $f = 0,2$, визначити коефіцієнт тертя f' в обертальній парі, радіус круга тертя r_f , силу F_f та момент T_f тертя.

Задача № 10

Колесо транспортного засобу діаметром $d_k = 0,6$ м котиться по нерухомій поверхні під дією рушійної сили $F_p = 2000$ Н і навантажено нормальною силою $F_n = 10000$ Н. Вважаючи матеріал колеса абсолютно твердим ($E_k = \infty$), розрахувати коефіцієнт k тертя кочення та коефіцієнт f_k опору коченню і визначити роботу A_ϕ рушійної сили F_p за повний оберт колеса.

Задача № 11

Під час кочення транспортного засобу на чотирьох колесах діаметром $d_k = 1,0$ м по нерухомій поверхні коефіцієнт опору коченню одного колеса з абсолютно твердого матеріалу ($E_k = \infty$) $f_k = 0,2$, а сумарний коефіцієнт тертя кочення чотирьох коліс транспортного засобу $k_\Sigma = 0,04$ м. Транспортний засіб навантажено сумарною нормальною силою $F_{n\Sigma} = 200000$ Н, в яку входить і вага засобу. Вважаючи, що $F_{n\Sigma}$ рівномірно розподілена між всіма чотирма колесами

і сумарний коефіцієнт опору коченню всіх коліс $f_{\kappa\Sigma} = 4 f_{\kappa} = 0,8$, визначити загальну рушійну силу $F_{p\Sigma}$ та силу F_p , що припадає на одно колесо транспортного засобу, а також роботу $A_{\varphi\Sigma}$ рушійної сили $F_{p\Sigma}$ за повний оберт всіх чотирьох коліс. Яку роботу $A_{\varphi\Sigma 1000}$ виконає рушійна сила $F_{p\Sigma}$, якщо транспортний засіб проїде відстань $L_{1000} = 1000$ м?

Задача № 12

Під час дослідження процесу тертя дослідних зразків (тіла малого розміру) відбувається процес зношування. З кожної плями контакту ФПК знімається об'єм матеріалу $\Delta V = \Delta h \cdot A_r = i_h \cdot A_r \cdot \bar{d}_2$, де i_h – інтенсивність зношування; A_r – ФПК; $\bar{d}_2 = \bar{d}_1 = \bar{d}$ – середній діаметр плями контакту в напрямку ковзання; \bar{d}_1 – середній діаметр плями контакту в напрямку перпендикулярному до напрямку ковзання. КПК тіла, що ковзає $A_c = A_a = A_f = 6,25 \cdot 10^{-4}$ м² (розмір зразка 25×25 мм²) (тут A_a – НПК A_f – площа поверхні тертя). Тіла навантажені нормальною силою $F_n = 2000$ Н. Процес ковзання відбувається без змащення. Інтенсивність зношування $I_h = 7,3 \cdot 10^{-12}$ (матеріали пари тертя – сталь 45 – сталь 45).

Розрахувати: 1) контурний тиск $p_c = p_a$ (p_a – номінальний тиск) в зоні контакту ковзаючих тіл; 2) шлях тертя L_f , взявши розмір тіла $a = 25$ мм, що зношується в напрямку перпендикулярному до напрямку ковзання; 3) знос тіл ΔH ; 4) питому інтенсивність зношування i_h , взявши $A_r = A_c \cdot p_c / (c \cdot \sigma_m)$, де $c \approx 3$; $\sigma_m = 360$ МПа – напруження текучості для сталі 45; 5) зношений об'єм матеріалу ΔV та товщину віділеного шару Δh ; 6) число N фрикційних зв'язків; 7) середній розмір плями контакту \bar{d}_2 ; 8) загальне число n_r фрикційних зв'язків під час тертя; 9) густину ρ_r плям контакту.

Задача № 13

Відбувається процес чорнового токарного оброблення деталі зі сталі 45. Діаметр деталі $d_d = 80$ мм. Глибина різання $t = 3$ мм, подача $s = 0,6$ мм/об та швидкість різання $v = 67$ м/хв. За таких параметрів різання сила різання $F_z = 4050$ Н. Параметри різця: головний кут в плані $\varphi = 60^\circ$; форма передньої поверхні різця – радіусна з $r_p = 1$ мм; задній кут $\alpha = 12^\circ$. Матеріал ріжучої частини різця – сталь Р18. Ширина контакту різця по передній поверхні $b_p = 0,5$ мм.

Визначити: 1) $A_c = A_a = A_f$; 2) шлях тертя L_f , припустивши, що розмір тіла (передньої поверхні різця), яке зношується в напрямку перпендикулярному до напрямку сходження стружки (напряму ковзання), $a = b_p = 0,5$ мм; 3) знос тіла ΔH , якщо лінійна інтенсивність зношування $I_h = 8 \cdot 10^{-8}$; 4) контурний тиск $p_c = p_a$ (p_a – номінальний тиск) в зоні контакту ковзаючих тіл; 5) ФПК в зоні тертя ріжучого пруга різця, взявши, що $A_r = A_c \cdot p_c / (c \cdot \sigma_m)$, де $c \approx 3$; $\sigma_m = 2000$ МПа – напруження текучості; 5) умовний зношений об'єм матеріалу ΔV та товщину віділеного шару Δh деталі, що точиться й видаляється з кожної плями контакту ФПК; 6) швидкість ковзання v_s , взявши за тривалість процесу ковзання період одного оберт T деталі; 7) швидкість зношування I_r .

Задача № 14

Точіння деталі діаметром $d_d = 60$ мм відбувається з глибиною різання $t = 2$ мм прохідним різцем з головним кутом в плані $\varphi = 60^\circ$ з прямою формою передньої поверхні без використання ЗОР. Матеріал ріжучої частини різця – сталь Р18. Ширина контактної площадки пруга різця $b_p = 0,1$ мм. Швидкість різання $v = 100$ м/хв. Матеріал деталі – сталь 45. ФПК $A_r = 6,75 \cdot 10^{-7}$ м². Сила різання $F_z = 3000$ Н. Швидкість зношування $I_t = 6 \cdot 10^{-8}$ м/с. Визначити: $A_c = A_a = A_f - ?$; $L_f - ?$; v_s за $t_f = T = 0,19 \cdot d_d / v$ (тут d_d – в мм; v – в м/хв) – ?; $I_h - ?$; $\Delta H - ?$; $\Delta V - ?$; $\Delta h - ?$.

Задача № 15

Інтенсивність зношування втулки підшипника ковзання, виготовленого з антифрикційного матеріалу на основі MoS_2 (тверде мастило), під час роботи вала, навантаженого радіальною силою $F_r = 10000$ Н, $I_h = 3,8 \cdot 10^{-10}$. Діаметр вала $d_d = 50$ мм, довжина втулки $l_e = 40$ мм. КПК A_c , НПК A_a та площу тертя A_f визначити як $A_c = A_a = A_f = \pi \cdot d_d \cdot l_e$. Визначити: 1) зносостійкість Z_h матеріалу втулки підшипника; 2) контурний тиск p_c ; 3) мантису lga_k класу зносостійкості, попередньо визначивши за довідником номер K класу зносостійкості.

Задача № 16

Гідродинамічний радіальний підшипник ковзання працює в режимі рідинного тертя. Геометричні параметри підшипника: $d_n = 50$ мм – діаметр підшипникової втулки; $l_e = 40$ мм – довжина втулки підшипника. Підшипник навантажено силою $F_r = 5000$ Н. Змащується підшипник мастилом И-40 А з кінематичною в'язкістю $\nu_{50} = 40$ сСт за робочої температури $t = 50$ °С. Коефіцієнт об'ємного теплого розширення мастила $\beta_m = 8 \cdot 10^{-4}$ °С⁻¹. Густина мастила за температури $t_0 = 20$ °С $\rho_0 = 900$ кг/м³. Вал обертається з кутовою швидкістю $\omega = 50$ с⁻¹. Використовуючи закони Леонардо да Вінчі – Амонтона та Ньютона для крапельних рідин, вивести оціночну формулу для визначення коефіцієнта рідинного тертя f_p в зоні зазору між поверхнями вала та підшипникової втулки. Розрахувати орієнтовне значення f_p , якщо відносний середній зазор між поверхнями вала та втулки $\psi = 0,0005$. Вибрати квалітет точності контактуючих поверхонь підшипника та вала і величину їх шорсткості, за яких забезпечується заданий зазор ψ і рідинний режим тертя в ньому.

Задача № 17

Гідродинамічний радіальний підшипник діаметром цапфи $d_n = 60$ мм навантажено силою $F_r = 6000$ Н. $l_e = 50$ мм – довжина втулки підшипника. Підшипник змащується мастилом з динамічною в'язкістю $\mu_{20} = 0,04$ Па·с та густиною $\rho_0 = 900$ кг/м³ за температури $t_0 = 20$ °С, яка є робочою температурою підшипникового вузла. Характеристика режиму роботи підшипника ковзання $\lambda = 8 \cdot 10^{-7}$ та середній радіальний зазор $\delta_R = 20$ мкм. Визначити: 1) критичну кутову швидкість $\omega_{кр}$ вала, за якої настає рідинний режим тертя з коефіцієнтом f_p ;

2) питоме навантаження p_m ; 3) зміну динамічної в'язкості та характеристики режиму роботи підшипника ковзання за $\omega_{кр}$ у випадку зміни робочої температури підшипникового вузла з $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ до $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$, якщо показник в температурній залежності динамічної в'язкості $m = 2,3$.

Задача № 18

Під час взаємного ковзання двох тіл, навантажених силою $F_n = 2000\text{ Н}$, відбувається процес змішаного тертя – сухого з коефіцієнтом $f_c = 0,15$ та рідинного. В зоні рідинного тертя присутнє мастило з динамічною в'язкістю $\mu_{20} = 0,04\text{ Па}\cdot\text{с}$ та густиною $\rho_{20} = 900\text{ кг/м}^3$ за робочої температури процесу $t_p = 20\text{ }^\circ\text{C}$. Площа тертя $A_f = 3\cdot 10^{-3}\text{ м}^2$. Середня швидкість руху мастила в зазорі $\bar{w} = 2\text{ м/с}$. Середня товщина мастильного матеріалу $h_{сер} = 10\text{ мкм}$. $K = 0,5$ – коефіцієнт геометрії контакту. Знайти коефіцієнти рідинного f_p та змішаного $f_{зм}$ тертя і сили сухого F_{fc} та рідинного F_{fp} тертя і сумарну силу F_{Σ} тертя. Розрахувати кінематичну в'язкість мастила за заданої температури. Як зміниться коефіцієнти рідинного f_{pl} і змішаного $f_{змl}$ тертя та густина мастила ρ_{50} у випадку зростання температури до $t_{pl} = 50\text{ }^\circ\text{C}$, якщо коефіцієнт об'ємного теплового розширення мастила $\beta_m = 8\cdot 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, показник степеня в температурній залежності динамічної в'язкості мастила $m = 2,3$, а $\bar{w} = const = 2\text{ м/с}$ та $h_{сер} = const = 10\text{ мкм}$?

Задача № 19

Під час роботи вузла тертя ковзання механізму в режимі рідинного тертя тиск мастила з кінематичною в'язкістю $\nu_{50} = 40\text{ сСт}$ (за $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$) зріс з $p_0 = 0,5\text{ МПа}$ до $p_t = 1\text{ МПа}$, а температура з $t_0 = 50\text{ }^\circ\text{C}$ до $t = 75\text{ }^\circ\text{C}$. Фізичні параметри мастила: модуль ізотермічної пружності $\kappa = \varepsilon^{-1}$ (тут ε – коефіцієнт стисливості мастила) $\kappa = const = 1,4\cdot 10^9\text{ МПа}$; коефіцієнт теплового об'ємного розширення $\beta_m = const = 9,7\cdot 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; п'єзокоефіцієнт $\alpha = const = 2,36\cdot 10^{-8}\text{ Па}^{-1}$. Показник степеня в температурній залежності кінематичної в'язкості мастила $m = 2,3$. Взевши за умов $t_{0l} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ та $p_0 = 0,5\text{ МПа}$ густина мастила $\rho_{20} = 900\text{ кг/м}^3 = const$ та $\nu_{50} = \nu_0 = const = 40\text{ сСт}$, розрахувати: густина та кінематичну в'язкість мастила залежно від зміни тиску та температури й оцінити рівень відносної зміни від вказаних параметрів ρ і ν :

Задача № 20

В процесі роботи вузла тертя машини виник режим змішаного тертя. Пара тертя ковзання навантажена нормальною силою $F_n = 3000\text{ Н}$. В зоні сухого тертя діє сила тертя $F_{fc} = 450\text{ Н}$, а мастильний матеріал в зоні рідинного тертя тече з середньою швидкістю $\bar{w} = 2,5\text{ м/с}$. Робоча температура мастила у вузлі тертя машини $t_p = 20\text{ }^\circ\text{C}$, за якої густина мастила $\rho_{20} = 880\text{ кг/м}^3 = const$. Середня товщина мастильного шару $h_{сер} = 15\text{ мкм}$, а коефіцієнт геометрії контакту в зоні рідинного тертя $K = 0,6$. Площа тертя ковзаючих тіл $A_f = 2,5\cdot 10^{-3}\text{ м}^2$. Динамічна в'язкість мастила $\mu_{20} = 0,036\text{ Па}\cdot\text{с}$. Визначити: 1) коефіцієнти сухого f_c , рідинного f_p та змішаного $f_{зм}$ тертя; 2) сили рідинного F_{fp} та сумарного F_{Σ} тертя.

Задача № 21

Під час прохідного чорнового точіння сталі 45 різцем з ріжучим пругом зі сталі P18 лінійна інтенсивність зношування різця $I_h = 8 \cdot 10^{-8}$, а швидкість зношування $I_t = 9,6 \cdot 10^{-10}$ м/с. Густина сталі P18 $\rho = 7800$ кг/м³. НПК $A_a = 1,3 \cdot 10^{-6}$ м², $\lambda_f = A_a / A_f = 1,1$ та КПК $A_c = A_a$. Видалений об'єм зношеного матеріалу з ріжучого пруга різця $\Delta V = 3 \cdot 10^{-8}$ мм³. Визначити: 1) швидкість ковзання v_s між різцем і оброблюваною деталлю; 2) тривалість процесу тертя t_f ; 3) масу зношеного матеріалу Δm пруга різця; 4) шлях тертя L_f .

Задача № 22

Токарний прохідний різець з пругом із сталі P18 з радіусною формою передньої прверхні критично зносився по задній поверхні до $h_3 = 2$ мм. Густина сталі P18 $\rho = 7800$ кг/м³. Незношений різець має такі кути: головний кут в плані $\varphi = 60^\circ$; головний передній кут $\gamma = 20^\circ$; головний задній кут $\alpha = 12^\circ$; головний кут загострення $\beta = 90^\circ - (\alpha + \gamma) = 90^\circ - (12^\circ + 20^\circ) = 58^\circ$; допоміжний кут в плані $\varphi_1 = 15^\circ$. Процес чорнового точіння цим різцем здійснюється з глибиною різання $t = 3$ мм. Припустити, що форма зношеного об'єму ΔV матеріалу різця – трикутна призма $ABCDEF$ з такими геометричними параметрами: грані $ACDF$, $ABEF$ та $BCDE$ – прямокутники, а грані ABC і FED – трикутники; довжина ребра $AC = h_3 = 2$ мм; $\angle BCA \approx 90^\circ$; $BE = CD = t \cdot \sin 60^\circ = 3 \cdot \sin 60^\circ = 2,6$ мм.

За таких параметрів, припускаємо, що $\angle BAC = \alpha = 12^\circ$, тоді $BC = ED = AC \cdot \tan \alpha = 2 \cdot \tan 12^\circ = 0,43$ мм. $A_{BCDE} = BE \cdot BC \cdot \sin(90^\circ - 12^\circ) = 2,6 \cdot 0,43 \cdot \sin(90^\circ - 12^\circ) = 1,08$ мм². Визначити: 1) критичний об'єм $\Delta V_{кр}$ зношеного матеріалу різця; 2) шлях тертя, взявши НПК і площу тертя ковзання різця та деталі $A_a = A_f = A_{BCDE}$ і $a \approx BE = CD = 0,43$ мм – розмір зношеного елемента різця в напрямку, перпендикулярному до напрямку ковзання; 3) критичні інтенсивність $I_{hкр}$, знос $\Delta H_{кр}$ і масу зношеного матеріалу Δm пруга різця.

Задача № 23

Підшипник ковзання (втулка) під час роботи з цапфою вала (сталь) навантажено силою реакції вала $F_r = 9600$ Н. Діаметр цапфи вала $d_e = 40$ мм, довжина втулки $l_e = 60$ мм. Зносостійкість цієї пари тертя ковзання $Z_h = 5 \cdot 10^{10}$. Матеріал втулки підшипника – бронзографіт.

Визначити: 1) інтенсивність зношування I_h ; 2) питоме навантаження p_m ; 3) характеристику режиму роботи підшипника λ в режимі рідинного тертя за змащення підшипника мастилом з динамічною в'язкістю $\mu = 0,036$ Па·с та кутовою швидкістю вала $\omega = 300$ с⁻¹; 4) взявши знайдене значення $\lambda = \lambda_{кр}$, знайти відносний мінімальний радіальний зазор ψ_{min} в підшипнику і розмірний δ_{Rmin} , якщо мінімальний коефіцієнт рідинного тертя $f_{pmin} = 5 \cdot 10^{-4}$; 5) взявши колову v_t швидкість вала за швидкість v_s ковзання, оцінити швидкість зношування підшипника I_t .

Задача № 24

Під час роботи вузла тертя механізму контактний тиск на НПК $p_c = 4 \cdot 10^6$ Па. НПК, КПК площа тертя рівні між собою та мають числове значення $A_a = A_c = A_f = 7 \cdot 10^{-4}$ м². Шлях тертя $L_f = 3 \cdot 10^{-2}$ м та знос тіл, що труться, $\Delta H = 1,9 \cdot 10^{-12}$ м. Питома інтенсивність зношування $i_h = 2,5 \cdot 10^{-9}$.

Визначити: 1) лінійну інтенсивність зношування I_h ; 2) розмір a тіла, що зношується, в напрямку перпендикулярному до напрямку ковзання; 3) об'єм матеріалу ΔV , що видаляється із зони тертя тіл; 4) зносостійкість тіл пари тертя Z_h ; 5) ФПК A_r ; 6) умовну товщину зношеного шару Δh та число фрикційних зв'язків N ; 7) середній розмір $\bar{d}_2 = \bar{d}_1 = \bar{d}$ плями контакту в напрямку ковзання; 8) загальне число фрикційних зв'язків n_r на поверхні зношування та густину плям контакту ρ_r .

Задача № 25

В закритому вузлі тертя ковзання (підшипнику), що працює в режимі гідродинамічного підшипника ковзання, через деякий час його роботи τ змінилися тиск з p_0 до $p_\tau = 0,5 p_0$, Па, і температура з $t = t_0$ до $t_\tau = 2t_0$. П'єзокоефіцієнт $\alpha = 3,07 \cdot 10^{-5}$ м² / Н (Па⁻¹) і показник степеня $m = 2,3$ залежно від температури динамічної в'язкості μ_0 мастила. Визначити тиск мастила за нових умов роботи підшипника, а також динамічну в'язкість $\mu_{p\tau}$ мастила, якщо початкова в'язкість $\mu_0 = 3,6 \cdot 10^{-2}$ Па·с.

Задача № 26

Гідродинамічний підшипник ковзання з діаметром цапфи вала $d_e = 40$ мм та довжиною втулки підшипника $l_e = 40$ мм, навантажено силою $F_r = 2000$ Н. Сумарна шорсткість вала $R_{a\Sigma} = R_{a1} + R_{a2} = 3,2$ мкм ($R_{a1} = R_{a2} = 1,6$ мкм). Кутова швидкість вала $\omega = 157$ с⁻¹. Коефіцієнт рідинного тертя $f_p = 5 \cdot 10^{-3}$. Відносна товщина мастильного шару $\bar{h} = h_{сер} / R_{a\Sigma} = 5$. Припускаючи, що «спливання» вала під час настання режиму рідинного тертя відбувається за зростання тиску в зазорі $h_{сер}$ до рівня $p = 2p_m$, де $p_m = F_r / (l_e \cdot d_e)$ – питоме навантаження на підшипник, і, беручи динамічну в'язкість мастила $\mu = 0,04$ Па·с, визначити: 1) середнє напруження зсуву $\bar{\tau}_s$ в зазорі $h_{сер}$, припустивши, що середня швидкість руху мастила в зазорі дорівнює коловій швидкості вала $\bar{w} = 0,5 \cdot \omega \cdot d_e$; 2) безрозмірний коефіцієнт K , що характеризує геометрію контакту тертя; 3) характеристику $\lambda = \mu \cdot \omega / p_m$ режиму роботи підшипника; 4) відносний ψ і розмірний $\delta_R = 0,5 \cdot \psi \cdot d_e$ зазори в підшипнику; 5) площу тертя A_f в підшипнику.

Задача № 27

Під час тривалої роботи радіального гідродинамічного підшипника ковзання з діаметром цапфи $d_y = 50$ мм та довжиною втулки підшипника $l_e = 40$ мм, температура мастила зросла від $t_0 = 20$ °С до $t = 80$ °С. Вал обертається з кутовою швидкістю $\omega = 314$ с⁻¹. Динамічна в'язкість мастила за $t_0 = 20$ °С $\mu_0 = 0,036$ Па·с, показник степеня $m = 2,3$ залежно від температури динамічної в'язкості мастила. Підшипник навантажено навантажено радіальною силою $F_r = 3000$ Н. За $t_0 = 20$ °С коефіцієнт рідинного тертя в підшипнику $f_{p0} = 5 \cdot 10^{-3}$. Визначити характеристику режиму роботи $\lambda_0 = \lambda_{kp0}$ та відносний зазор ψ_{min0} у підшипнику за $t_0 = 20$ °С та $\lambda_t = \lambda_{kpt}$ і ψ_{mint} за $t = 80$ °С, якщо припустити, що коефіцієнт рідинного тертя f_{pt} в підшипнику зменшився пропорційно зменшенню динамічної в'язкості мастила μ_t , а $\omega = const$ та $F_r = const$.

7.3 Приклади розв'язування задач

Задача № 2

Проаналізувати змінення розрахункової висоти мікронерівностей під час точіння $H_p = s_n^2 / (8r_{p3})$ (тут: s_n – подача різця; r_{p3} – радіус заокруглення біля вершини різця) для випадків: 1) $s_n = var, r_{p3} = const$ на основі графічної залежності відносних величин $\varphi(H_p / r_{p3}) = \psi(s_n / r_{p3})$ для точок – $s_n = (0; 0,5r_{p3}; r_{p3}; 1,5r_{p3}; 2r_{p3}; 2,5r_{p3})$; 2) $s_n = const, r_{p3} = var$ на основі графічної залежності відносних величин $\varphi(H_p / r_{p3}) = \psi(s_n / r_{p3})$ для точок – $r_{p3}(0; 0,5s_n; s_n; 1,5s_n; 2s_n; 2,5s_n)$. Визначити область мінімальних значень H_p залежно від співвідношення s_n / r_{p3} , а також за якого цього співвідношення висота мікронерівностей буде однаковою залежно від s_n і r_{p3} ?

Розв'язування

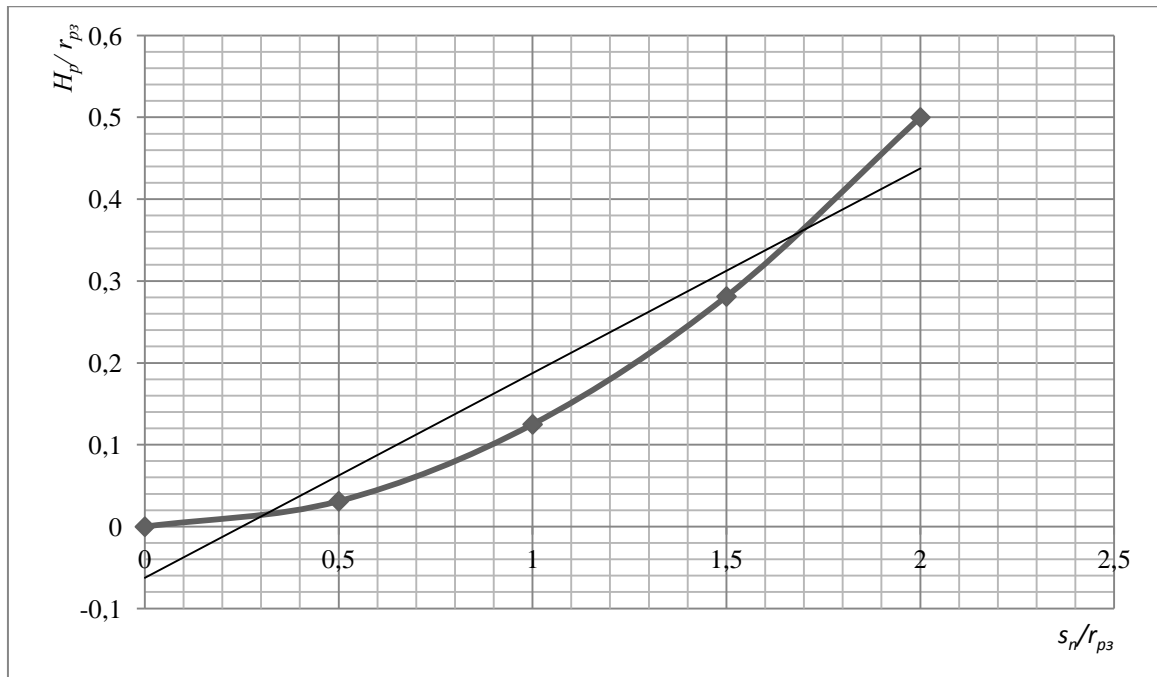
1. Для заданих точок будемо таблицю 1 значень для співвідношень s_n / r_{p3} і H_p / r_{p3} на основі формули $H_p = s_n^2 / (8r_{p3})$.

Таблиця 1

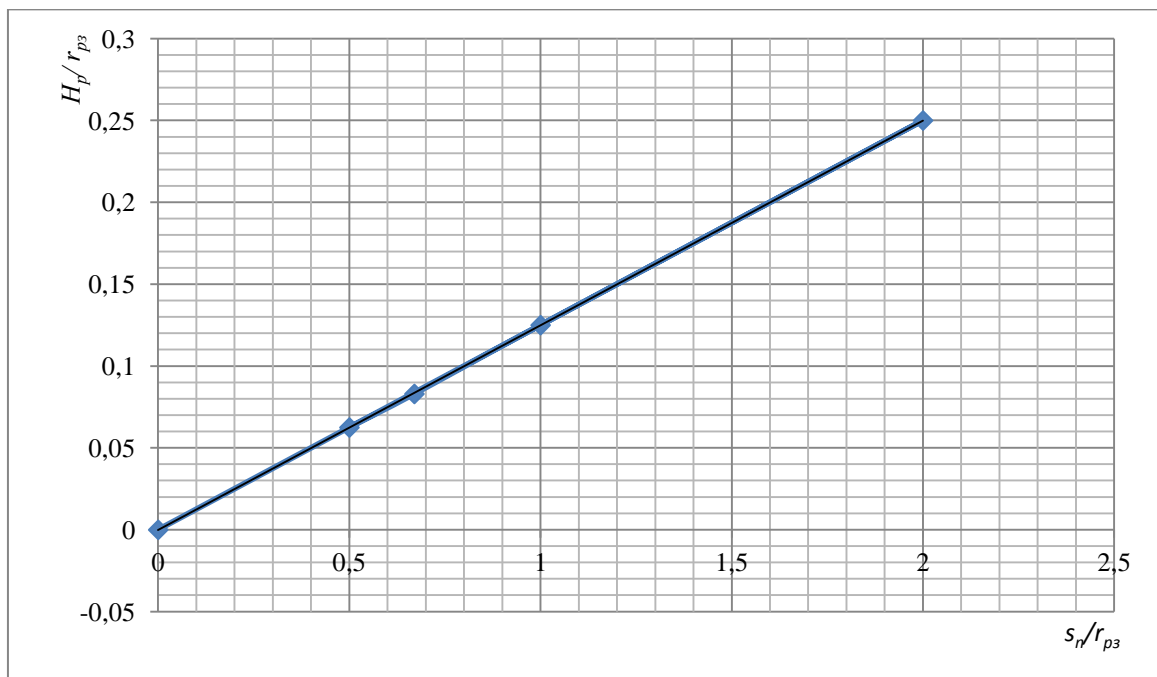
Ч.ч.	s_n	r_{p3}	s_n / r_{p3}	H_p	H_p / r_{p3}	Ч.ч.	s_n	r_{p3}	s_n / r_{p3}	H_p	H_p / r_{p3}
1	0	r_{p3}	0	0	0	1, а	s_n	0	∞	∞	∞
2	$0,5r_{p3}$	r_{p3}	0,5	$0,03125 r_{p3}$	$0,03125$	2, а	s_n	$0,5s_n$	2,0	$0,25s_n$	0,25
3	r_{p3}	r_{p3}	1,0	$0,1250r_{p3}$	$0,1250$	3, а	s_n	s_n	1,0	$0,125s_n$	0,125
4	$1,5r_{p3}$	r_{p3}	1,5	$0,28125 r_{p3}$	$0,28125$	4, а	s_n	$1,5s_n$	0,67	$0,083s_n$	0,083
5	$2r_{p3}$	r_{p3}	2,0	$0,5000r_{p3}$	$0,5000$	5, а	s_n	$2s_n$	0,5	$0,0625s_n$	0,0625
6	$2,5r_{p3}$	r_{p3}	2,5	$0,78125 r_{p3}$	$0,78125$	6, а	s_n	$2,5s_n$	0,4	$0,050s_n$	0,050
$s_n = var, r_{p3} = const (r_{p3} > 0)$						$s_n = const, r_{p3} = var$					

2. За допомогою табл. 1 будемо графіки функції $\varphi(H_p / r_{p3})$ для двох, заданих в умові задачі, випадків:

1) $s_n = var, r_{p3} = const (r_{p3} > 0)$ –



2) $s_n = const, r_{p3} = var$ –



Висновки: 1) комп'ютер побудував графіки залежностей в різних масштабах по осі ординат (H_p/r_{p3}), крім того в т. $r_{p3} = 0 - H_p/r_{p3} = \infty$ (див. таблицю 1), що на графіку не відображено, можливо потрібен більш малий масштаб по осі ординат; 2) мінімальні значення H_p будуть за мінімальних значень співвідношення s_n/r_{p3} (малі значення s_n та r_{p3}) H_p буде однаковою за $s_n/r_{p3} = 1$; 3) випадок $r_{p3} = 0$ технічно **не реальний**.

Задача № 4

Два шорстких тіла перебувають в стані ненасиченого пластичного контакту. Контакт тіл навантажено нормальним зусиллям $F_n = 20000 \text{ Н}$, що створює контурний тиск $p_c = 10 \text{ МПа}$. Твердість тіл за Брінеллем 2000 НВ (2000 МПа). Оцінити КПК A_c , ФПК A_r та відносне зближення ε контактуючих поверхонь тіл.

Розв'язування

1. Розраховуємо КПК за відомою формулою

$$A_c = F_n / p_c = 20000 / 10 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

2. Знаходимо ФПК за залежністю

$$A_r = 20000 / 2000 = 10 \text{ мм}^2 = 10^{-5} \text{ м}^2.$$

3. Визначаємо відносне зближення контактуючих поверхонь за формулою

$$\varepsilon = (p_c / H_{HB})^{0,5} = (10 / 2000)^{0,5} = 0,0707.$$

Відповідь: $A_c = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $A_r = 10^{-5} \text{ м}^2$; $\varepsilon = 0,0707$.

Задача № 6

Дві деталі, виготовлені зі сталі 45, рухаються одна відносно одної в режимі сухого тертя ковзання. Фізико-механічні властивості сталі 45: $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ – модуль пружності; $\sigma_m = 360 \text{ МПа}$; $\tau_n = 0,5 \sigma_m$ – відповідно напруження текучості та дотичне напруження в зонах фактичного торкання деталей. Середнє зближення мікронерівностей в області однієї мікронерівності $h_i = 0,18 \text{ мм}$. Середньо геометричний радіус мікронерівності $R = 425 \text{ мкм}$. Коефіцієнт Пуассона $\mu_n = 0,3$. Твердість поверхні деталей $H_{HB} = 2000 \text{ МПа}$.

Визначити: 1) ФПК мікронерівності за формулою

$$A_{ri} = \pi \cdot R \cdot h_i + 0,9 \cdot \pi \cdot R^{7/6} \cdot h_i^{1/6} \times [H_{HB}(1 - \mu_n^2)/E]^{1/3};$$

2) молекулярну F_{fMi} складову сили тертя мікронерівності та деформаційні F_{fdi} складові елементарної сили тертя за умов пластичного ненасиченого контакту та у випадку пружного деформування, взявши зведений коефіцієнт гістерезисних втрат $\alpha_{ef} = 0,04$. Для визначення молекулярної та деформаційних складових елементарних сил тертя потрібно скористатись формулами, наведеними в конспекті лекцій дисципліни «ТрТ МГ»;

3) молекулярну F_{fMi} складову сили тертя мікронерівності за умов пружного насиченого контакту;

4) повну F_{fi} елементарну силу тертя для умов пластичного ненасиченого та пружного насиченого контактів.

Розв'язування

1. Розраховуємо ФПК мікронерівності за заданою залежністю

$$A_{ri} = \pi \cdot R \cdot h_i + 0,9 \cdot \pi \cdot R^{7/6} \cdot h_i^{1/6} \cdot [H_{HB}(1 - \mu_{\Pi}^2)/E]^{1/3} = 3,14 \cdot 0,425 \cdot 0,18 + 0,9 \cdot 3,14 \cdot 0,425^{7/6} \cdot 0,18^{1/6} \cdot [2 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,3^2)/(2 \cdot 10^5)]^{1/3} = 0,4 \text{ мм}^2.$$

2. Знаходимо елементарну молекулярну складову сили тертя за умов пластичного ненасиченого контакту, за формулою

$$F_{fMi} = \tau_n \cdot A_{ri} = 0,5 \sigma_m \cdot A_{ri} = 180 \cdot 0,4 = 72 \text{ Н}.$$

3. Визначаємо деформаційні складові елементарної сили тертя для умов:

а) пластичного ненасиченого контакту, за формулою

$$F_{fdi} = 1,68 \cdot H_{HB} \cdot R^{1/2} \cdot h_i^{3/2} = 1,68 \cdot 2000 \cdot 0,425^{0,5} \cdot 0,18^{1,5} = 166,49 \text{ Н};$$

б) пружного насиченого контакту, за формулою

$$F_{fdi} = 0,25 \cdot \alpha_{ef} \cdot E \cdot h_i^2 / (1 - \mu_{\Pi}^2) = 0,25 \cdot 0,04 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,18^2 / (1 - 0,3^2) = 71,22 \text{ Н}.$$

4. Знаходимо елементарну молекулярну складову сили тертя за умов пружного насиченого контакту, за формулою

$$F_{fMi} = \tau_n \cdot \pi \cdot R \cdot h_i = 180 \cdot 3,14 \cdot 0,425 \cdot 0,18 = 43,24 \text{ Н}.$$

5. Розраховуємо повну елементарну силу тертя для випадків а) і б), відповідно:

$$F_{fi} = F_{fMi} + F_{fdi} = 72 + 166,49 = 238,49 \text{ Н}; F_{fi} = 43,24 + 71,22 = 114,46 \text{ Н}.$$

Відповідь: $A_{ri} = 0,4 \text{ мм}^2$; випадки: а) – $F_{fMi} = 72 \text{ Н}$; $F_{fdi} = 166,49 \text{ Н}$;

$F_{fi} = 238,49 \text{ Н}$; б) – $F_{fMi} = 43,24 \text{ Н}$; $F_{fdi} = 71,22 \text{ Н}$; $F_{fi} = 114,46 \text{ Н}$.

Задача № 11

Під час кочення транспортного засобу на чотирьох колесах діаметром $d_k = 1,0 \text{ м}$ по нерухомій поверхні коефіцієнт опору коченню одного колеса з абсолютно твердого матеріалу ($E_k = \infty$) $f_k = 0,2$, а сумарний коефіцієнт тертя кочення чотирьох коліс транспортного засобу $k_{\Sigma} = 0,04 \text{ м}$. Транспортний засіб навантажено сумарною нормальною силою $F_{n\Sigma} = 200000 \text{ Н}$, до якої входить і вага засобу. Вважаючи, що $F_{n\Sigma}$ рівномірно розподілена між всіма чотирма колесами і сумарний коефіцієнт опору коченню всіх коліс $f_{k\Sigma} = 4 f_k = 0,8$, визначити загальну рушійну силу $F_{p\Sigma}$ та силу F_p , що припадає на одно колесо транспортного засобу, а також роботу $A_{\varphi\Sigma}$ рушійної сили $F_{p\Sigma}$ за повний оберт

всіх чотирьох коліс. Яку роботу $A_{\varphi\Sigma 1000}$ виконає рушійна сила $F_{p\Sigma}$, якщо транспортний засіб проїде відстань $L_{1000} = 1000 \text{ м}$?

Розв'язування

1. Знаходимо рушійну силу, що припадає на одно колесо транспортного засобу, за відомою формулою

$$F_p = 2 \cdot k \cdot F_n / d_k = 2 \cdot 0,0625 \cdot k_{\Sigma} F_{n\Sigma} / d_k = 2 \cdot 0,0625 \cdot 0,04 \cdot 200000 / 1,0 = 1000 \text{ Н},$$

де $k = 0,24 \cdot k_{\Sigma} = 0,01 \text{ м}$; $F_n = 0,25 \cdot F_{n\Sigma} = 50000 \text{ Н}$ – відповідно коефіцієнт тертя кочення та нормальна сила, що припадають на одно колесо згідно з умовою задачі.

2. Розраховуємо роботу для одного колеса A_{φ} рушійної сили F_p за повний оберт колеса за формулою

$$A_{\varphi} = 0,5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_k \cdot d_k \cdot F_n = 0,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,2 \cdot 1,0 \cdot 50000 = 31400 \text{ Дж} = 31,4 \text{ кДж}.$$

3. Оскільки за умовою задачі $F_{n\Sigma}$ рівномірно розподілена між всіма чотирма колесами, то можна припустити, що й рушійна сила $F_{p\Sigma}$ та її робота $A_{\varphi\Sigma}$ розподілені так само, тоді:

$$F_{p\Sigma} = 4 \cdot F_p = 4 \cdot 1000 = 4000 \text{ Н}; A_{\varphi\Sigma} = 4 \cdot A_{\varphi} = 4 \cdot 31,4 = 125,6 \text{ кДж}.$$

4. Колеса транспортного засобу за один повний оберт проходять відстань $L_{об} = \pi \cdot d_k$, а за час руху на відстань L_{1000} здійснять $n = L_{1000} / (\pi \cdot d_k)$ обертів, тоді робота

$$A_{\varphi\Sigma 1000} = n \cdot A_{\varphi\Sigma} = [L_{1000} / (\pi \cdot d_k)] \cdot A_{\varphi\Sigma} = 125,6 \cdot 10^3 \cdot [1000 / (3,14 \cdot 1,0)] = 40 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 40 \text{ МДж}.$$

Відповідь: $F_p = 1000 \text{ Н}$; $F_{p\Sigma} = 4000 \text{ Н}$; $A_{\varphi\Sigma} = 125,6 \text{ кДж}$; $A_{\varphi\Sigma 1000} = 40 \text{ МДж}$.

Задача № 12

Під час дослідження процесу тертя дослідних зразків (тіла малого розміру) відбувається процес зношування. З кожної плями контакту ФПК знімається об'єм матеріалу $\Delta V = \Delta h \cdot A_r = i_h \cdot A_r \cdot \bar{d}_2$, де i_h – інтенсивність зношування; A_r – ФПК; $\bar{d}_2 = \bar{d}_1 = \bar{d}$ – середній діаметр плями контакту в напрямку ковзання; \bar{d}_1 – середній діаметр плями контакту в напрямку перпендикулярному до напрямку ковзання. КПК тіла, що ковзає $A_c = A_a = A_f = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ (розмір зразка $25 \times 25 \text{ мм}^2$) (тут A_a – НПК A_f – площа поверхні тертя). Тіла навантажені нормальною силою $F_n = 2000 \text{ Н}$. Процес ковзання відбувається без змащення. Інтенсивність зношування $I_h = 7,3 \cdot 10^{-12}$ (матеріали пари тертя – сталь 45 – сталь 45).

Розрахувати: 1) контурний тиск $p_c = p_a$ (p_a – номінальний тиск) в зоні контакту ковзаючих тіл; 2) шлях тертя L_f , взявши розмір тіла $a = 25$ мм, що зношується в напрямку перпендикулярному до напрямку ковзання; 3) знос тіл ΔH ; 4) питому інтенсивність зношування i_h , прийнявши $A_r = A_c \cdot p_c / (c \cdot \sigma_m)$, де $c \approx 3$; $\sigma_m = 360$ МПа – напруження текучості для сталі 45; 5) зношений об'єм матеріалу ΔV та товщину віділеного шару Δh ; 6) число N фрикційних зв'язків; 7) середній розмір плями контакту \bar{d}_2 ; 8) загальне число n_r фрикційних зв'язків під час тертя; 9) густину ρ_r плям контакту.

Розв'язування

Розрахунки виконуємо за формулами, наведеними для визначення параметрів зношування тіл під час тертя в теоретичній частині посібника з дисципліни «ТрТ МГ»:

$$1) p_c = F_n / A_c = 2000 / 6,25 \cdot 10^{-4} = 3,2 \cdot 10^6 \text{ Па} = 3,2 \text{ МПа};$$

$$2) L_f = A_f / a = 6,25 \cdot 10^{-4} / 2,5 \cdot 10^{-2} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$3) \Delta H = I_h \cdot L_f = 7,3 \cdot 10^{-12} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \approx 1,83 \cdot 10^{-13} \text{ м};$$

$$4) i_h = I_h \cdot A_a / A_r = I_h \cdot c \cdot \sigma_m \cdot p_c^{-1} \approx 7,3 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 360 / 3,2 \approx 2 \cdot 10^{-9};$$

$$5) \Delta V = I_h \cdot A_f \cdot L_f = 7,3 \cdot 10^{-12} \cdot 6,25 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 1,14 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3;$$

$$6) \Delta h = \Delta V / A_r = \Delta V \cdot c \cdot \sigma_m / (A_c \cdot p_c) = 1,14 \cdot 10^{-16} \cdot 3 \cdot 360 / (6,25 \cdot 10^{-4} \cdot 3,2) = 6,16 \cdot 10^{-11} \text{ м};$$

$$7) N = \Delta H / \Delta h = 1,83 \cdot 10^{-13} / 6,16 \cdot 10^{-11} \approx 2,97 \cdot 10^{-3};$$

$$8) \bar{d}_2 = \Delta h / i_h = 6,16 \cdot 10^{-11} / 2 \cdot 10^{-9} \approx 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$9) n_r = a \cdot N / \bar{d}_1 = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 2,97 \cdot 10^{-3} / 2,5 \cdot 10^{-2} \approx 2,97 \cdot 10^{-3};$$

$$10) \rho_r = n_r / A_a = 2,97 \cdot 10^{-3} / 6,25 \cdot 10^{-4} \approx 4,75 \text{ м}^{-2}.$$

Відповідь: $p_c = 3,2$ МПа; $L_f = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м; $\Delta H \approx 1,83 \cdot 10^{-13}$ м; $i_h \approx 2 \cdot 10^{-9}$;
 $\Delta V = 1,14 \cdot 10^{-16}$ м³; $\Delta h = 6,16 \cdot 10^{-11}$ м; $N \approx 2,97 \cdot 10^{-3}$; $\bar{d}_2 \approx 2,5 \cdot 10^{-2}$ м;
 $n_r \approx 2,97 \cdot 10^{-3}$; $\rho_r \approx 4,75$ м⁻².

Задача № 16

Гідродинамічний радіальний підшипник ковзання працює в режимі рідинного тертя. Геометричні параметри підшипника: $d_n = 50$ мм – діаметр підшипникової втулки; $l_e = 40$ мм – довжина втулки підшипника. Підшипник навантажено силою $F_r = 5000$ Н. Змашується підшипник мастилом И-40 А з

кінематичною в'язкістю $v_{50} = 40 \text{ cSt}$ за робочої температури $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнт об'ємного теплового розширення мастила $\beta_m = 8 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Густина мастила за температури $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_0 = 900 \text{ кг/м}^3$. Вал обертається з кутовою швидкістю $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$. Використовуючи закони Леонардо да Вінчі – Амонтон та Ньютона для крапельних рідин, вивести оціночну формулу для визначення коефіцієнта рідинного тертя f_p в зоні зазору між поверхнями вала та підшипникової втулки. Розрахувати орієнтовне значення f_p , якщо відносний середній зазор між поверхнями вала та втулки $\psi = 0,0005$. Вибрати квалітет точності контактуючих поверхонь підшипника та вала і величину їх шорсткості, за яких забезпечується заданий зазор ψ і рідинний режим тертя в ньому.

Розв'язування

1. Сила тертя в спряженні підшипника за законом Леонардо да Вінчі – Амонтон а) $F_f = f_p \cdot F_r$, а за законом Ньютона б) $F_f = \mu_{50} \cdot \bar{\omega} \cdot A_{ок} \cdot \delta_R^{-1} = \mu_{50} \cdot \omega \cdot \pi \cdot d_n \cdot l_{\epsilon} \cdot \psi^{-1}$, де $F_r = p_m \cdot d_n \cdot l_{\epsilon}$ (тут $p_m = F_r / (d_n \cdot l_{\epsilon})$ – середнє питоме навантаження на підшипник); $\mu_{50} = v_{50} \cdot \rho_{50}$ – динамічна в'язкість мастила за $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $\bar{\omega} = 0,5 \cdot \omega \cdot d_n$ – середня колова швидкість вала; $A_{ок} = \pi \cdot d_n \cdot l_{\epsilon}$ – площа колового перетину підшипника в середньому радіальному зазорі $\delta_R = 0,5 \cdot \psi \cdot d_n$.

2. Прирівнюємо вирази а) та б) і після нескладних алгебраїчних перетворень, знаходимо

$f_p = (\pi/\psi) \cdot (\mu_{50} \cdot \omega / p_m) = (\pi/\psi) \cdot \lambda$, де $\lambda = \mu_{50} \cdot \omega / p_m$ – характеристика режиму роботи підшипника ковзання.

3. Розраховуємо:

$$\begin{aligned} - p_m &= F_r / (d_n \cdot l_{\epsilon}) = 5000 / (5 \cdot 4 \cdot 10^{-4}) = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 2,5 \text{ МПа}; \\ - \mu_{50} &= v_{50} \cdot \rho_{50} = v_{50} \cdot \rho_0 \cdot [1 - \beta_m \cdot (t - t_0)] = 40 \cdot 10^{-6} \cdot [1 - 8 \cdot 10^{-4} (50 - 20)] = \\ &= 0,035 \text{ Па} \cdot \text{с}; \\ - \lambda &= \mu_{50} \cdot \omega / p_m = 0,035 \cdot 50 / 2,5 \cdot 10^6 = 7 \cdot 10^{-7}; \\ - \delta_R &= 0,5 \cdot \psi \cdot d_n = 0,5 \cdot 0,0005 \cdot 50 = 0,0125 \text{ мм} = 12,5 \text{ мкм}; \\ - f_p &= (\pi/\psi) \cdot \lambda = (3,14/0,0005) \cdot 7 \cdot 10^{-7} \approx 4,4 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

4. За $\delta_R = 12,5 \text{ мкм}$ найближче підходить посадка втулки підшипника на вал $\emptyset 50 \text{ H5/g5}$, яка забезпечує середній радіальний зазор 10 мкм . Така посадка реалізується за шорсткості не нижче $R_a = 0,32 \dots 0,63 \text{ мкм}$.

$$\begin{aligned} \text{Відповідь: } p_m &= 2,5 \text{ МПа}; \mu_{50} = 0,035 \text{ Па} \cdot \text{с}; \lambda = 7 \cdot 10^{-7}; \delta_R = 12,5 \text{ мкм}; \\ f_p &\approx 4,4 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Задача № 19

Під час роботи вузла тертя ковзання механізму в режимі рідинного тертя тиск мастила кінематичною в'язкістю $v_{50} = 40 \text{ cSt}$ (за $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$) зріс з $p_0 = 0,5 \text{ МПа}$ до $p_t = 1 \text{ МПа}$, а температура з $t_0 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t = 75 \text{ }^\circ\text{C}$. Фізичні параметри мастила: модуль ізотермічної пружності $\kappa = \epsilon^{-1}$ (тут ϵ – коефіцієнт стисливості мастила) $\kappa = \text{const} = 1,4 \cdot 10^9 \text{ МПа}$; коефіцієнт теплового об'ємного

розширення $\beta_m = \text{const} = 9,7 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; п'єзокоефіцієнт $\alpha = \text{const} = 2,36 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$. Показник степеня в температурній залежності кінематичної в'язкості мастила $m = 2,3$. Взявши за умов $t_{01} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ та $p_0 = 0,5 \text{ МПа}$ густину мастила $\rho_{20} = 900 \text{ кг/м}^3 = \text{const}$ та $v_{50} = v_0 = \text{const} = 40 \text{ сСт}$, розрахувати: густину та кінематичну в'язкість мастила залежно від зміни тиску та температури й оцінити рівень відносної зміни від вказаних параметрів ρ і v :

Розв'язування

$$1) \rho_{50} = \rho_{20} \cdot [1 - \beta_m \cdot (t_0 - t_{01})] = 900 \cdot [1 - 9,7 \cdot 10^{-4} \cdot (50 - 20)] = 638,10 \text{ кг/м}^3;$$

$$2) \rho_{70} = \rho_{20} \cdot [1 - \beta_m \cdot (t - t_0)] = 900 \cdot [1 - 9,7 \cdot 10^{-4} \cdot (75 - 50)] = 483,36 \text{ кг/м}^3;$$

$$3) \rho_p = \rho_{50} / (1 - \varepsilon \cdot \Delta p) = 638,10 / [1 - (1,4 \cdot 10^9)^{-1} \cdot (1 - 0,5) \cdot 10^6] = 638,33 \text{ кг/м}^3;$$

$$4) v_p = v_0 \cdot (1 - \varepsilon \cdot \Delta p) \cdot e^{\alpha \Delta p} = 40 \cdot 10^{-6} \cdot [1 - (1,4 \cdot 10^9)^{-1} \cdot (1 - 0,5) \cdot 10^6] \cdot e^{0,0118} = 40,46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \text{ (тут } \alpha \cdot \Delta p = 2,36 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^5 = 0,012);$$

$$5) v_t = \{v_0 / [1 - \beta_m \cdot (t - t_0)]\} \cdot (t_0 / t)^m = \{40 \cdot 10^{-6} / [1 - 9,7 \cdot 10^{-4} \cdot (75 - 50)]\} \times (50 / 75)^{2,3} = 20,78 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$6) \delta_{\rho t} = (\rho_{70} - \rho_{50}) / \rho_{70} = (483,36 - 638,10) / 483,36 = -0,32;$$

$$7) \delta_{\rho p} = (\rho_p - \rho_{50}) / \rho_p = (638,33 - 638,10) / 638,33 = 3,6 \cdot 10^{-4};$$

$$8) \delta_{v t} = (v_t - v_0) / v_0 = (20,78 \cdot 10^{-6} - 40 \cdot 10^{-6}) / 20,78 \cdot 10^{-6} = -0,92;$$

$$9) \delta_{v p} = (v_p - v_0) / v_0 = (40,46 \cdot 10^{-6} - 40 \cdot 10^{-6}) / 40,46 \cdot 10^{-6} = 0,011.$$

Відповідь: $\rho_{50} = 638,10 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{70} = 483,36 \text{ кг/м}^3$; $\rho_p = 638,33 \text{ кг/м}^3$;
 $v_p = 40,46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $v_t = 20,78 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\delta_{\rho t} = -0,32$; $\delta_{\rho p} = 3,6 \cdot 10^{-4}$;
 $\delta_{v t} = -0,92$; $\delta_{v p} = 0,011$.

Висновок: залежність густини та кінематичної в'язкості мастила від температури суттєво більша, ніж від тиску:

$$\delta_{\rho t} / \delta_{\rho p} = |-0,32 / 3,6 \cdot 10^{-4}| \approx 889 \text{ раз}; \quad \delta_{v t} / \delta_{v p} = |-0,92 / 0,011| \approx 84 \text{ рази}.$$

Задача № 24

Під час роботи вузла тертя механізму контактний тиск на НПК $p_c = 4 \cdot 10^6 \text{ Па}$. НПК, КПК площа тертя рівні між собою та мають числове значення $A_a = A_c = A_f = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Шлях тертя $L_f = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ та знос тіл, що труться, $\Delta h = 1,9 \cdot 10^{-12} \text{ м}$. Питома інтенсивність зношування $i_h = 2,5 \cdot 10^{-9}$. Визначити: 1) лінійну інтенсивність зношування I_h ; 2) розмір a ? тіла, що зношується, в напрямку перпендикулярному до напрямку ковзання; 3) об'єм матеріалу ΔV , що видаляється із зони тертя тіл; 4) зносостійкість тіл пари тертя Z_h ; 5) ФПК A_r ; 6) умовну товщину зношеного шару Δh та число фрикційних

зв'язків N ; 7) середній розмір $\bar{d}_2 = \bar{d}_1 = \bar{d}$ плями контакту в напрямку ковзання; 8) загальне число фрикційних зв'язків n_r на поверхні зношування та густину плям контакту ρ_r .

Розв'язування

Розрахунки виконуємо за формулами, наведеними для визначення параметрів зношування тіл під час тертя в теоретичній частині посібника з дисципліни «ТрТ МГ»:

$$- I_h = \Delta H / L_f = 1,9 \cdot 10^{-12} / 3 \cdot 10^{-2} = 6,33 \cdot 10^{-11};$$

$$- a = A_f / L_f = 7 \cdot 10^{-4} / 3 \cdot 10^{-2} = 2,33 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$- \Delta V = I_h \cdot A_f \cdot L_f = 6,33 \cdot 10^{-11} \cdot 7 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 1,33 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3;$$

$Z_h = 1 / I_h = 1 / 6,33 \cdot 10^{-11} = 1,58 \cdot 10^{10}$, що відповідає 10-му класу зносостійкості ($K = 10$) та $\alpha_k = Z_h / 10^{10} = 1,58 \cdot 10^{10} / 10^{10} = 1,58$ – це перший розряд зносостійкості: *КИ 10/1*;

$$- A_r = I_h \cdot A_a / i_h = 6,33 \cdot 10^{-11} \cdot 7 \cdot 10^{-4} / 2,5 \cdot 10^{-9} = 1,77 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2;$$

$$- \Delta h = \Delta V / A_r = 1,33 \cdot 10^{-15} / 1,77 \cdot 10^{-5} = 7,51 \cdot 10^{-11} \text{ м};$$

$$- N = \Delta H / \Delta h = 1,9 \cdot 10^{-12} / 7,51 \cdot 10^{-11} = 2,53 \cdot 10^{-2};$$

$$- \bar{d} = \Delta h / i_h = \Delta V / (A_r \cdot i_h) = 7,51 \cdot 10^{-11} / 2,5 \cdot 10^{-9} \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$- n_r = a \cdot N / \bar{d} = 2,33 \cdot 10^{-2} \cdot 2,53 \cdot 10^{-2} / 3 \cdot 10^{-2} = 1,96 \cdot 10^{-2};$$

$$\rho_r = n_r / A_a = 1,96 \cdot 10^{-2} / 7 \cdot 10^{-4} = 28 \text{ м}^{-2}.$$

Відповідь: $I_h = 6,33 \cdot 10^{-11}$; $a = 2,33 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $\Delta V = 1,33 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3$; $Z_h = 1,58 \cdot 10^{10}$;
 $A_r = 1,77 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$; $\Delta h = 7,51 \cdot 10^{-11} \text{ м}$; $N = 2,53 \cdot 10^{-2}$; $\bar{d} \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;
 $n_r = 1,96 \cdot 10^{-2}$; $\rho_r = 28 \text{ м}^{-2}$.

Задача № 27

Під час тривалої роботи радіального гідродинамічного підшипника ковзання з діаметром цапфи $d_u = 50 \text{ мм}$ та довжиною втулки підшипника $l_g = 40 \text{ мм}$, температура мастила зросла від $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$. Вал обертається з кутовою швидкістю $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$. Динамічна в'язкість мастила за $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\mu_0 = 0,036 \text{ Па}\cdot\text{с}$, показник степеня $m = 2,3$ залежно від температури динамічної в'язкості мастила. Підшипник навантажено навантажено радіальною силою $F_r = 3000 \text{ Н}$. За $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ коефіцієнт рідинного тертя в підшипнику $f_{p0} = 5 \cdot 10^{-3}$. Визначити характеристику режиму роботи $\lambda_0 = \lambda_{кр0}$ та відносний зазор ψ_{min0} у

підшипнику за $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ та $\lambda_t = \lambda_{крт}$ і ψ_{mint} за $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, якщо припустити, що коефіцієнт рідинного тертя f_{pt} в підшипнику зменшився пропорційно зменшенню динамічної в'язкості мастила μ_t , а $\omega = const$ та $F_r = const$.

Розв'язування

Розрахунки виконуємо за формулами, наведеними для визначення параметрів рідинного тертя в теоретичній частині посібника з дисципліни «ТрТ МГ»:

1. Знаходимо динамічну в'язкість мастила за $t_0 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ за формулою

$$\mu_t = \mu_0 \cdot (t_0 / t)^m = 0,036 \cdot (20 / 80)^{2,3} = 1,49 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

2. Визначаємо ступінь зменшення динамічної в'язкості мастила та коефіцієнт рідинного тертя f_{pt} згідно з умовою задачі:

$$\delta_{\mu t} = \mu_t / \mu_0 = 0,00149 / 0,036 \approx 0,041;$$

$$f_{pt} = \delta_{\mu t} \cdot f_{p0} = 0,041 \cdot 0,005 = 0,000205.$$

3. Розраховуємо $\lambda_0 = \lambda_{кр0}$ та відносний зазор ψ_{min0} у підшипнику за $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ та $\lambda_t = \lambda_{крт}$ і ψ_{mint} за $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, попередньо визначивши питоме навантаження на підшипник:

$$- p_m = F_r / (d_s \cdot l_s) = 3000 / (5 \cdot 4 \cdot 10^{-4}) = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,5 \text{ МПа};$$

$$- \lambda_0 = \lambda_{кр0} = \mu_0 \cdot \omega / p_m = 0,036 \cdot 314 / 1,5 \cdot 10^6 \approx 7,54 \cdot 10^{-6};$$

$$- \lambda_t = \lambda_{крт} = \mu_t \cdot \omega / p_m = 0,00149 \cdot 314 / 1,5 \cdot 10^6 \approx 3,12 \cdot 10^{-7};$$

$$- \psi_{min0} = \pi \cdot \lambda_{кр0} / f_{p0} = 3,14 \cdot 7,54 \cdot 10^{-6} / 5 \cdot 10^{-3} \approx 4,73 \cdot 10^{-3};$$

$$- \psi_{mint} = \pi \cdot \lambda_{крт} / f_{pt} = 3,14 \cdot 3,12 \cdot 10^{-7} / 2,05 \cdot 10^{-4} \approx 4,78 \cdot 10^{-3}.$$

Відповідь: $\mu_t = 1,49 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\delta_{\mu t} \approx 0,041$; $f_{pt} = 0,000205$;

$$p_m = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,5 \text{ МПа}; \lambda_0 = \lambda_{кр0} \approx 7,54 \cdot 10^{-6}; \lambda_t = \lambda_{крт} \approx 3,12 \cdot 10^{-7};$$

$$\psi_{min0} \approx 4,73 \cdot 10^{-3}; \psi_{mint} \approx 4,78 \cdot 10^{-3}.$$

Висновок: збільшення робочої температури підшипника, що спричиняє зменшення динамічної в'язкості мастила та коефіцієнта рідинного тертя в ньому, *не приводить* до виходу з режиму рідинного тертя, оскільки відносний зазор у підшипнику практично не змінився:

$$\delta_\psi = (\psi_{mint} - \psi_{min0}) / \psi_{mint} = (4,78 - 4,43) / 4,78 \approx 0,01 (\approx 1\%),$$

а навпаки, трошки зріс, що можна пояснити підсиленням гідродинамічних ефектів.

7.4 Тести для самоконтролю ступеня засвоєння дисципліни

1. В чому полягає різниця між поняттями «трибологія» та «триботехніка»?

Відповіді

1. Ці поняття тотожні. 2. «Трибологія» – наука про тертя та процеси, що його супроводжують, а «триботехніка» – це впорядковані знання з практичного застосування здобутків трибології. 3. «Трибологія» – теоретична наука про тертя та зношування тіл, а «триботехніка» – експериментальна наука про тертя та зношування тіл.

2. Чи пов'язана трибологія з такими науками як теплофізика, гідродинаміка, еластогідродинаміка та кристалографія?

Відповіді

1. Ні не пов'язана. 2. З теплофізикою та кристалографією пов'язана, а з гідродинамікою, еластогідродинамікою не пов'язана. 3. Із перерахованими в питанні науками трибологія тісно пов'язана, оскільки ці науки є теоретичними основами, які формують основні поняття та означення трибології.

3. Які три взаємопов'язані фізичні процеси проходять під час тертя деталей машин?

Відповіді

1. Під час тертя деталей машин проходять три таких взаємопов'язаних фізичних процеси: взаємодія поверхонь тіл під час тертя; зміна властивостей поверхонь деталей внаслідок їх взаємодії та впливу навколишнього середовища; руйнування поверхонь (зношування) тіл внаслідок двох попередніх процесів. 2. Фізичні процеси під час тертя деталей машин між собою не взаємопов'язані. 3. Під час тертя деталей машин відбуваються фізичні процеси нагрівання та зношування деталей .

4. Чи відноситься до наукових задач триботехніки створення нових високоефективних фрикційних та антифрикційних матеріалів і змащувальних матеріалів?

Відповіді

1. Створення нових високоефективних фрикційних та антифрикційних матеріалів є науковою задачею триботехніки, а розроблення мастильних матеріалів – задача теорії змащення. 2. Так. Всі відмічені в питанні напрямки досліджень є науковими задачами триботехніки. 3. Відмічені в питанні напрямки досліджень не відносяться до наукових задач триботехніки.

5. Що розуміють під кристалічною структурою речовини?

Відповіді

1. Кристалічна структура речовини – це тверда фаза речовини. 2. Кристалічна структура речовини – періодичне повторення розташування атомів (іонів, молекул) в просторі, об'єднаних в структуру різними видами електростатичного притягання. 3. Кристалічна структура речовини – це енергетично зв'язані між собою атоми, з яких побудована речовина.

6. В чому полягає відмінність між кристалом та аморфним тілом?

Відповіді

1. Аморфне тіло та кристал – обидва тверді тіла і можуть відрізнитись тільки фізичною природою речовини. 2. Кристал – жорстка конструкція з «дальнім» порядком структурних елементів (атомів, іонів чи молекул), а аморфне тіло – це рідина, що застигла і є сукупністю метастабільного (нерівноважного) стану атомів, іонів чи молекул. 3. Кристал та аморфне тіло – це тверда фаза речовини і відмінність між ними та, що аморфне тіло не має чітко визначеної температури плавлення, а кристал має.

7. Яка відмінність між ковалентним та іонним зв'язками між структурними елементами – вузлами кристалічної ґратки?

Відповіді

1. Обидва види зв'язку ковалентний та іонний – це електростатичне притягання атомів чи іонів. 2. Під час ковалентного зв'язку (який ще називають гомеоплярним або атомним) атоми кристала мають спільні електрони та чітку просторову орієнтацію зарядів, причому електронні оболонки атомів мало відрізняються між собою (знаходяться на одному рівні), а іонний зв'язок (гетероплярний або електровалентний) – зв'язок силами електростатичного притягання між позитивно (катіони) та негативно (аніони) зарядженими іонами. 3. Ковалентний зв'язок визначає валентність елементів, а іонний – ні.

8. В чому полягає суть водневого зв'язку між атомами речовини?

Відповіді

1. Водневий зв'язок – результат проникнення протона завдяки його маленькому розміру в глибину електронної оболонки сильно електронегативного атома (іона), внаслідок чого виникає сильна електростатична взаємодія між електронами та протоном. 2. Водневий зв'язок – причина асоціації молекул води та спиртів. 3. Суть водневого зв'язку – деформація електронної оболонки атома, що взаємодіє із зовнішнім протоном.

9. В чому полягає суть металевого зв'язку між структурними елементами кристалів металів?

Відповіді

1. Металевий зв'язок – вид зв'язку між атомами кристалів однорідних металів і сплавів. 2. Суть металевого зв'язку – це електростатична взаємодія між іонними остовами атомів однорідного металу чи сплаву, які знаходяться у вузлах кристалічної ґратки, і електронним газом, утвореним електронами, відірваними від зовнішніх оболонок атомів. 3. Металевий зв'язок – це різновид іонного зв'язку.

10. Який чинник, що має місце в металевих тілах, дозволяє вважати металеве тіло однією великою макромолекулою?

Відповіді

1. Чинником, що об'єднує як окремі кристали металів і металеве тіло загалом в одну макромолекулу, є електронний газ. 2. Наявність у вузлах металевих кристалів позитивно заряджених іонів дозволяє вважати металеве тіло однією великою макромолекулою. 3. Чинником є само поняття металевого тіла як однієї великої макромолекули.

11. В чому полягає відмінність між молекулярними дисперсійними (сили Лондона) та конфірмаційними силами?

Відповіді

1. Різниця між дисперсійними та конфірмаційними силами тільки в назві. 2. Дисперсійні сили – це результат взаємодії елементарних постійних диполів, а конфірмаційні сили – взаємодія індукційних диполів. 3. Дисперсійні сили – результат взаємодії елементарних диполів, що виникають в електрично нейтральних атомах через рух електронів навколо ядра атома за достатньо великого зближення атомів або молекул, побудованих з цих атомів, а конфірмаційні сили – це електрична взаємодія окремих ланок молекул у вигляді оберտального руху навколо зв'язку, наприклад, в ланцюгових молекулах і кільцевих структурах атомів.

12. Яка причина виникнення індукційних молекулярних сил?

Відповіді

1. Індукційні молекулярні (міжмолекулярні) сили – це результат електростатичної взаємодії постійного та індукційного диполів (наприклад, електрично нейтральна молекула води у формі еліпсоїда, один кінець якого позитивно заряджений, а другий – негативно). 2. Причина виникнення індукційних молекулярних сил – дія орієнтаційних електростатичних сил. 3. Індукційні молекулярні (міжмолекулярні) сили виникають внаслідок когезійного зчеплення між атомами чи молекулами речовини.

13. Який фактор визначає рівень енергії (сили) зв'язку між структурними елементами в кристалі?

Відповіді

1. Рівень енергії (сили) зв'язку між структурними елементами в кристалах визначається сумарним електричним зарядом атома вузла кристалічної ґратки. 2. Енергії (сила) зв'язку між структурними елементами в кристалах визначається видом зв'язку – ковалентним, іонним, водневим чи металевим. 3. Рівень енергії (сили) зв'язку між структурними елементами в кристалах визначається сумарною енергією кристалічної ґратки.

14. В чому полягає відмінність між структурно-чутливими та структурно-нечутливими властивостями кристалів?

Відповіді

1. Структурно-чутливі властивості кристалів сильно залежать від дефектів кристалічної ґратки, а структурно-нечутливі властивості від цих дефектів не залежать. 2. Такої відмінності між структурно-чутливими та структурно-нечутливими властивостями кристалів не існує. 3. Структурно-чутливі властивості кристалів спричиняються тепловими деформаціями кристалічної ґратки та її пошкодженнями, а структурно-нечутливі залежать від міцності та пружності кристалічної ґратки.

15. Що розуміють під поняттям «фонон»?

Відповіді

1. Фонон – це гармонічна хвиля збудження, що виникає в кристалі внаслідок теплового руху вузлів (атомів, іонів чи молекул) кристалічної ґратки поблизу свого положення рівноваги, з певною амплітудою та частотою і яку, згідно з принципом Луї де Бройля, можна розглядати як квазічастинку певної енергії. 2. Фонони – це гіпотетичні переносники пружних збуджень між вузлами кристалічної ґратки. 3. Фонони – хвилі пружних коливань, що виникають в кристалах під час теплових коливань їхніх структурних елементів.

16. Чим відрізняються точкові дефекти кристалічної ґратки – вакансії за Френкелем і внаслідок теплових флуктуацій?

Відповіді

1. Нічим. Природа точкових дефектів кристалічної ґратки внаслідок теплових флуктуацій і вакансій за Френкелем однакова. 2. Вакансія за рахунок теплових флуктуацій виникає тоді, коли внутрішній атом кристала випадково отримує надлишок енергії та переходить на поверхню кристала, а причина вакансії за Френкелем – вибивання атома з вузла кристалічної ґратки частинкою високої енергії, наприклад, нейтроном в ядерному реакторі. 3. Вакансія за

Френкелем – це сторонній атом проникнення, що не займає місця в кристалічній ґратці, а вакансія через дію високої температури – пусте місце у вузлі кристалічної ґратки.

17. В чому полягає відмінність між краєвою та гвинтовою дислокаціями?

Відповіді

1. Краєва дислокація – це спотворення кристалічної ґратки поблизу зайвої атомної площини, а гвинтова дислокація – атомні площини в кристалі, закручені у вигляді гвинтової поверхні та відсутні зайві атомні площини. 2. Краєва та гвинтова дислокації – це лінійні деформаційні дефекти кристалічної ґратки у вигляді плоских і гвинтових поверхонь. 3. Поняття краєвої та гвинтової дислокацій умовні.

18. Яка різниця між поняттями вектора Бюргерса \vec{b} та дилатації Δ дислокації?

Відповіді

1. Вектор Бюргерса \vec{b} є мірою величини дислокації та її напрямку, а дилатація Δ – це локальне розширення кристала поблизу ядра дислокації – області поблизу дислокаційної лінії. 2. Дилатація Δ – це приріст об'єму кристала через наявність зайвої атомної площини, а скалярна величина b вектора Бюргерса – різниця між лінійними розмірами кристала із зайвою атомною площиною та без неї. 3. Поняття вектора Бюргерса \vec{b} та дилатації Δ – математичні залежності для описання дислокацій.

19. В чому полягає відмінність між видами руху дислокації переповзанням і ковзанням?

Відповіді

1. Поняття переповзання та ковзання дислокацій умовні та описують один і той самий вид руху дислокацій. 2. Під час переповзання дислокації зайва атомна площина рухається в глибину кристала або на його поверхню, а рух дислокації ковзанням – це рух, коли зайва атомна півплощина з'єднується з атомною площиною, що знаходиться під площиною ковзання, а сусідня атомна площина стає тепер зайвою. 3. Переповзання – це такий рух дислокацій, коли вакансії, які є в кристалічній ґратці, анігілюють поблизу зайвої атомної площини, а ковзання дислокацій – це перестрибування атомів з краю зайвої атомної площини в найближче міжвузля.

20. Який фізичний процес є причиною виникнення явища наклепу – збільшення опору деформуванню кристалів?

Відповіді

1. Явище хаотичного переплітання дислокацій, що рухаються за великої їх густини в кристалах (чи обломках кристалів – зернах) в різних напрямках, називається наклепом. 2. Переплітання дислокацій одного знака є причиною наклепу. 3. Взаємодія краєвих і гвинтових дислокацій є причиною виникнення явища наклепу.

21. Як пов'язані між собою максимальне напруження зсуву τ_{max} для ідеального кристала, модуль зсуву G та параметри кристалічної ґратки a і b ?

Відповіді

1. $\tau_{max} = b^2 \cdot G / (2\pi \cdot \sqrt{a})$. 2. $\tau_{max} = \sqrt{b} \cdot G / (2\pi \cdot a^2)$. 3. $\tau_{max} = b \cdot G / (2\pi \cdot a)$.

22. Яка найбільш ймовірна причина значного розходження між розрахунковими та експериментальними значеннями максимального напруження зсуву τ_{max} для кристалів?

Відповіді

1. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями максимального напруження зсуву τ_{max} для кристалів пояснюється неточним теоретичним механізмом руху атомних площин в кристалі. 2. Розходження між розрахунковими та експериментальними значеннями максимального напруження зсуву τ_{max} для кристалів пояснюється тим, що ковзання атомних площин в кристалі здійснюється не одночасним переміщенням всіх атомів, що розташовані в площині ковзання на відстань, що дорівнює періоду ґратки, а частковим зміщенням атомів на відстань, меншу періоду ґратки. 3. Розходження між розрахунковими та експериментальними значеннями максимального напруження зсуву τ_{max} для кристалів, мабуть, обумовлено складністю та низькою точністю експериментів із визначення τ_{max} .

23. Яка причина появи надлишкової потенціальної (поверхневої) енергії на поверхні твердого тіла, що знаходиться на межі з газовим або рідинним середовищем?

Відповіді

1. Причина появи надлишкової потенціальної (поверхневої) енергії на поверхні твердого тіла, що знаходиться на межі з газовим або рідинним середовищем – некомпенсованість зв'язків частинок твердого тіла, розташованих на його поверхні (в поверхневому шарі (ПШ), порівняно з частинками тіла в його глибинних шарах. 2. Поверхнева енергія обумовлена властивостями ПШ тіла. 3. Поверхнева енергія – це наслідок дії молекул середовища, що омиває поверхню твердого тіла.

24. Що розуміють під поняттям «адсорбція»?

Відповіді

- 1. Адсорбція – процес прилипання до ПШ твердого тіла органічних молекул.*
- 2. Адсорбція – це процес приєднання до поверхні твердого тіла молекул з навколишнього середовища внаслідок дії на них міжмолекулярних сил.*
- 3. Адсорбція – дія на молекули навколишнього середовища поверхневої енергії ПШ твердого тіла.*

25. В чому полягає відмінність між процесами адсорбції та хемосорбції?

Відповіді

- 1. Під час хемосорбції молекули з навколишнього середовища, після приєднання до поверхні твердого тіла за рахунок дії міжмолекулярних сил, також вступають з молекулами ПШ в хімічну взаємодію.*
- 2. Хемосорбція та адсорбція – це різні назви одного й того самого процесу.*
- 3. Хемосорбція відбувається за значного рівня поверхневої енергії в ПШ твердого тіла.*

26. Яка відмінність між процесами адсорбції та десорбції?

Відповіді

- 1. Поняття адсорбції та десорбції тотожні.*
- 2. Десорбція – процес протилежний адсорбції, коли з якихось причин молекули, що прилипили до поверхні твердого тіла, отримують додаткову енергію та відриваються від поверхні твердого тіла і переходять в навколишнє середовище.*
- 3. Десорбція – це видалення з ПШ твердого тіла адсорбованих молекул внаслідок ударів швидкісних молекул зовнішнього середовища.*

27. В чому полягає відмінність між поняттями «адсорбція» та «абсорбція»?

Відповіді

- 1. Абсорбція – це об'ємне поглинання твердим тілом речовини, а адсорбція – процес приєднання до поверхні твердого тіла молекул з навколишнього середовища за рахунок дії поверхневої енергії тіла.*
- 2. Поняття «адсорбція» та «абсорбція» – різні назви одного і того самого процесу.*
- 3. Адсорбція – поверхнева взаємодія навколишнього середовища з ПШ твердого тіла, а абсорбція – це дифузійний процес проникнення молекул з навколишнього середовища в об'єм твердого тіла.*

28. В чому полягає різниця властивостей ПШ деталей машин під час їх виготовлення та експлуатації?

Відповіді

- 1. Властивості ПШ деталей машин під час їх виготовлення та експлуатації ідентичні.*

2. Під час виготовлення деталей машин виникають технологічні зміни властивостей ПШ, обумовлені режимами оброблення, термооброблення тощо, а під час роботи деталей машин з'являються експлуатаційні зміни властивостей ПШ внаслідок дії робочих навантажень і деформацій деталей, що приводить до накопичення в деталях мікроскопічних дефектів (вакансій, дислокацій, мікротріщин тощо). 3. Під час виготовлення деталей машин залежно від технологічного процесу формування деталі відбуваються фізико-механічні, хімічні та геометричні зміни властивостей ПШ, а під час експлуатації деталі ці властивості можуть змінюватись дією експлуатаційних навантажень на деталь.

29. За якого виду напружень в матеріалі ПШ найбільш інтенсивно проявляється ефект адсорбційного зниження міцності (ефект Ребіндера)?

Відповіді

1. Найбільш інтенсивно ефект Ребіндера проявляється, якщо в матеріалі ПШ діють розтягувальні напруження, наприклад, під час зовнішнього тертя ковзання. 2 Ефект Ребіндера найбільш інтенсивний, якщо в матеріалі ПШ діють крутильні та згинальні напруження. 3. Інтенсивність ефекту Ребіндера не залежить від виду напружень.

30. Що розуміють під поняттям «правило позитивного градієнта механічних властивостей ПШ за глибиною dH_{μ}/dh » (правило І. В. Крагельського, тут H_{μ} – мікротвердість ПШ; h – відстань (глибина) в ПШ, яка відраховується від поверхні адсорбованих шарів ПШ)?

Відповіді

1. Під поняттям «правило позитивного градієнта механічних властивостей ПШ за глибиною dH_{μ}/dh » розуміють зростання мікротвердості H_{μ} матеріалу ПШ за глибиною h . 2. Правило І. В. Крагельського визначає залежність твердості матеріалу від глибини (товщини) ПШ тіла. 3. Градієнт dH_{μ}/dh регламентує розподіл мікротвердості H_{μ} матеріалу ПШ по його товщині.

31. Який фізичний зміст відносно твердих тіл, що контактують, має сумарний шар сорбційних плівок, названий І. В. Крагельським «третім тілом»?

Відповіді

1. Фізичний зміст «третього тіла» – це передавальна ланка силової та енергетичної взаємодії твердих тіл, що контактують. 2. «Третє тіло» – це шар двох сорбційних плівок, через які тверді тіла ковзають одне відносно одного. 3 Сумарні сорбційні плівки твердих тіл, «третє тіло», що контактують, є своєрідним захисним ізолятором ПШ тіл.

32. Які силові та динамічні процеси, що діють в системі верстат – пристосування – інструмент – деталь (ВПД) спричиняють появу макровідхилень (увігнутість, бочкоподібність, конусність і випуклість) та мікровідхилень (хвилястість, шорсткість і субмікрошорсткість) профілю поверхні деталі від номінального, заданого її креслеником?

Відповіді

1. Макровідхилення профілю поверхні деталі від номінального спричиняються силовими та температурними напруженнями і деформаціями в системі ВПД, а причиною мікровідхилень є недостатня жорсткість і низькочастотні механічні коливання системи ВПД, що викликаються анізотропністю матеріалу оброблюваних деталей та нестабільністю режимів оброблення. 2. Силові та динамічні процеси, що діють в системі ВПД, спричиняють макровідхилення профілю поверхні деталі від номінального, практично не впливають на мікровідхилення. 3. Макровідхилення та мікровідхилення профілю поверхні деталі від номінального залежать від точності закріплення інструментів, якими формується реальний профіль деталі, та правильності вибору режимів оброблення, а процеси в системі ВПД мало впливають на формування профілю.

33. Яке призначення базової лінії L під час визначення за ГОСТ 25142-82 шорсткості поверхні деталі машини (механізму)?

Відповіді

1. Базова лінія L призначена для підрахунку западин і виступів мікронерівностей на певній довжині. 2. Базова лінія L призначена для оцінення параметрів шорсткості обробленої деталі. 3. За базовою лінією L знаходять середньоарифметичне відхилення профілю поверхні деталі від номінального.

34. З якою метою, під час дослідження шорсткості обробленої поверхні деталі машини (механізму), будують на основі знятих профілограм профілю поверхні деталі опорну криву t_p ?

Відповіді

1. Опорна крива t_p будується з метою оцінення розподілу вершин мікронерівностей ПШ по висоті, що дозволяє визначити розподілення матеріалу деталі в ПШ твердого тіла. 2. Опорну криву t_p використовують для оцінення відносних параметрів шорсткості поверхні деталі b та v . 3. За опорною кривою t_p розраховують число максимальних виступів і западин мікронерівностей в межах базової довжини L .

35. В чому полягає перевага в нанесенні на кресленики деталей машин (механізмів) позначень шорсткості поверхонь у R_a , а не R_z ?

Відповіді

1. Особливих переваг в позначеннях на креслениках деталей машин (механізмів) шорсткості поверхонь через R_a чи R_z немає. 2. Для визначення шорсткості в одиницях R_a не потрібно виконувати складні розрахунки, досатньо результатів, отриманих за допомогою профілограм, а щоб знайти шорсткість в одиницях R_z потрібно провести складні розрахунки. 3. Через значення шорсткості в R_a точніше відображається чистота оброблення поверхні деталі.

36. З якою метою під час досліджень трибологічних процесів введено поняття трьох площ контакту – номінальної A_n (НПК), контурної A_c (КПК) та фактичної A_f (ФПК)?

Відповіді

1. Мета введення під час досліджень трибологічних процесів поняття трьох площ контакту – кількісна характеристика процесу контактування твердих тіл, що дозволяє більш точно описати процеси фізичної взаємодії тіл на мікроскопічному рівні. 2. Використання поняття трьох площ контакту спрощує деякі розрахункові залежності, наприклад, для визначення контурного тиску p_c в зоні контакту твердих тіл. 3. Поняття трьох площ контакту спрощує розуміння пружно-деформаційних процесів в зоні контакту твердих тіл.

37. За якою ознакою в деяких науково-дослідних роботах з трибології зовнішнє тертя ковзання розділяють та тертя ковзання під час прямолінійного руху тіл і тертя вертіння?

Відповіді

1. Розділення зовнішнього тертя ковзання на два види – тертя ковзання під час прямолінійного руху тіл і тертя вертіння – обумовлено характером силового фактора, що визначає ці види тертя ковзання, а саме, під час прямолінійного руху тіл діє сила тертя F_f , а під час обертального руху тіл (вертіння) діє момент тертя M_f (в деяких працях позначається як T_f). 2. Якоюсь мірою поділ зовнішнього тертя ковзання на два види – під час прямолінійного руху і під час обертання (вертіння) тіл, умовний, оскільки момент M_f тертя можна виразити через силу F_f тертя: $M_f = F_f \cdot r_m$ (тут r_m – радіус тіла в обертальній парі). 3. Тертя вертіння – це тертя ковзання в кінчній цапфі, наприклад, осі гіроскопа, а тертя ковзання під час прямолінійного руху тіл – це тертя, коли тіло (або тіла) рухаються поступально (або зворотно-поступально).

38. Чому зовнішнє тертя ковзання (або граничне тертя) можна вважати поверхневим явищем (процесом)?

Відповіді

1. Під час зовнішнього тертя ковзання (сухе тертя) або граничного тертя, коли кількість мастила в зоні контакту взаємодіючих тіл виключає гідродинамічні ефекти, тонкі ПШ взаємодіючих тіл деформуються без порушення їх суцільності, а деформація шарів матеріалу тіл, що лежать нижче їх ПШ, дуже мала та практично не впливає на процеси в ПШ тіл, причому процеси тертя відбуваються в межах середнього радіуса R кривизни вершин мікронерівностей ПШ тіл. 2 Сухе або граничне тертя ковзання тіл реалізується за певного зближення ПШ тіл $h \leq 10 \dots 20$ мкм і рівня контурного тиску $p_c = f(\Delta, H_{НВ}, \tau_n)$, де $\Delta = R_{max} / (R \cdot b^{-\nu})$ – комплексний параметр шорсткості поверхонь тіл; R_{max} – максимальна висота мікронерівностей; R – радіус вершин мікронерівностей; b, ν – безрозмірні параметри шорсткості поверхонь тіл, що залежать від технології її оброблення; $H_{НВ}$ – твердість матеріалу тіл за Брінеллем, МПа; τ_n – дотичне напруження в зонах фактичного торкання тіл. 3. Сухе та граничне тертя ковзання тіл відбувається в тонких ПШ взаємодіючих тіл.

39. В чому полягає подібність між зовнішнім і внутрішнім тертям?

Відповіді

1. Між цими видами тертя не має нічого спільного. 2. Подібність між зовнішнім і внутрішнім тертям тільки та, що обидва ці види тертя є дисипативними процесами розсіювання енергії. 3. Зовнішнє тертя – це дисипативний процес розсіювання енергії в ПШ взаємодіючих тіл, а внутрішнє тертя – зсувний опір переміщенню одного шару тіла відносно сусіднього.

40. Яка причина існування сили тертя спокою F_{fcp} ?

Відповіді

1. Сила тертя спокою F_{fcp} обумовлена зчепленням взаємодіючих тіл під час тертя ковзання, яке має деформаційно-молекулярну природу. 2. Сила тертя спокою F_{fcp} – сила між двома твердими тілами за відсутності їх руху одне відносно одного. 3. Сила тертя спокою F_{fcp} спричиняється попереднім деформаційним зміщенням x_0 між взаємодіючими тілами перед початком руху одне відносно одного.

41. Вчому полягає відмінність між залежностями для сили тертя F_f Леонардо да Вінчі – Амонтона та Кулона?

Відповіді

1. Залежність для сили тертя F_f Леонардо да Вінчі – Амонтона, по суті, описує молекулярну складову сили тертя F_{fm} , а формула Кулона – двочленна та характеризує зчепність тіл (характеристика A) і властивості взаємодіючих тіл, коефіцієнт k (фактично – це молекулярна складова сили тертя F_{fm}).
2. Порівняно із законом Леонардо да Вінчі – Амонтона, Кулон запропонував уточнений закон для визначення коефіцієнта f та сили F_f тертя ковзання.
3. Формула Леонардо да Вінчі – Амонтона використовується для оціночних розрахунків сили тертя F_f ковзання, а формула Кулона – в наукових дослідженнях.

42. В чому полягає відмінність між теоріями сухого тертя І. В. Крагельського та Ф. Боудена?

Відповіді

1. Молекулярно-механічна теорія тертя І. В. Крагельського розглядає сухе тертя як процес молекулярної та деформаційної взаємодії матеріалів ПШ двох тіл, що рухаються одне відносно одного, а теорія тертя Ф. Боудена визначає процес тертя між тілами, що рухаються одне відносно одного як їх адгезійно-деформаційну взаємодію за дотичного напруження τ_n в зонах фактичного торкання рухомих тіл, яке дорівнює $0,5\sigma_m$, де σ_m – напруження текучості матеріалу тіл.
2. Теорія тертя, адгезійно-деформаційна, запропонована Ф. Боуденом, є окремим випадком молекулярно-механічної теорії тертя І. В. Крагельського за дотичного напруження в зонах контакту взаємодіючих тіл $\tau_n = 0,5\sigma_m$, де σ_m – напруження текучості матеріалу тіл.
3. Суттєвих відмінностей між теоріями сухого тертя І. В. Крагельського та Ф. Боудена немає.

43. Який процес виникає під час ковзання ПШ тіл, які взаємодіють між собою під час сухого тертя?

Відповіді

1. Під час ковзання в процесі сухого тертя одного тіла відносно іншого відбуваються пружне та пластичне змінання в ПШ їх мікронерівностей.
2. Під час ковзання ПШ взаємодіючих тіл в процесі сухого тертя в сумарних сорбційних плівках ПШ тіл, які І. В. Крагельський назвав «третьім тілом», виникає течія, яка, внаслідок в'язкості цього тіла, спричиняє дотичне напруження τ_n згідно з законом Ньютона $\tau_n = \mu \cdot dw / dz$, де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості «третього тіла»; dw / dz – градієнт швидкості w по товщині z «третього тіла». 3. Під час ковзання в процесі сухого тертя в ПШ взаємодіючих тіл виникає пружний або пластичний контакт, який може бути ненасиченим чи насиченим.

44. Який фізичний зміст кута тертя ρ ?

Відповіді

1. Фізичний зміст кута тертя $\rho = \arctg f$ (тут f – коефіцієнт тертя, наприклад, між тілом і поверхнею похилої площини, на якій лежить тіло) визначається з умови рівноваги тіла, коли сила тертя $F_f = F_p$, де F_p – рушійна сила, якщо $F_f \geq F_p$, то тіло не рухається. 2. Кут тертя ρ визначає конічну поверхню, в якій реалізується стан спокою рухомого тіла у випадку проходження вектора зовнішньої сили, що діє на тіло, всередині цієї конічної поверхні через її вершину. 3. Особливого фізичного змісту кут тертя ρ не має.

45. Який фізичний зміст мають коефіцієнт k тертя кочення та коефіцієнт f_k опору коченню?

Відповіді

1. Коефіцієнт k тертя кочення має фізичний зміст плеча сили (є розмірною величиною), на яке зміщується реакція поверхні (основи) з матеріалу зі скінченим модулем пружності, по якій котиться абсолютно тверде колесо ($E_k = \infty$ – модуль пружності матеріалу колеса), а коефіцієнт f_k опору коченню чисельно дорівнює відношенню роботи рушійної сили F_p , що котить колесо на одиничному шляху $\Delta l = r \cdot \Delta\varphi$ (тут r і $\Delta\varphi$ – відповідно радіус і кут повороту колеса), до нормального навантаження F_n колеса. 2. Коефіцієнт k тертя кочення є розмірною величиною, пов'язаною з коефіцієнтом f_k опору коченню залежністю $f_k = k / r$, де r – радіус колеса. 3. Коефіцієнти k тертя кочення та f_k опору коченню не залежать від кутової швидкості та швидкості ковзання колеса.

46. Який силовий фактор є визначальним в забезпеченні, наприклад, в підшипниках чи транспортних машинах режиму чистого тертя кочення?

Відповіді

1. Визначальним силовим фактором режиму чистого тертя кочення є співвідношення між силами нормального навантаження F_n тіл кочення підшипників чи коліс транспортної машини, рушійними силами F_p та силами опору коченню $F_{fk} = f_k \cdot F_n$ (тут f_k – коефіцієнт опору коченню), за якого має виконуватись умова: $F_n > F_p \geq F_{fk}$. 2. Чисте кочення можливе у підшипниках і колесах транспортних машин, якщо рушійна сила F_p суттєво перевищує силу тертя ковзання F_f , тобто $F_p \geq F_f = f \cdot F_n$, де f – коефіцієнт тертя ковзання; F_n – нормальне навантаження тіл кочення підшипників чи коліс транспортної машини. 3. Чисте кочення в підшипниках чи колесах транспортних машин буде за умови $F_p = f_k \cdot F_n$, де f_k – коефіцієнт опору коченню; F_p , F_n – відповідно рушійна та нормальна сили навантаження тіл кочення підшипників чи коліс транспортної машини.

47. Під час прямолінійного руху транспортної машини зі швидкістю v_{TM} її колесо, що обертається з коловою (тангенціальною) швидкістю v_{TK} , потрапляє в яму на дорозі. Пояснити, в якому випадку після удару, внаслідок потрапляння колеса в яму, буде реалізовано чисте тертя кочення колеса по дорозі?

Відповіді

1. Такий випадок тертя кочення колеса по дорозі, внаслідок його потрапляння в яму під час руху транспортної машини, неможливий, буде тертя з ковзанням колеса по дорозі. 2. Чисте тертя кочення колеса по дорозі можливе, якщо після удару колеса, внаслідок його потрапляння в яму під час руху транспортної машини, воно обертатиметься з кутовою швидкістю $\omega_K = (v_{TK} + v_{TM}) / R$, де R – радіус колеса. 3. Режим тертя колеса з «біжучою доріжкою» буде залежати від висоти та довжини відскоку колеса після удару через його потрапляння в яму під час руху транспортної машини.

48. Що розуміють під фрикційним зв'язком (контактом) між тілами?

Відповіді

1. Під фрикційним зв'язком (контактом) між тілами розуміють одиничну пляму контакту, що утворилась за одночасної дії нормальних і тангенціальних навантажень, яка зникає після зняття нормального навантаження. 2. Фрикційний зв'язок (контакт) – це пружна деформація тіл у місці їх торкання. 3. Фрикційний зв'язок (контакт) – це пластична деформація або мікрорізання місця торкання тіл.

49. Якими основними факторами визначається характер порушення фрикційних зв'язків тіл пари тертя?

Відповіді

1. Загалом характер порушення фрикційних зв'язків і процеси, що проходять в ПШ і мікрооб'ємах тіл пари тертя, визначаються геометричними, фізико-механічними та хімічними факторами, які І. В. Крагельський розділив на п'ять видів: пружне відтиснення матеріалу виступами контртіла; пластичне відтиснення матеріалу виступами контртіла; мікрорізання; адгезійне порушення фрикційного зв'язку; когезійний відрив. 2. Основними факторами порушення фрикційних зв'язків є геометричний, який характеризується відношенням h/R , де h – глибина проникнення або стискання тіл пари тертя; R – радіус одиничної мікронерівності, та фізико-механічний τ/σ_m , де τ – напруження межі тангенціальної міцності молекулярного зв'язку тіл пари тертя; σ_m – межа текучості матеріалу тіл пари тертя. 3. Основними факторами, що визначають характер порушення фрикційних зв'язків, є руйнування плівок ПШ тіл пари тертя.

50. Який акт взаємодії між тілами, що зношуються в процесі сухого тертя, називають елементарним?

Відповіді

1. Елементарним актом взаємодії між тілами, що зношуються під час сухого тертя, називають середній діаметр плями контакту між тілами.
2. Будь-який зсув між тілами, що зношуються в процесі сухого тертя, можна вважати елементарним актом взаємодії. 3. Порушення фрикційного зв'язку в окремому одиничному контактні тіл, що зношуються в процесі сухого тертя, можна вважати елементарним актом взаємодії.

51. В чому полягає принципова різниця між загальним числом n_r фрикційних зв'язків і числом N фрикційних зв'язків в кожній точці поверхні тіла, що зношується?

Відповіді

1. Принципової різниці між загальним числом n_r і числом N фрикційних зв'язків немає. 2. Число N фрикційних зв'язків, які виникли та порушились в кожній точці поверхні тіла, що зношується, визначається як відношення $N = \Delta H / \Delta h$ (тут ΔH – знос поверхні тіла; Δh – умовна товщина шару речовини, що відділилась з кожної плями контакту тіл, що зношуються), а загальне число n_r фрикційних зв'язків пов'язане з числом N залежністю $n_r = a \cdot N / d_{1m}$, де a – розмір тіла, що зношується, в напрямку, перпендикулярному до напрямку ковзання; d_{1m} – середній діаметр плями контакту в напрямку перпендикулярному до напрямку ковзання. 3. Число $N = \Delta H / \Delta h$, де ΔH – знос поверхні тіла; Δh – умовна товщина шару речовини, що відділилась з кожної плями контакту тіл, що зношуються, а $n_r = \rho_r \cdot A_a$, де ρ_r – густина плям контакту тіл, що зношуються; A_a – номінальна площа контакту тіл (НПК).

52. За якого припущення шлях тертя « L_f » буде обернено пропорційним розміру « a » зношуваного тіла в напрямку, перпендикулярному до напрямку ковзання тіл, які взаємодіють між собою?

Відповіді

1. Найпростішою формулою для визначення шляху тертя L_f між тілами, що труться між собою, буде залежність $L_f = A_f / a$, де A_f – площа тертя; a – розмір зношуваного тіла в напрямку ковзання, який перпендикулярний до напрямку руху тіл. Ця формула справедлива за умови $A_f = A_a$, де A_a – НПК.
2. Шлях тертя « L_f » буде обернено пропорційним розміру « a » тіла, що зношується, в напрямку, перпендикулярному до напрямку ковзання тіл, які взаємодіють між собою, за умови, що всі площі контакту між тілами, які взаємодіють, під час їх відносного руху рівні між собою, тобто $A_f = A_a = A_r$, де A_f – площа тертя; A_a – НПК; A_r – ФПК.
3. Припущення, що розмір « a », яке зношується, обернено пропорційним шляху тертя « L_f » буде справедливим за умови $A_f = A_r$, де A_f – площа тертя; A_r – ФПК.

53. За якою причиною безрозмірна лінійна інтенсивність I_h зношування є більш зручною для користування ніж, наприклад, розмірна характеристика зношування I_m , розмірність якої $кг/м$?

Відповіді

1. Яких-небудь особливих причин для більш зручного користування між вказаними в питанні характеристиками зношування немає, оскільки вони обидві виражаються простими формулами, відповідно: $I_h = \Delta H / L_f$; $I_m = \Delta m / L_f$, де ΔH – знос поверхні тіла; L_f – шлях тертя між тілами; Δm – маса зношеного матеріалу тіла на шляху тертя L_f . 2. Безрозмірна характеристика зношування I_h порівняно з розмірною I_m більш зручна для користування, оскільки не прив'язана до системи одиниць (наприклад, СІ), що зменшує йморність помилок. 3. Такої причини не існує, це просто питання «смаку» дослідника.

54. Як впливає на питому інтенсивність i_h зношування число циклів n фрикційної взаємодії між тілами, що перебувають в процесі зношування під час сухого тертя між ними?

Відповіді

1. Число циклів n фрикційної взаємодії між тілами, що перебувають в процесі зношування під час сухого тертя між ними не впливає на питому інтенсивність i_h зношування. 2. Питома інтенсивність i_h зношування обернено пропорційна числу циклів n фрикційної взаємодії між тілами, що перебувають в процесі зношування під час сухого тертя, прямо пропорційна проникненому об'єму V_v матеріалу, який бере участь в контактній деформації, а також обернено пропорційна добутку $A_r \cdot d_m$, де A_r – ФПК; d_m – середній діаметр плями контакту між тілами, що взаємодіють. 3. Число циклів n фрикційної взаємодії між тілами, що перебувають в процесі зношування під час сухого тертя між ними, обернено пропорційне питомій інтенсивності i_h зношування, яка залежить від параметрів мікронерівностей ПШ тіл, що труться між собою.

55. Який основний параметр процесу зношування тіл під час сухого тертя між ними визначає їх швидкість зношування I_t ?

Відповіді

1. Основним параметром процесу зношування тіл під час сухого тертя між ними, що визначає швидкість зношування I_t , є швидкість v_s взаємного ковзання тіл, які взаємодіють в процесі зношування. 2. Швидкість зношування I_t тіл в процесі сухого тертя насамперед залежить від шляху тертя L_f . 3. Швидкість зношування I_t тіл в процесі сухого тертя визначається тривалістю t_f процесу тертя.

56. Яка з двох залежностей зносостійкості Z_h чи Z_w та чому частіше використовується на практиці для оцінення зносостійкості машинобудівних виробів?

Відповіді

1. Як відомо, зносостійкості машинобудівних виробів $Z_h = I_h^{-1}$ та $Z_w = I_w^{-1}$, де $I_h = dH / dL_f$ – лінійна безрозмірна інтенсивність зношування (тут dH – елементарний знос виробу; dL_f – елементарний шлях тертя); $I_h = dH / dW_f$, H^{-1} (тут dW_f – елементарна робота сил тертя, Н·м) – розмірна лінійна інтенсивність зношування (енергетична характеристика зношування). Оскільки Z_h безрозмірна величина, а Z_w – розмірна, то частіше використовують Z_h , яка не потребує прив'язки до якої-небудь системи одиниць. 2. Зносостійкість машинобудівних виробів Z_h використовується частіше ніж Z_w , оскільки для визначення Z_h побудовано таблиці. 3. Частіше використання для оцінення зносостійкості виробів Z_h порівняно із Z_w обумовлено традицією, яка склалась під час орієнтовної оцінки надійності машинобудівних виробів.

57. За яких умов в рухомих спряженнях деталей машин виникає заїдання та схоплення між поверхнями рухомого контакту деталей?

Відповіді

1. Заїдання та схоплення між поверхнями рухомого контакту деталей виникає в умовах адгезійного зношування за високих навантажень спряження деталей рухомого з'єднання та характеризується глибинним вириванням матеріалу, перенесенням його з однієї поверхні тертя на іншу та дією нерівностей, що виникли, на спряжену поверхню. 2. Заїдання та схоплення між поверхнями рухомого контакту деталей виникає під час втомного зношування внаслідок руйнування ПШ деталей. 3. Заїдання та схоплення між поверхнями рухомого контакту спряжених деталей машин – це наслідок корозійно-механічного зношування цих деталей.

58. До якого підкласу зношування деталей рухомих спряжень відносять фретінг, стомлення, електроерозійне та електромеханічне руйнування поверхонь тертя й водневе зношування?

Відповіді

1. Ці види зношування відносяться до адгезійного зношування. 2. Перераховані види зношування деталей рухомих спряжень потрібно віднести до окисного зношування. 3. Перераховані у питанні види зношування – це підклас корозійно-механічного зношування в рухомих спряженнях деталей машин.

59. В чому полягає різниця між видами водневого зношування – руйнуванням (ВЗР) і диспергуванням (ВЗД)?

Відповіді

1. Внаслідок накопичення в ПШ деталей водню під час ВЗР відбувається диспергування – тонке розмелювання матеріалу ПШ, а під час ВЗД такий процес не спостерігається, що обумовлює процес зношування деталей через розпушування ПШ деталей. 2. Особливої різниці між видами водневого зношування ВЗР і ВЗД немає. 3. ВЗР і ВЗД визначаються рівнем накопичення водню в ПШ пари деталей рухомого спряження.

60. В чому полягає різниця між ерозійним і кавітаційним видами зношування?

Відповіді

1. Як під час ерозійного зношування, так і під час кавітаційного відбувається викришування частинок поверхні тіла під дією потоку рідини чи газу. 2. Ерозійне зношування – руйнування поверхонь тертя потоком абразивних частинок, що переносяться рідиною або газом, кінетична енергія яких пластично деформує поверхню тертя за умови достатньої енергії частинок. А у випадку кавітаційного зношування в примежовому шарі потоку рідини біля поверхні тіла є зони підвищеного тиску та розрідження, які спричиняють утворення газових бульбашок, що порушує суцільність потоку. Бульбашки, потрапляючи в зони високого тиску, закриваються та спричиняють ефект гідравлічних ударів, які інтенсифікують процеси руйнування поверхні тіла, що омивається потоком рідини. 3. Види ерозійного та кавітаційного зношування подібні між собою і великої різниці між ними немає.

61. Чому сервовітна плівка, наприклад, мідна, яка утворюється під час вибіркового перенесення, внаслідок її багатократного деформування не руйнується та втомно не зношується?

Відповіді

1. Сервовітна плівка має розпушену, пористу структуру, що обумовлюється наявністю в ній більше 10% вакансій, і поводить як квазірідина, яка покриває мікронерівності деталей рухомого спряження та сприймає всі зовнішні навантаження цих деталей без руйнування під час багатоциклічного деформування. 2. Властивості сервовітної плівки сприймати навантаження під час багатоциклічного деформування обумовлені її структурною будовою. 3. Неруйнування сервовітної плівки обумовлено тим, що вона під час роботи спряжених рухомих деталей розподіляє зовнішні навантаження рівномірно по всій поверхні тертя деталей.

62. З якою метою змащують вузли тертя машин?

Відповіді

1. Вузли тертя машин змащують з метою зменшення опору під час тертя деталей в рухомих спряженнях машин і механізмів та зношування цих деталей. 2. Вузли тертя машин змащують з метою зниження сил тертя під час ковзання однієї деталі вузла тертя по іншій. 3. Змащення вузлів тертя машин зменшує енергетичні затрати на переміщення рухомих деталей вузла тертя відносно одна одної.

63. Чому кут змочування Θ мастильних матеріалів має бути меншим 90° ?

Відповіді

1. За кута змочування $\Theta < 90^\circ$ забезпечується рівномірний розподіл зовнішнього навантаження по всій поверхні контакту між поверхнями деталей рухомого спряження вузла тертя. 2. Умова $\Theta < 90^\circ$ забезпечує виконання головної властивості в триботехнічному спряженні – гарне змочування контактуючих поверхонь деталей вузла тертя. 3. Умова $\Theta < 90^\circ$ забезпечує демфірування динамічних навантажень (вібрацій та ударів) деталей вузла тертя.

64. Від чого залежить величина кута змочування Θ ?

Відповіді

1. Величина кута змочування Θ залежить від когезійних сил притягування між молекулами рідини, сил притягування рідини частинками (іонами, молекулами, остовами атомів), що утворюють поверхню твердого тіла, сил притягування молекул рідини, які не мають контакту з поверхнею твердого тіла, але знаходяться на відстані міжмолекулярної взаємодії, та сил ваги. 2. Основне значення мають когезійні сили притягування між молекулами рідини. 3. Величина кута змочування Θ залежить здебільшого від когезійних сил притягування між молекулами рідини, які збільшують кут Θ .

65. Який основний параметр в характеристиці режиму роботи $\lambda = \mu \cdot \omega / p_m$ (тут μ – динамічна в'язкість мастила; ω – кутова швидкість вала; p_m – питоме навантаження на підшипник) гідродинамічного підшипника ковзання визначає мінімальний коефіцієнт f_p рідинного тертя в ньому?

Відповіді

1. Мінімальний коефіцієнт f_p рідинного тертя в гідродинамічному підшипнику ковзання буде за певного співвідношення в характеристиці режиму його роботи λ між параметрами μ та p_m . 2. Виникнення режиму рідинного

тертя в гідродинамічному підшипнику ковзання, за якого мінімальний коефіцієнт f_p рідинного тертя буде під час «спливання» поверхні вала в зазорі підшипникової втулки за досягнення валом критичної кутової швидкості $\omega_{кр} = \lambda_{\min} \cdot p_m / \mu$, якій відповідає мінімальне значення λ_{\min} характеристики режиму роботи підшипника. 3. Мінімальний коефіцієнт f_p рідинного тертя в гідродинамічному підшипнику ковзання буде за мінімального значення питомого навантаження p_m на підшипник.

66. За яких умов в підшипниках ковзання гідродинамічних і гідростатичних реалізується еластогідродинамічне мащення?

Відповіді

1. Еластогідродинамічне мащення реалізується в підшипниках рідинного тертя (гідродинамічних і гідростатичних) за великих на них навантажень, які спричиняють значні пружні деформації поверхонь контакту деталей пари тертя. 2. Еластогідродинамічне мащення реалізується за значної в'язкості мастильних матеріалів, що використовуються для мащення підшипників. 3. Еластогідродинамічне мащення має місце в підшипниках вузлів тертя важконавантажених машин, наприклад, прокатних станів.

67. Який режим тертя реалізується у гідродинамічних підшипниках ковзання в періоди розгону та вибігання валів машин, опорами яких є гідродинамічні підшипники?

Відповіді

1. В гідродинамічних підшипниках опор валів машин в періоди розгону та вибігання реалізується напіврідинний режим тертя. 2. Згідно з кривою Герсі – Штрібека, у гідродинамічних підшипниках опор валів машин в періоди розгону та вибігання здійснюється змішане тертя, яке залежно від величини кутової швидкості валів містить ділянки сухого, граничного, напіврідинного та рідинного тертя. 3. В періоди розгону та вибігання валів машин, що обертаються в гідродинамічних підшипниках, реалізується сухе та граничне тертя.

68. Що розуміють під поняттям «старіння мастила»?

Відповіді

1. Під поняттям «старіння мастила» розуміють зміну його кольору у випадку перевершення допустимого терміну експлуатації мастила. 2. Під поняттям «старіння мастила» розуміють зміну його хімічного та фазового складу, яка спричиняється термохімічними процесами в мастильних матеріалах (теплове розкладання, дегідрування й осмолювання тощо вуглеводневих компонентів мастила) та їх окислюванням під час роботи вузлів тертя машин. 3. Під поняттям «старіння мастила» розуміють зміну його

окислення внаслідок приєднання до найменш стійких компонентів мастила кисню з повітря, що перетворює мастильний матеріал на агресивне кислотне середовище.

69. За якими методами оцінюють фрикційні матеріали вузлів тертя машин?

Відповіді

1. Фрикційні матеріали вузлів тертя машин оцінюють за геометричними, фізичними та механічними характеристиками матеріалів. 2. Фрикційні матеріали вузлів тертя машин оцінюють за трьома методами, які враховують їх геометричні, фізичні та механічні характеристики, а також за результатами експериментальних випробовувань вузлів тертя машин на стендах і в реальних механізмах із врахуванням власних фрикційних характеристик пар твердих тіл вузла тертя. 3. Фрикційні матеріали вузлів тертя машин оцінюють за результатами експериментальних досліджень властивостей цих матеріалів на стендах і в реальних механізмах.

70. За якою ознакою класифікують установки для випробовування матеріалів тертям?

Відповіді

1. Всі установки для випробовування матеріалів тертям класифікують за кінематичною ознакою – однонаправленого відносного переміщення та знакозмінного. 2. Установки для випробовування матеріалів тертям ділять за характером руйнування поверхонь тертя під час випробовування матеріалів. 3. Машини під час випробовувань матеріалів тертям ділять за видами фрикційних випробовувань, наприклад, фрикційної теплосійкості, зношування під час великих навантажень тощо.

ЛІТЕРАТУРА

1. Основи трибології : підручник / А. М. Антипенко та ін. / за ред. В. А. Войтова. Харків : ХНТУСГ, 2008. 342 с.
2. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О. Триботехніка та основи надійності машин : навчальний посібник. К. : Інформавтодор, 2006. 216 с.
3. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах : навчальний посібник. Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.
4. Дискретне зміцнення та зносостійкість циліндричних трибосистем ковзання : [монографія] / Диха О. В. [та ін.]. - Хмельницький : ХНУ, 2016. - 197 с. : рис., табл. - Бібліогр.: с. 173-194. - 300 прим. - ISBN 978-966-330-260-7.
5. Термінологічний словник-довідник з трибології, надійності та нанотехнологій / М-во освіти та науки України, Запорізь. нац. техн. ун-т ; Л. Й. Івченко, В. Ю Черкун, В. І. Кубіч, В. В. Черкун ; за заг. ред. Л. Й. Івченка. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. – 116 с.
6. Триботехніка і надійність машин : навчальний посібник / Ю. О. Харламов та ін. Сєверодонецьк : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2021. 184 с.
7. Косенко В.А., Кущевська Н.Ф., Добровольський О.Г., Малишев В.В. Сучасні аспекти трибології у транспортних засобах. – К.: Університет «Україна», 2016. – 356 с. – ISBN 978-966-388-546-9.8. Максименко О. П. Лейко О. Є. Основи трибології : навч. посібник. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2005. 192 с.
9. Надійність обладнання харчової галузі : навчальний посібник / Ю. Г. Сухенко та ін. К. : ЦП «Компрінт», 2019. 372 с.
10. Дослідження механізмів та триботехнічних систем / М. В. Чернець та ін. / за заг. ред. М. В. Чернеця. Дрогобич : Коло, 2003. 440 с.
11. Шевченко І. А. Використання трибоніки і триботехніки при створенні металургійного обладнання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 160 с.
12. Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. Надійність машин : підручник для студ. вузів. К. : Либідь, 2003. 424 с.
13. Birolini A. Reliability Engineering: Theory and Practice. / 8th Edition. Springer-Verlag GmbH, Deutschland, 2017. 666 p.
14. «Триботехніка». Курс лекцій / Д. П. Журавель та ін. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 280 с.
15. Трибологія / М. В. Кондрачук та ін. К. : Вид-во Національного Авіаційного університету «НАУ-друк», 2009. 232 с.
16. Взаємозамінність, стандартизація та технічне вимірювання : навчальний посібник / Пахаренко В. Л. та ін. Рівне, 2014. 198 с.
17. Савуляк В. І. Методи та засоби дослідження складу, структури та властивостей матеріалів : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2021. 76 с.
18. Савуляк В. І., Івацько В. Т. Відновлення деталей машин. Ч. 1 : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2004. 93 с.
19. Вишенський І. І. Теорія механізмів та машин. Механічні передачі : навчальний посібник. К. : НМК ВО, 1992. 356 с.

20. Романюк О. Д., Теліпко Л. П., Ракша С. В. Теоретична та прикладна механіка. Короткий курс. Кам'янське : ДДТУ, 2021. 282 с.
21. Савуляк В. І., Шенфельд В. Й. Наплавлення високовуглецевих зносостійких покриттів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2016. 124 с.
22. Савуляк В. І., Бакалець Д. В., Савуляк В. В. Ремонт та локальне зміцнення рам транспортних машин : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2019. 1 електрон.-опт. диск (CD-ROM).
23. Береза О. Ю. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2020. Вип. 88, т. 1. С. 86–90.
24. Аулін В. В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах : монографія. Кіровоград : КОД, 2014. 370 с.
25. Мархель І. І. Деталі машин : навчальний посібник. К. : Алерта, 2017. 368 с.
26. Стадник В. А. Деталі машин. К. : НТУУ КПІ, 2012. 650 с.
27. Обертюх Р. Р., Іскович-Лотоцький Р. Д. Ущільнення та мащення вузлів тертя машин : навчальний посібник. К. : НДО, 1994. 168 с.
28. Методи досліджень та обробки у видавництві та поліграфії : навч. посібник для аспірантів спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» ОНП «Видавництво та поліграфія» третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти / Уклад.: П. О. Киричок, Т. А. Роїк. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 37с.
URL:<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/bf2a6f51-7d4b-4c51-ab71-c3b39462a369/content>
29. Матеріалознавство тугоплавких металів та сполук : навчальний посібник /Г. П. Кисла та ін. К. : Центр навчальної літератури (ЦНЛ), 2019. 320 с.
30. ДСТУ 2823-94 «Зносостійкість виробів. тертя. зношування та мащення. терміни та визначення»
31. Павлице В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин. Львів : Афіша, 2004. 578 с.
32. Обертюх Р. Р. Триботехніка : навчальний посібник. Вінниця : ВДТУ, 1999. 78 с.
33. ДСТУ 8647:2016 Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і/або експлуатації в умовах малої кількості відмов
34. Надійність та експлуатація гідромашин і гідроприводів : навчальний посібник / В. Ф. Герман та ін. Суми : Сумський державний університет, 2016. 175 с.
35. Трибологія : підручник / М. В. Кіндрачук та ін. К. : НАУ, 2009. 310 с.

Українсько-англійський словник найбільш вживаних термінів

1. Абсорбція –	Absorption
2. Адгезія –	Adhesion
3. Адсорбція –	Adsorption
4. Абразивне зношування –	Abrasive wear
5. Адгезійне зношування –	Adhesive wear
6. Базова лінія –	Baseline
7. Бочкоподібність –	Barrel-shaped profile
8. Вакансія –	Vacancy
9. Відновлення –	Restoration
10. Вибіркове перенесення –	Selective transfer
11. Випуклість –	Convexity
12. Водневий –	Hydrogen
13. Водневе зношування –	Hydrogen wear
14. Вектор Бюргерса –	Burgers vector
15. Втомленість –	Fatigue
16. Втомне зношування –	Fatigue wear
17. В'язкість –	Viscosity
18. Гексагональний –	Hexagonal
19. Гетерополярний –	Heteropolar
20. Гідродинамічний –	Hydrodynamic
21. Гідростатичний –	Hydrostatic
22. Гомеополярний –	Homeopolar
23. Граничне тертя –	Boundary friction
24. Дефект –	Defect
25. Деформаційна складова тертя –	Deformation component of friction
26. Деформування –	Deformation
27. Дислокація гвинтова –	Screw dislocation
28. Дислокація краєва –	Edge dislocation
29. Дисперсійні –	Dispersive
30. Еластогідродинамічний –	Elastohydrodynamic
31. Електроерозійне зношування –	Electroerosive wear
32. Електромеханічне зношування –	Electromechanically wear
33. Зближення –	Convergence
34. Зв'язок –	Bond
35. Здатність –	Capability
36. Змащення –	Lubrication
37. Змочування –	Wetting
38. Зносостійкість –	Wear resistance
39. Зношування –	Wear
40. Зчеплення –	Cohesion

41. Імпульс –	Impulse
42. Іонний –	Ionic
43. Індукційні –	Inductive
44. Інтенсивність зношування –	Wear rate
45. Люмінесцентна фарба –	Luminescent paint
46. Кавітація –	Cavitation
47. Ковалентний –	Covalent
48. Ковзання –	Sliding
49. Когезія –	Cohesion
50. Коефіцієнт тертя –	Coefficient of friction
51. Корозійно-механічне зношування –	Corrosion-mechanical wear
52. Контакт –	Contact
53. Конусність –	Conicity
54. Конформаційні –	Conformational
55. Контртіло –	Counter body
56. Конус тертя –	Friction cone
57. Кристал –	Crystal
58. Кубічна гранецентрована –	Face-centered cubic
59. Круг тертя –	Friction ring
60. Кут змочування –	Contact angle
61. Кут тертя –	Friction angle
62. Макровідхилення –	Macrodeviation
63. Мастило –	Lubricant
64. Металевий –	Metallic
65. Мікровідхилення –	Microdeviation
66. Мікрорізання –	Micromachining
67. Мікротвердість –	Microhardness
68. Молекулярна складова тертя –	Molecular component of friction
69. Наклеп –	Work hardening
70. Незношуваність –	Wearability
71. Насичений –	Saturated
72. Ненасичений –	Unsaturated
73. Об'ємно центрована –	Body-centered
74. Окисне зношування –	Oxidative wear
75. Орієнтаційні –	Orientational
76. Опорна крива –	Support curve
77. Переповзання –	Creep
78. Перестрибування –	Jumping
79. Пітінг –	Pitting
80. Пластичний –	Plastic
81. Площі контакту: КПК; НПК; ФПК –	Contact areas: MML; SML; BML
82. Пляма –	Spot

83. Пляма контакту –	Contact spot
84. Поверхневий шар (ПШ) –	Surface layer (SL)
85. Прозора плівка –	Transparent film
86. Профіль –	Profile
87. Профілограма –	Profilogram
88. Процес –	Process
89. Пружний –	Elastic
90. Радіус тертя –	Friction radius
91. Руйнування –	Destruction
92. Старіння мастила –	Lubricant aging
93. Субмікрошорсткість –	Submicroroughness
94. Сухе тертя –	Dry friction
95. Тепловідведення –	Heat dissipation
96. Термохімічний процес –	Thermochemical process
97. Тертя –	Friction
98. Тетрагональна –	Tetragonal
99. Тертя вертіння –	Spinning friction
100. Тертя ковзання –	Sliding friction
101. Тертя кочення –	Rolling friction
102. Тиск –	Pressure
103. Тіло –	Body
104. Трибологія –	Tribology
105. Триботехніка –	Tribotechnics
106. Тривалість процесу тертя –	Duration of the friction process
107. Увігнутість –	Concavity
108. Ударний імпульс –	Impact impulse
109. Фретінг –	Fretting
110. Фретінг-корозія –	Fretting corrosion
111. Фрикційна взаємодія –	Frictional interaction
112. Фрикційний зв'язок –	Frictional bond
113. Фрикційний контакт –	Frictional contact
114. Характеристика –	Characteristic
115. Характеристика режиму роботи –	Operating mode characteristic
116. Хвилястість –	Waviness
117. Цикл –	Cycle
118. Циклова втомленість –	Cyclic fatigue
119. Шлях тертя –	Friction path
120. Швидкість зношування –	Wear rate
121. Шорсткість –	Roughness
122. Шорсткість нерівноважна –	Nonequilibrium roughness

Електронне навчальне видання

**Роман Романович Обертюх
Андрій Валентинович Слабкий**

ТРИБОТЕХНІКА МАШИНОБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ

Навчальний посібник

Рукопис оформив *Р. Обертюх*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет виготовила *Т. Старічек*

Підписано до видання 17.02.2025 р.
Гарнітура Times New Roman.
Зам. № P2025-034.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
press.vntu.edu.ua;

Email: rvv.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.