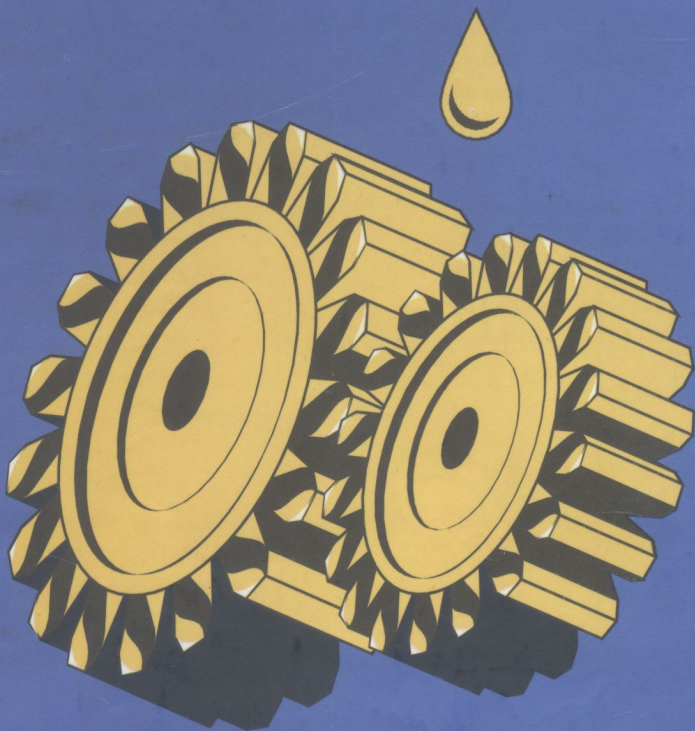


М.Ф. Дмитриченко  
Р.Г. Мнацаканов  
О.О. Мікосянчик

# ТРИБОТЕХНІКА ТА ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ МАШИН



621.89(075)  
А 53

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Дмитриченко М.Ф.,  
Мнацаканов Р.Г.,  
Мікосянчик О.О.**

**ТРИБОТЕХНІКА  
ТА ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ МАШИН**

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник  
для студентів вищих навчальних закладів*

**ІНФОРМАВТОДОР**

**КИЇВ**

УДК 621.891(075.8)

ББК 34.41я73

Д 53

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів (Лист Міністерства освіти і науки України № 1.4/18-Г-1164 від 21.11.06*

*Рішення вченої Ради Національного транспортного університету від 05.10.2006*

**Рецензенти:**

*М.Л. Голего, докт. техн. наук, член-кореспондент НАН України, директор ДП «НТЦ» Триботехніка»;*

*М.В. Кіндрачук, докт. техн. наук, зав. кафедри машинознавства Національного авіаційного університету*

**Дмитриченко М.Ф., Мнацаканов Р.Г., Мікосянчик О.О. ТРИБОТЕХНІКА ТА ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ МАШИН: Навчальний посібник. — К.: ІНФОРМАВТОДОР, 2006. — 216 с.**

ISBN 966-2945-01-6

В посібнику викладені основні питання триботехніки стосовно режимів мащення в триботехнічних системах, підбору та властивостей мастильних матеріалів і матеріалів контактуючих тіл, представлені основні види зношування та розкриті механізми зносу елементів трибоспрямлення, а також наведені напрями підвищення зносостійкості матеріалів вузла тертя.

У другому розділі, який описує надійність машин та механізмів, дані основні поняття про складові надійності, представлені загальні математичні моделі оцінки надійності та наведені схеми планування експериментів, проаналізовані закономірності, які призводять до відмов механізмів і запропоновані способи резервування об'єктів.

Даний посібник рекомендується для аспірантів і студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів України.

УДК 621.891(075.8)

ББК 34.41я73

431324

ISBN 966-2945-01-6

© Дмитриченко М.Ф.

© Мнацаканов Р.Г.

© Мікосянчик О.О., 2006

© ІНФОРМАВТОДОР, 2006

НТЕ ВНТУ  
м. Вінниця

## ВСТУП

Сучасні вимоги до надійності й довговічності трибомеханічних систем пов'язані з якісним поліпшенням змащувальних матеріалів, їх складових і обумовлені поглибленим аналізом стану змащувального середовища та контактної поверхні металу в процесі тертя.

У сучасних умовах технологія виробництва змащувальних матеріалів і їх компонентів інтенсивно розвивається й удосконалюється. Створюються нові змащувальні матеріали на мінеральній і синтетичній основах, ведуться серйозні розробки з оптимізації компонентного складу масел і мастил, удосконалюються їх фізичні, хімічні та експлуатаційні властивості.

Загальновідомо, що близько 25–30% виробничих потужностей витрачається на подолання сил тертя. Рішення низки питань, пов'язаних з удосконаленням якості як змащувальних матеріалів, так і рівнем змащувальної дії і, в цілому, підвищенням ефективності змащувального процесу, дозволило б знизити енергетичні витрати при експлуатації машинного парку в середньому на 4–5%. Удосконалення техніки мащення і поліпшення якості моторних і трансмісійних масел дасть змогу зменшити витрату палива на 10–15%, підвищити моторесурс двигунів внутрішнього згоряння на 30%, збільшити термін заміни масла і знизити загальну витрату мастильного матеріалу в 3,5–4 рази, значно зменшити витрати на обслуговування технічних засобів та їх ремонт.

У сучасній концепції теорії змащувальних процесів мастильні матеріали розглядаються як конструкційний елемент трибомеханічної системи, разом з такими загальноприйнятими поняттями, як матеріали контактних поверхонь, хіміко-термічна обробка, швидкісний і навантажувальний режими та ін.

У сучасній літературі, на жаль, відсутня єдина точка зору щодо характеру змащувальної дії, що, імовірно, пов'язано з відсутністю загальної теорії змащування, яка б характеризувала всі існуючі режими мащення —

від граничного до гідродинамічного, з урахуванням багаточисельних перехідних зон, структури змащувального шару, його реологічних характеристик. Усі перераховані чинники істотно впливають на антифрикційні та протизношувальні властивості пар тертя.

Кінетика процесу зношування пов'язана із станом змащувального шару і його найважливішою характеристикою — товщиною мастильного шару. Встановлено, що відмова трибомеханічної системи визначається двома чинниками: необхідним — руйнуванням змащувального шару і додатковим — руйнуванням контактної поверхні. Але якщо питання, пов'язані з руйнуванням поверхні тертя, достатньо повно вивчені і описані в літературі, то поведінка тонких змащувальних шарів напередодні й у момент руйнування залишається ще багато в чому не дослідженою, що обумовлено складністю експериментального моделювання цих процесів.

Сучасний аналіз експлуатаційних відмов зубчастих передач, підшипників кочення, деталей циліндро-поршневої групи двигунів внутрішнього згоряння, кулачкових механізмів, варіаторів тощо встановив, що вони значною мірою схильні до заїдання і схоплювання. Найважливішим чинником, який зумовлює розвиток катастрофічних видів зношування, як показали численні роботи в Україні та провідних лабораторіях світу, є динаміка товщини змащувального шару в період недостатньої кількості мастильного матеріалу в зоні контакту — так зване масляне голодування.

Усе різноманіття питань, пов'язаних із теоретичними і практичними уявленнями про характер змащувальних процесів та зношування в контакті тертя, базується на фундаментальних поняттях матеріалознавства, металофізики, металографії, термодинаміки, колоїдної хімії та ін. Враховуючи це, автори пропонованої роботи спробували охопити спектр питань, пов'язаних з розкриттям процесів тертя, зношування і надійності з урахуванням сучасних уявлень, і описати матеріал в доступній для сприйняття формі.

## ВИНИКНЕННЯ І РОЗВИТОК ТРИБОЛОГІЇ І ТРИБОТЕХНІКИ

**Трибологія** — це наука про тертя, знос, вид мащення і взаємодію контактуючих поверхонь при їх взаємному переміщенні. Назва цієї наукової дисципліни утворена з грецьких слів "трибос" — тертя і "логос" — наука. Трибологія як наукова дисципліна охоплює експериментально-теоретичні дослідження фізичних (механічних, електричних, магнітних, теплових), хімічних, біологічних та інших явищ, пов'язаних із тертям.

**Триботехніка** — це впорядковані знання про практичне застосування трибології. Тертю супутні процеси трибологічного зношування, і використання цих знань на практиці є важливим розділом триботехніки.

Отже, трибологія є наукою про зовнішнє тертя твердих тіл та внутрішнє тертя твердих і рідких тіл, а триботехніка — наукою про практичне застосування трибології при проектуванні, виготовленні й експлуатації трибологічних систем. Трибологічна система — це комплекс елементів (чинники зовнішнього середовища, властивості змащувального матеріалу і матеріалів деталей трибоспряження), включаючи зв'язки, які існують між цими елементами та їх властивостями (рис. 1).

Ще доісторичну людину цікавили дві властивості тертя. Першим практичним застосуванням стало використання тепла, що виділяється при терті для добування вогню. Другим практичним завданням було подолання тертя при транспортуванні матеріалів. Людина використовувала сани для транспортування ще 9000 років тому. При вирішенні складних транспортних завдань при зведенні пірамід єгиптяни використовували рідке масло, замінюючи зовнішнє тертя твердих тіл внутрішнім тертям рідини.

Одним із найбільших винаходів людини було колесо. Воно дало змогу істотно знизити роботу, потрібну для подолання тертя, тому

що тертя ковзання було замінено тертям кочення. За результатами археологічних досліджень відомо, що переваги кочення порівняно з ковзанням були визнані ще більше 5000 років тому в Месопотамії.

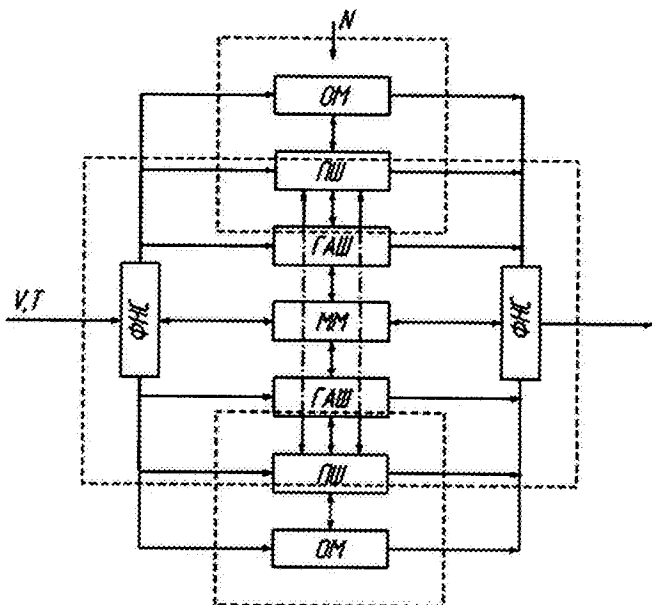


Рис. 1. Взаємозв'язок зовнішніх факторів, мастильного матеріалу та поверхонь тертя в умовах локального контакту.  $N$ ,  $V$ ,  $T$  — відповідно навантаження, швидкість, температура (ФНС — фактори навколишнього середовища); ММ — мастильний матеріал; ГАН — граничні адсорбційні шари; ПШ — поверхневі шари металу; ОМ — об'ємна (внутрішня) зона металу.

Шляхом удосконалення конструкції підшипників ковзання і застосування змащувальних матеріалів удалося зменшити тертя ковзання. Перший перелік змащувальних матеріалів був складений Плінієм-старшим (23 — 73 р. нашої ери). Застосовувалися рослинні масла, мазі зі смоли дерев, тваринні жири. Мінеральні масла почали застосовувати в XIX ст., а з 1930 року набули поширення синтетичні масла.

Разом з практичними рішеннями щодо зменшення тертя з'явилися перші наукові роботи з трибології. Леонардо да Вінчі (1452 – 1519 рр.) уперше вказав на пропорційність опору тертя навантаженню на контактні поверхні ( $F = fN$ ). За результатами своїх експериментів він установив, що сила тертя рівна чверті навантаження і постійна для всіх матеріалів (тобто  $f = 0,25 = \text{const}$ ).

Г. Амонтон у 1699 р. і Ш. Кулон у 1781 р. запропонували правила, які описують тертя твердих тіл на основі обширних експериментів. Кулон розробив спеціальний прилад для вимірювання сили тертя – трибометр (рис. 2).

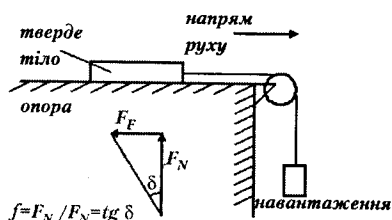


Рис. 2. Схема трибометра, за допомогою якого Кулон вимірював силу тертя.

Згідно з експериментальними результатами Амонтона і Кулона, сила тертя  $F_F$  пропорційна нормальному навантаженню  $F_N$ . Відношення сили тертя до нормального навантаження називається коефіцієнтом тертя  $f = F_F / F_N$ . Експериментально було доведено, що коефіцієнт тертя не залежить від геометричної площі контакту. Для пояснення цих результатів була висунута гіпотеза шорсткості, згідно з якою поверхні покриті нерівностями, і тертя виникає на взаємопроникаючих нерівностях контактуючих поверхонь. Кулон також урахував можливість адгезійних процесів при терті, на що вказував І.Т. Дезагюльє, який зафіксував сильну адгезію між свинцевими сферами, притиснутими одна до одної, і висловив гіпотезу про вплив на тертя сил молекулярної взаємодії. Кулон уперше запропонував двочленну формулу, згідно з якою  $F = A + fN$ , де  $A$  – характеристика міри зчеплення, яка не залежить від навантаження. Він вважав, що міра зчеплення  $A$  мала і нею можна нехтувати,



а тертя зумовлене передусім взаємним втіленням і деформацією нерівностей тіл тертя.

У другій половині XIX ст. Б. Тауер випадково відкрив явище динамічного тиску при відносному русі шарів змащувальних матеріалів. На основі експериментів Тауера О. Рейнольдсом була розроблена гідродинамічна теорія мащення (1886 р.), а в 1883 р., незалежно від Рейнольдса, основи гідродинамічної теорії мащення були розроблені М.П. Петровим.

Створення експериментальних основ теорії граничного тертя і розробка концепції структури граничного шару належать У. Гарді (1936 р.). У 30-і роки XX ст. У. Гарді, Ф. Боуден і Д. Тейбор створили адгезійну теорію тертя. У цій теорії передбачалося, що сила тертя необхідна для подолання сил молекулярного зчеплення, які діють між контактуючими поверхнями. У 60-і роки вони запропонували й експериментально підтвердили адгезійно-деформаційну теорію тертя.

Припущення про подвійну природу тертя і розробка молекулярно-механічної теорії тертя належать І.В. Крагельському (1939 р.).

Початком систематичних досліджень природи зношування твердих тіл при терті можна вважати 30-і роки XX ст. Так, Е. Зібель у 1938 р. виділив такі типи зносу залежно від природи зовнішніх умов:

- знос сухих поверхонь при терті ковзання;
- знос змащених поверхонь при терті ковзання;
- знос сухих поверхонь при терті кочення;
- знос змащених поверхонь при терті кочення;
- знос при вібраційному контакті;
- знос рухомими твердими частинками (ерозія);
- знос рухомою рідиною (кавітація).

Вивченню природи зношування і встановленню основних механізмів зношування присвячені роботи В.Ф. Лоренця, І.В. Крагельського, А.К. Зайцева, Ф. Боудена, Д. Тейбора, М.М. Хруцова та ін.

Проблема зниження втрат на тертя є центральною в трибології. Так, згідно з аналізом багаточисельних експериментальних досліджень, тертя поглинає близько чверті всієї енергії, яка використовується людиною. Майже вся енергія, що споживається

транспорт, витрачається на тертя, і зниження цих витрат на 10 % тільки в двигунах внутрішнього згоряння забезпечує зменшення питомої витрати палива на 2,6 %. Незважаючи на прогрес в розвитку трибології, ця проблема стає все більш гострою, і не тільки тому, що збільшується чисельність енергоспоживаючих пристроїв і виснажуються запаси енергоносіїв. Важливим чинником є безперервне зростання швидкостей руху. Так, при швидкості автомобіля 80 км/год на тертя об повітря витрачається половина потужності двигуна, а при 130 км/год — дві третини. Також однією з важливих проблем трибології є знос трибоспрямлень. Про роль трибології в розвитку сучасної техніки свідчать дані вітчизняної літератури, згідно з якими об'єм трудових витрат на весь термін служби автомобіля розподіляється таким чином: на виготовлення — 1,4 %, на технічне обслуговування — 45,4 %, на ремонт, зумовлений зносом деталей, — 53,2 %. Технічний прогрес вимагає безперервного накопичення знань в галузі рішення трибологічних проблем і їх практичної реалізації.

## **1. ВЛАСТИВОСТІ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

### **1.1. Класифікація та експлуатаційні властивості мастильних матеріалів**

Збільшення потужності транспортних засобів і технологічних процесів призвело до зростання вимог щодо підвищення надійності й довговічності техніки, а також до зниження витрат палива і змащувальних матеріалів. Нафтопродукти, які є експлуатаційними матеріалами, за своїм впливом на показники роботи техніки рівнозначні конструкційним матеріалам: металам, гумам, пластмасам та ін.

Ефективність змащувального матеріалу визначається, по-перше, конструктивними особливостями вузла тертя (типом, розміром, характером руху поверхонь тертя тощо), по-друге, систе-

мою змащування і видом матеріалу контактних поверхонь, з яким він контактує в процесі роботи, а також умовами експлуатації вузла тертя і термінами заміни змащувального матеріалу.

Як конструкційний матеріал вузла тертя масла виконують такі функції:

- зменшують тертя, що виникає між деталями триботехнічного вузла;
- знижують знос і попереджують задири поверхонь тертя;
- відводять тепло від пар тертя;
- захищають поверхні контактуючих пар та інші неізольовані частини від корозійної дії зовнішнього середовища;
- ущільнюють зазори між спряженими деталями;
- видаляють із зони тертя продукти зносу, корозії та інші забруднення.

Змащувальні речовини можуть бути рідкими (масла, вода, сірчана кислота високої концентрації), у вигляді емульсії (змащувально-охолоджуючі рідини), газоподібними (повітряні і газові суміші), пластичними і твердими (тальк, графіт, дисульфід молібдену).

За призначенням змащувальні масла класифікуються за такими групами:

- моторні масла (масла для карбюраторних, дизельних та авіаційних двигунів);
- трансмісійні масла (автотракторні, редукторні, припрацьовуючі масла для редукторів, масла для гідравлічних муфт, гідротрансформаторів і автоматичних трансмісій);
- енергетичні масла (турбінні, компресорні та електроізоляційні масла);
- індустріальні масла (масла загального призначення, масла для важконавантажених вузлів, для спрямовуючих ковзання, циліндрові, для прокатних станів);
- консерваційні і робочо-консерваційні масла;
- масла спеціального призначення.

Найважливішими властивостями масел, які визначають можливість їх застосування в різних умовах експлуатації, є:

- антиокислювальні властивості — стійкість масла до окислення в межах робочих температур;
  - антифрикційні властивості — здатність знижувати коефіцієнт тертя при різних режимах роботи;
  - протизношувальні властивості — надійне змащування вузлів тертя з мінімальним зношуванням в межах робочих температур;
  - антикорозійні властивості — здатність запобігати руйнуванню поверхневого шару деталей;
  - полого в'язкісно-температурна крива і ефективна прокачуємість при низьких температурах (пускові властивості масла повинні забезпечувати надійний запуск трибомеханічної системи без підігріву в межах робочих температур);
  - миючо-диспергуючі властивості — здатність запобігати утворенню вуглецевих відкладень на гарячих поверхнях деталей;
  - нейтралізуючі властивості — здатність нейтралізувати кислоти, що утворюються в процесі окислення масла;
  - мінімальне вспінювання і випаровування (для авіаційних, вакуумних масел, а також для масел до гідромеханічних коробок передач та приладів);
  - деемульгуючі властивості — здатність до розділення емульсії вода — масло шляхом зміни міжфазного натягу (для турбінних масел).
- Крім того, змащувальні матеріали не повинні піддаватися біопошкодженням, не змінювати властивостей при зберіганні й регенерації, легко транспортуватися і не викликати забруднення навколишнього середовища.

## 1.2. Компоненти змащувальних масел

Товарні масла складаються з базових масел нафтового або синтетичного походження (або їх суміші), у які вводяться спеціальні присадки, що поліпшують певні властивості масел. Деякі індустриальні, компресорні, вакуумні та інші масла не містять присадок. Отримання необхідних якостей масел досягається шляхом правильного підбору і сумісності властивостей

базової частини з комплексом присадок, які додаються при компаундуванні.

### **1.2.1. Базові масла і вплив фракційного складу на їх фізико-хімічні і триботехнічні показники**

Базові масла одержують шляхом переробки нафтової сировини, яка включає такі стадії:

- перегонку для отримання фракцій із заданою в'язкістю і температурою спалаху;
- очищення для поліпшення стійкості до окислення і в'язкісно-температурної характеристики;
- деасфальтизацію залишку вакуумної перегонки;
- депарафінізацію для поліпшення низькотемпературних властивостей.

Внаслідок перегонки, екстракції різних компонентів, депарафінізації і доочистки сировини хімічний склад продукту стає більш однорідним. Проте глибина очищення масла повинна бути оптимальною. Ненасиченим вуглеводневим сполукам, а також асфальтено-смолистим компонентам притаманна полярна активність, такі молекули сприяють утворенню на поверхнях тертя граничних плівок. Тому при переочищенні масла його змащувальна здатність погіршується. Крім того, переочищені масла менш стабільні при зберіганні. Деякі смолисті речовини покращують в'язкісно-температурні характеристики масла і знижують його температуру застигання.

Нафтові базові масла — це суміші, що складаються з парафінових, ароматичних і нафтонових вуглеводнів (переважно змішаної будови), а також кисень-, сірко- і азотовмісних органічних сполук і смолисто-асфальтенових речовин. Елементний склад з'єднань, будова молекул вуглеводнів і їх молекулярна маса впливають на такі фізико-хімічні властивості масел, як густину, в'язкість, температури кипіння і застигання, поверхневу активність та ін.

Масла з сірчаної нафти характеризуються відносно більш високим індексом в'язкості, кращими антикорозійними властивостями,

але мають підвищену коксованість, що є їх недоліком. Багато сірковмісних сполук є антиокислювачами. Крім того, сірчані сполуки нафти утворюють на поверхнях металів захисні плівки, що інгібують їх каталітичну дію на процес окислення масла.

Нафтові вуглеводні — основна частина змащувальних масел — окислюються порівняно легко і тому не можуть бути застосовані в чистому вигляді. Відносно швидке накопичення в процесі окислення кислих корозійно — агресивних речовин підвищує корозійну активність нафтових вуглеводнів.

Дослідження протизношувальних властивостей монофракцій вуглеводнів, виділених з масел, свідчать про те, що специфічність маслам з погляду протизношувальних властивостей, як і з точки зору їх стійкості до окислення, додають ароматичні вуглеводні, що містяться в них, особливо поліциклічні. Кількість поліциклічних ароматичних вуглеводнів в маслах порівняно невелика (5—10 %). Водночас у нафтовій сировині кількість поліциклічних ароматичних вуглеводнів у 2—2,5 рази більша. Отже, зміною технології отримання змащувальних базових масел можна звести до мінімуму втрати поліциклічних ароматичних вуглеводнів і одержувати масла з високими протиокислювальними і протизношувальними властивостями.

Сучасні деталі трибомеханічних систем часто експлуатуються в екстремальних умовах, де ефективність змащувальної дії не може бути забезпечена застосуванням вуглеводневих нафтових масел. Складне поєднання необхідних властивостей (незначні зміни в'язкості, високі змащувальні властивості в широкому інтервалі температур, хімічна стабільність, стійкість до старіння і окислення) можуть мати тільки спеціальні синтетичні масла. З 1930 р. розроблено декілька класів органічних сполук, які в даний час використовують як основу для синтетичних змащувальних матеріалів: поліефіри (полігліколи, поліфенілові ефіри); складні ефіри одно— і багатоосновних карбонових кислот і спиртів; складні ефіри фосфорної кислоти; силосани; ефіри кремнієвої кислоти; полігалогенпохідні вуглеводні; фторвмісні з'єднання, а також синтетичні вуглеводні — поліолефіни і алкільовані ароматичні з'єднання.

Синтетичні масла не завжди забезпечують реалізацію необхідних властивостей. Так, поліпропіленгліколі проявляють корозійну агресивність у присутності кислих продуктів, полігліколі характеризуються відносно низькою стійкістю до окислення, складні ефіри проявляють більш яскраво виражену схильність до утворення емульсій з водою та ін., тому частіше використовують їх суміші з нафтовими фракціями. Поєднанням нафтового і синтетичного компонента в ряді випадків можна одержати композиції, що проявляють певний синергічний ефект функціональної дії.

Перспективним напрямом створення нових змащувальних композицій є використання альтернативних видів базових основ рослинного походження, зокрема ріпакової олії. До складу ріпакової олії входять тригліцериди, складні ефіри і жирні кислоти (пальмітинова, стеаринова, олеїнова, ліноленова, ерукова та ін.), які підвищують мастильну здатність основи в умовах граничного мащення завдяки міцному зчепленню з металевою поверхнею, що запобігає безпосередньому контакту пар тертя в триботехнічному контакті.

### 1.2.2. Функціональні присадки

Для поліпшення експлуатаційних властивостей масел і забезпечення надійної роботи механізмів у більшість змащувальних масел вводять спеціальні речовини. Органічні маслорозчинні продукти (понад 100 з'єднань) називають *присадками*, а тверді нерозчинні речовини неорганічного походження — *антифрикційними добавками*.

Більшість промислових присадок і їх композицій містить у своєму складі кисень, сірку, фосфор, азот, хлор, кальцій, барій, цинк, магній, стронцій і такі функціональні групи, як карбоксильна, гідроксильна, сульфогрупа, дитіофосфатна, аміногрупа, трихлорметильна і деякі інші.

Присадки вводять у масла в невеликих кількостях — від долей до декількох відсотків (у композиціях їх загальна концентрація складає до 15%), в'язкісні присадки можуть додаватися до 20–30%.

За функціональним призначенням присадки класифікують за такими групами:

**1. Антиокислювальні присадки** — сполуки, що подовжують індукційний період окислення шляхом інгібування ланцюгових реакцій автоокислення внаслідок утворення алкільних або пероксидних радикалів або пасивацією металевої поверхні захисними плівками, попереджаючи її каталітичну дію. Антиокислювальними властивостями характеризуються такі органічні сполуки: з'єднання сірки, селену, фосфору; похідні амінів, фенолу; лимонна і глюконова кислоти. Сучасні товарні масла можуть містити також антиоксиданти, серед яких диалкілдитіофосфати цинку і барію, іонол, агідол, борин, диалкілселеніди, дифеніламін, алкілфеноли, трибутил- і трикрезилфосфати, Oloa 267, IXП, ІНХП.

**2. Антикорозійні присадки** — інгібітори електролітичних реакцій взаємодії води і кисню з поверхнею металу. Якщо фізичні інгібітори внаслідок зворотної адсорбції утворюють на поверхні металу гідрофобний шар, то хімічні реагують з металом, утворюючи захисні плівки, які змінюють електрохімічний потенціал. Антикорозійними властивостями характеризуються такі компоненти: лужні азотні похідні, аміди жирних кислот, сірчані сполуки, похідні фосфорної і азотної кислот.

**3. В'язкісні присадки** — речовини, які поліпшують в'язкісно-температурні характеристики малов'язкої базової основи з високим індексом в'язкості шляхом зсуву в'язкісно-температурної залежності еквідистантно в зону підвищених температур. Залежність в'язкості загущеного масла від концентрації присадки є експоненціальною:

$$\lg v = \lg v_0 + Kc,$$

де  $v$  і  $v_0$  — кінематична в'язкість загущеного і вихідного масел;  
 $c$  — вміст присадки;

$K$  — коефіцієнт загущуючої здатності, що відображає вплив конфігурації і мобільності полімерних молекул.



В'язкісно-температурна залежність є важливим критерієм при виборі масла. В'язкість мінеральних або синтетичних масел знижується при підвищенні температури. Тому в кожному випадку при вимірюванні в'язкості необхідно вказувати температуру, при якій проведено вимірювання. У лінійних координатах криві, що відображають залежність між в'язкістю і температурою, є гілки гіперболи, які несуттєво відрізняються одна від одної (рис. 3). Для отримання тих же залежностей у вигляді прямих з достатньою точністю можуть бути використані математичні перетворення, наприклад використання логарифмічних координат (рис. 4). У таких координатах досягається диференційована характеристика близьких за в'язкістю масел. Ще одна перевага логарифмічних координат полягає в можливості побудови повної залежності в'язкості від температури за даними двох точок — результатів вимірювання в'язкості при двох температурах. Для досягнення задовільної точності різниця температур між двома вимірюваннями при побудові цієї залежності повинна складати не менше 50°C. При екстраполяції за межами вимірюного діапазону (особливо у бік низьких температур) необхідно виключити фазові переходи, осадження і т. п., інакше можливі значні відхилення від розрахункових даних.

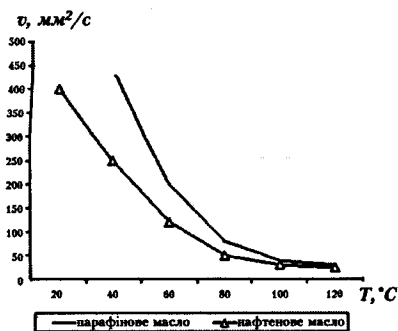


Рис. 3. Залежність в'язкості від температури в лінійних координатах.

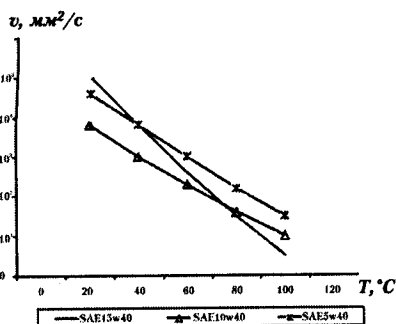


Рис. 4. В'язкісно-температурні характеристики моторних масел в логарифмічних координатах.

Як загущуючі присадки застосовують полімери, середня молекулярна маса яких знаходиться в межах 1000 — 25000. Розчини в'язкісних присадок характеризуються властивостями неньютонівських рідин — динамічна в'язкість змінюється залежно від зміни градієнта швидкості зсуву. Високі градієнти швидкості зсуву (до  $10^6$  с<sup>-1</sup>), характерні для сучасних двигунів, і великі механічні навантаження в трансмісіях та інших важконавантажених вузлах можуть призвести до втрати в'язкості загущених масел: тимчасової (унаслідок прояву неньютонівських властивостей) і постійної (унаслідок деструкції полімерних молекул).

Нині використовуються в'язкісні присадки таких типів: поліізобутени (LZ 7065, паратон 2225, гліссопал 2300, КП), поліметакрилати (віскоплекс, плексол, ПМА "Д"), поліолефіни, полімери диєнів (бутадиєни, ізопрени).

**4. Депресорні присадки** — покращують низькотемпературні властивості масел шляхом перешкоджання утворенню структурного каркасу і агломерації кристалів парафіну в сітчастій структурі при від'ємних температурах. Найбільше застосування знайшли депресори поліметакрилатного типу — LZ 7745, ПМА "Д", Плексол 102, Плексол 704, Плексол 1455.

**5. Миючо-диспергуючі присадки** — зменшують відкладення продуктів окислення, запобігають агломерації асфальтенів і коагуляції колоїдних частинок за механізмом зниження міжмолекулярних дисперсійних сил на поверхні забруднюючих частинок унаслідок утворення електростатичного бар'єру, знижують корозійний знос, нейтралізують кислі продукти згоряння палива.

Як миючі й диспергуючі присадки застосовують високолужні сульфонати натрію, кальцію, барію, магнію, цинку (СК-11, СБ-3, ПМС, С-150, Хайтек Е-632, Лубрізол 65, Паранокс 24, ІХП-215, С-300Е, М-300Е), алкілсаліцилати кальцію, літію, натрію, магнію, барію (АСК, МАСК, АС-60С), алкілфеноляти (Паранокс 51, ЦІАТІМ), сукциніміди (дипол — 40 і 45, ЛЗ-325, Олоа 340G, С-5А, Олоа 1200, ІХП — 476) і ін.

Слід зазначити, що багато м'яко-диспергуючих присадок характеризуються поліфункціональними властивостями, тобто, крім основних властивостей, проявляють антиокислювальну, антикорозійну і протизношувальну активності.

**6. Протизношувальні і протизадирні присадки** — речовини, що підвищують змащувальну здатність в умовах граничного і змішаного режимів тертя, запобігаючи інтенсивному зносу пар тертя в триботехнічному контакті внаслідок утворення адсорбційних шарів, хемосорбційних граничних плівок або хімічних з'єднань з металом, які перешкоджають схоплюванню поверхонь. Активними компонентами молекул є сірка, фосфор, хлор. Відомі також присадки, що містять свинець, сурму, молібден (у поєднанні з сіркою і фосфором).

Механізм дії сірковмісних присадок полягає в адсорбції молекул на поверхні металу, утворенні меркаптиду  $R-S-Me$  в результаті протікання реакцій взаємодії вільних радикалів при розриві  $S-S$  зв'язку з активними атомами металу. При подальшому підвищенні температури відбувається розрив зв'язку  $C-S$  і утворення неорганічних плівок сульфідів заліза.

Хлоровмісні присадки, розкладаючись при підвищених температурах, виділяють атомарний хлор, який на сталевих деталях утворює плівки хлористого заліза, що має пластинчасту будову і характеризується протизношувальними властивостями.

Механізм триботехнічної дії фосфоровмісних присадок ґрунтується на тому, що при термічному розкладанні фосфор утворює легкоплавку евтектичну суміш фосфідів металів або відбувається утворення кислих органічних фосфінів на ювенільній поверхні металу, які забезпечують зниження зносу.

До протизношувальних і протизадирних присадок відносяться ДФ-1, ЛЗ-309/2, ДФ-11, ТР-17В, АБЕС, ЕФО, трикрезилфосфат, совол, Англамол 99. Слід зазначити, що більшість присадок цієї групи проявляють і антифрикційні властивості.

Для поліпшення експлуатаційних властивостей масел використовують також антипінні, деемульгуючі, припрацювальні та інші групи присадок.

### 1.2.3. Антифрикційні добавки

**Антифрикційні добавки** — високодисперсні частинки (1–20 мкм) — речовини кристалічної пошарової будови, атомарні й тверді аморфні структури, які підвищують змащувальну здатність масел. До твердих антифрикційних добавок належить графіт, дисульфід молібдену, нітрид бору, деякі селеніди, сульфіди та йодиди металів, високодисперсні порошки металів і їх оксиди. Перевагою твердих нерозчинних добавок є те, що їх дія проявляється як при низьких, так і при високих температурах.

Ефект підвищення триботехнічних характеристик — розширення навантажувально-швидкісного діапазону, зниження інтенсивності корозійно-механічного зношування — установлений при застосуванні нанорозмірних частинок (3 — 70 нм) або їх кластерів. До їх числа слід віднести ультрадисперсні алмази і ультрадисперсний алмазоподібний графіт, фулерени і фулереноподібні структури, ультрадисперсні кераміки на основі нітридів і оксинітридів перехідних металів — сиалони, природні силікати і графіт.

Кристалічна решітка пошарових матеріалів, зокрема графіту, дисульфідів молібдену та вольфраму, характеризується анізотропією будови (рис. 5).

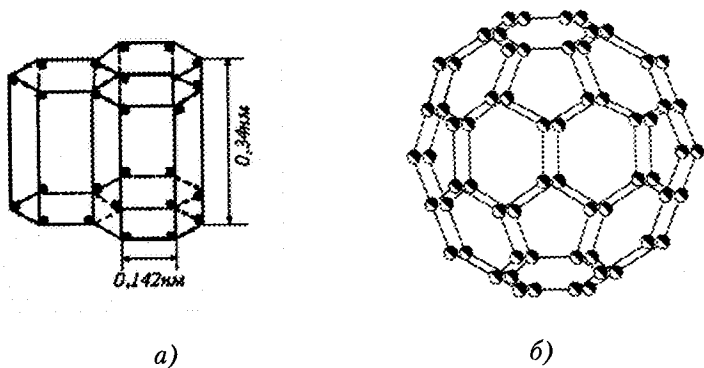


Рис. 5. Кристалічна структура графіту (а) та будова молекули фулерену  $C_{60}$  (б).

Плівки, утворені цими речовинами, здатні витримувати без руйнування навантаження до 3 ГПа, при цьому вони характеризуються низьким опором зсуву при дії тангенціального навантаження.

Варто зазначити, що при створенні та впровадженні рецептури товарного масла необхідно враховувати, що підвищення експлуатаційних властивостей масел досягається не тільки введенням поліфункціональних присадок і добавок, але й за рахунок вибору початкових властивостей базової основи і її сумісності з різними типами присадок.

### **1.3. Основні характеристики твердих змащувальних матеріалів**

У багатьох специфічних випадках у вузлах тертя не можуть застосовуватися газоподібні, рідкі й пластичні змащувальні матеріали. До таких випадків належать умови роботи вузлів тертя при температурах застигання масел і мастил, при високих температурах, які зумовлюють розкладання і випаровування мастила. До цих випадків відносяться також умови, у яких неможливо застосовувати рідке середовище, наявність глибокого вакууму й дії іонізуючого випромінювання, недоступність поверхонь тертя для періодичного підведення до них змащувального матеріалу та ін. Наприклад, в авіаційній і ракетній техніці змащувальні матеріали повинні працювати в широкому діапазоні температур (від  $-240$  до  $900^{\circ}\text{C}$ ), у вузлах тертя ядерних реакторів змащувальні матеріали повинні характеризуватися високою радіаційною стійкістю, а у вузлах тертя космічних об'єктів вони повинні проявляти мінімальну летючість у вакуумі.

Необхідність змащування вузлів тертя машин і механізмів, що працюють у подібних умовах, визначила потребу в твердих речовинах, які характеризуються ефективною змащувальною здатністю. На сучасному етапі відома велика кількість природних і штучних твердих змащувальних речовин, які можна розділити на дві групи:

– **неорганічні**: пошарова структура (дихалькогеніди металів, графіт, фторований графіт, нітрид бору і ін.); непошарова структура (хлориди, фториди та йодиди металів, оксиди та ін.); м'які метали (Pb, Sn, Cd, In, Ga, Ag, Au);

– **органічні**: полімерні матеріали (політетрафторетилен, полііміди та ін.).

У табл. 1 представлені антифрикційні властивості різних груп твердих змащувальних матеріалів.

Найбільш широке застосування одержали тверді змащувальні матеріали – графіт і дисульфід молібдену.

У техніці **графіт** застосовується як змащувальний матеріал уже більше 120 років. Він характеризується діамагнітними власти-

Табл. 1. Коефіцієнти тертя твердих змащувальних матеріалів для пари тертя плунжер – циліндр при питомому навантаженні 70 МПа.

Група	Твердий мастильний матеріал	Коефіцієнт тертя		Наявність вібрації при терті
		при русі	в статичному стані	
	Без змащувального матеріалу	0,45	–	Існує
Неорганічні тверді мастильні матеріали з пошаровими структурами кристалічної решітки	Дисульфід молібдену природний	0,050	0,053	Немає
	Дисульфід молібдену синтетичний	0,091	0,106	Немає
	Дисульфід вольфраму	0,091	0,106	Немає
	Графіт, колоїдний в воді (22%)	0,100	–	Немає
	Гідроксид барію	0,151	0,163	Немає
	Хлорид свинцю	0,191	0,214	Немає
Неорганічні сполуки	Бура	0,210	0,226	Немає
	Оксид свинцю – оксид цинку	0,25	–	Існує

Група	Твердий мастильний матеріал	Коефіцієнт тертя		Наявність вібрації при терті
		при русі	в статичному стані	
Шари на поверхнях металу	Шар фосфату на поверхні сплаву залізо — марганець	0,213	0,218	Немає
	Шар фосфату на поверхні сплаву залізо — марганець, покритий шаром дисульфиду молібдену	0,067	0,074	Немає

востями, має гексагональну решітчасту структуру та анізотропну електропровідність, яка у напрямі гексагональної вісі у 25 разів більша, ніж в основній площині решітки кристала. Графіт проявляє високу хімічну стабільність і практично інертний до радіоактивного випромінювання. При нагріві на повітрі до температури вище 450°C він утворює CO<sub>2</sub>, який виділяється, не залишаючи ніяких подрібнених частинок.

Високі змащувальні властивості графіту пояснюються його пошаровою решітчастою структурою: слабкі сили Ван-дер-Ваальса між шарами вуглецю не перешкоджають ковзанню "площин" з атомів вуглецю. Низький коефіцієнт тертя графіту, проте, визначається не тільки кристалічною структурою. Він також пов'язаний з адсорбованими плівками (особливо водяної пари), які утворюють поверхневий шар із слабкою когезією. Отже, найбільш сприятливі змащувальні властивості графіту проявляються у присутності вологи. В умовах вакууму графіт втрачає свої антифрикційні властивості; при цьому зворотна адсорбція конденсованої пари (пари води, бензолу, аміаку та ін.) значно знижує тертя і знос у глибокому вакуумі (табл. 2).

Електронно-мікроскопічні дослідження показують, що в процесі тертя пакети шарів графіту утворюють на змащувальній поверхні "ролики". При цьому відбувається орієнтація кристалітів паралельно поверхні з подальшим утворенням (при достатньо

високому тиску) роликів, які забезпечують низький коефіцієнт тертя.

Табл. 2. Вплив вологості на коефіцієнт тертя ( $f$ ) та знос графіту при терті по міді.

Середовище	$f$	Знос, м <sup>3</sup> /с
Вакуум	0,8	0,1
Пари води	0,18	<0,0001

**Дисульфід молібдену** ( $\text{MoS}_2$ ) характеризується пошаровою структурою і кристалізується в гексагональну систему з тригональною симетрією. Він має твердість за шкалою Мооса 1,0–1,5 і вже більше 30 років застосовується як твердий змащувальний матеріал. Дисульфід молібдену характеризується високою хімічною стабільністю, він стійкий до більшості кислот і нечутливий до радіоактивного випромінювання. На відміну від графіту, дисульфід молібдену проявляє ефективні змащувальні властивості навіть в глибокому вакуумі. У вакуумі він розкладається на молібден і сірку при 1100°C. Під тиском 1200 МПа він стискається до 60 % свого нормального об'єму і знову розширюється після зняття навантаження.

Змащувальні властивості дисульфиду молібдену, так само, як і графіту, зумовлені будовою його кристалічної решітки: слабкі зв'язки (сили Ван-дер-Ваальса) між шарами сірки дають змогу пластинкам вільно взаємно переміщатися, внаслідок чого знижується тертя між контактуючими поверхнями. З іншого боку, іонні зв'язки між атомами Мо і S надають шарам високої міцності – вони здатні протистояти продавлюванню з боку мікрівиступів поверхонь тертя. У змащувальному шарі товщиною 2,5 мкм містяться 4000 шарів (S-Mo-S).

Залежно від навантажень, які діють в зоні контакту, досягаються коефіцієнти тертя в межах від 0,04 (при 140 МПа) до 0,02 (при 300 МПа). У присутності води коефіцієнт тертя  $\text{MoS}_2$  і



знос збільшуються. Таке явище можна пояснити утворенням водневих зв'язків на межі кристалів і утворенням сірчаної кислоти.

Крім розглянутих речовин, ефективними твердими змащувальними матеріалами, які характеризуються пошаровою структурою, є тетраборат натрію, хлорид кадмію, нітрид бору, йодид свинцю, хлорид кобальту, сульфат срібла і стеарат цинку. Можливо також використання сульфідів важких металів, селенідів і телуридів:  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{MnSe}_2$ ,  $\text{NbS}_2$ ,  $\text{NbSe}_2$ ,  $\text{TaS}_2$ ,  $\text{AsSbS}_4$  і  $\text{AsAsS}_4$ .

Здебільшого вони мають пошарову гексагональну структуру, високі антиокислювальні властивості й хімічну стабільність, електропровідність і застосовуються у вигляді порошків, суспензій і антифрикційних лакових покриттів (рис. 6).

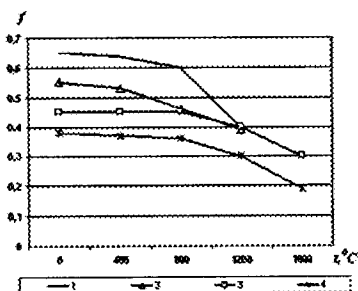


Рис. 6. Залежність коефіцієнта тертя  $f$  нітриду бору і графіту від температури  $t$ : 1 – плівка нітриду бору на бору; 2 – чистий нітрид бору, нанесений методом спікання; 3 – спектроскопічно чисті стандартизовані частинки графіту; 4 – товарний графіт.

Ефективними змащувальними матеріалами для підшипників при температурах  $800 - 900^\circ\text{C}$  є **фталозианіни**, які не містять металів. Вони характеризуються високою термічною стійкістю і несучою здатністю. Ефективні змащувальні властивості цих сполук зумовлені утворенням поверхневої плівки із сильною адгезією до металу.

**Фториди і хлориди.** Фториди металів мають коефіцієнти лінійного розширення, близькі до коефіцієнтів лінійного розширення конструкційних сплавів на основі Ni, Cr, Co, і завдяки низькій твердості не викликають їх абразивного зношування. Найбільше застосування мають фториди кальцію і барію, які використовують як покриття для жаростійких сплавів. Застосування фторидів металів обмежується температурою їх окислення ( $\sim 827^\circ\text{C}$ ).

Фторид кальцію хімічно стійкий у гарячому окислювальному і відновному середовищі, має кристалічну будову і характеризується низьким тиском випаровування та незначною розчинністю у воді.

Суміші  $\text{BaF}_2$  і  $\text{CaF}_2$  застосовують як покриття на жаростійких сплавах (Ni, Ni-Cr-Co) або використовують для насичення розплавленою евтектикою  $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$  деталей, одержаних методом порошкової металургії. Покриття наносять також плазмовим методом при одночасному нанесенні суміші порошків металу і твердих мастильних матеріалів або при послідовному нанесенні спочатку металевої композиції, а потім фторидного покриття. Максимальна робоча температура в повітряному середовищі комбінованих фторидних покриттів на жаростійких сплавах обмежується окисленням сплавів (у покритті ці сплави окислюються швидше). Межа працездатності покриттів при тривалій експлуатації —  $800^\circ\text{C}$ , при короткочасній —  $900^\circ\text{C}$ .

**М'які метали** використовують як основи або компоненти покриттів на твердих конструкційних матеріалах. Їх антифрикційність визначається малим опором зрізу в тонкому шарі м'якого покриття при відносному русі поверхонь тертя під навантаженням. Суттєво, що з підвищенням температури для цих матеріалів відбувається зниження опору зрізу за рахунок зменшення їх твердості. Порошки м'яких металів і оксидів уводять як наповнювачі в композиційні антифрикційні матеріали і змащувальні матеріали. Слід зазначити, що як тверде змащувальне покриття використовуються тільки ті метали, які не наклепуються в межах робочих температур і не утворюють крихких твердих

розчинів з тими металами, із яких виготовлені елементи трибо-спряження. Якщо робоча температура металу вища за температуру рекристалізації, метал не наклепується. Зокрема, олово є ефективним змащувальним матеріалом для пар тертя, виготовлених із чавуну і сталі. Проте воно непридатне для нанесення на свинцеву бронзу, оскільки, дифундуючи в поверхневий шар, олово утворює крихкі кристали в мідній основі (в умовах низьких температур, при  $T < -12^{\circ}\text{C}$  спостерігається "олов'яна чума" — перетворення металу в "труху"). Як твердий змащувальний матеріал можуть також застосовуватися свинець, індій, літій, срібло та інші метали і сплави.

Механізм тертя за наявності плівки з м'яких металів (за Ф. Боденом) полягає в тому, що навантаження сприймається плівкою, яка протидіє своєму витісненню і захищає поверхні тертя від безпосереднього контакту. При терті зріз відбувається в об'ємі плівки, а оскільки її опір зрізу низький і фактична площа дотику елементів тертя завдяки наявності жорсткої підкладки також незначна, коефіцієнт тертя залишається низьким.

**Органічні полімерні матеріали**, такі, як поліетилен, полііміди та под., у чистому вигляді не виявляють ефективних антифрикційних властивостей і використовуються як зв'язуючі у твердих змащувальних матеріалах або основи композиційних антифрикційних матеріалів. **Політетрафторетилен (ПТФЕ)** — термопластичний матеріал. Він характеризується унікальними природними антифрикційними властивостями, надзвичайно хімічностійкий, не змочується більшістю рідин, не горить. ПТФЕ має змішану кристалічну і аморфну структуру, причому ступінь кристалічності може досягати 90 %. Взаємодія між молекулами і кристалами ПТФЕ здійснюється слабкими Ван-дер-Ваальсовими силами, що й забезпечує його високу антифрикційність. При терті молекули ПТФЕ переносяться на поверхню контртіла, орієнтуються уздовж напрямку ковзання, надалі тертя здійснюється між однойменними матеріалами. У чистому виді ПТФЕ при терті під навантаженням схильний до значної

залишкової пластичної деформації, має великий знос, тому практично не застосовується. ПТФЕ виробляють у вигляді порошку і суспензії.

Тверді змащувальні матеріали наносяться на поверхні тертя деталей натиранням до утворення плівки необхідної товщини; методом ротапринта (у отвір одного з контактуючих тіл поміщається стрижень з твердого змащувального матеріалу, який наноситься на поверхню іншого в процесі тертя); електролітичним осадженням; термохімічним способом; термодифузійною обробкою; напиленням у вакуумі. Тверді змащувальні матеріали вводяться до складу композиційних матеріалів, залежно від зносу контактних поверхонь вони надходять до зони тертя і утворюють плівки на поверхнях або вводяться в пористі матриці.

До твердих змащувальних матеріалів для забезпечення ефективних антифрикційних і протизношувальних властивостей висуваються наступні основні вимоги:

- низький опір зрізу. Ця властивість безпосередньо пов'язана з твердістю покриття, виняток становить група речовин шарової структури, яка характеризується анізотропією механічних властивостей у різних напрямках кристалічної решітки, що зумовлює у напрямі базових площин достатньо низький опір зрізу;

- висока адгезія матеріалу покриття до основи;

- можливо менша товщина шару покриття, що забезпечує незмінність геометрії вузла тертя при пластичній деформації. При цьому має місце менший номінальний контакт на поверхні тертя і менше тертя;

- високий опір зношуванню, що залежить від перерахованих вище властивостей;

- відсутність корозійної дії на метали;

- висока температурна стійкість, тобто здатність зберігати низький коефіцієнт тертя і малий знос при різних температурних режимах навколишнього середовища і температурі на поверхні тертя.

## 1.4. Мастила

**Пластичні мастила** займають проміжне положення між рідкими і твердими змащувальними матеріалами. Мастила за складом є багатокомпонентними колоїдними системами, що містять дисперсійне середовище – рідку основу (70–90 %), дисперсну фазу – загусник (10–15 %) та добавки – присадки і наповнювачі (1–15 %), призначені для поліпшення експлуатаційних властивостей. Структурний каркас складається з утворюваних загусником волокон діаметром близько 0,2 мкм і довжиною від 2 до 100 мкм. Каркас запобігає можливості розтікання дисперсійного середовища по поверхні твердого тіла. Масло міцно утримується в його об'ємі в основному завдяки адсорбційній взаємодії. Під дією навантаження каркас руйнується, і з його об'єму видавлюється дисперсійне середовище. Після зняття навантаження структура каркасу не відновлюється, якщо вона конденсаційна (утворюється після охолодження розплаву). Можливе також часткове або повне відновлення структури (тиксотропний змащувальний матеріал), зумовлене зближенням частинок загусника на відстань міжмолекулярної взаємодії.

Як **дисперсійне середовище** використовують синтетичні і мінеральні масла. Тип дисперсійного середовища визначає температурний інтервал експлуатації, навантажувальні та швидкісні характеристики мастил, їх антикорозійні властивості, в'язкість при від'ємних температурах, втрати на випаровування, пусковий крутний момент.

Найширше (понад 90 %) застосовуються мінеральні масла. Високов'язкі масла застосовуються при виробництві мастил для низькошвидкісних підшипників і трансмісій, які експлуатуються при високих навантаженнях і температурі. Вони знижують втрати змащувального матеріалу на випаровування, забезпечують ефективні адгезійні властивості і водостійкість. Введення малов'язких масел сприяє ефективному зниженню пускового моменту і робочої температури, підвищенню текучості мастила в зону контакту пар

тертя. Мастила на основі мінеральних масел працездатні у вузлах тертя, об'ємна температура деталей яких приймає значення в інтервалі від  $-60$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ .

Для вузлів тертя, що працюють у температурному режимі за межами вказаного інтервалу, як дисперсійне середовище застосовують синтетичні масла. Температура експлуатації таких мастил може перевищувати  $350^{\circ}\text{C}$ , проте внаслідок високої вартості їх застосування обмежене. Максимальною термостійкістю (до  $500^{\circ}\text{C}$ ), ефективною змащувальною здатністю і стійкістю до дії хімічноактивних середовищ характеризуються фтор- і фторхлорвуглеводневі масла.

Хімічна активність, розчинність у маслі й температура плавлення **загусника (дисперсна фаза)** значною мірою визначають експлуатаційні властивості мастил. Зокрема, такі властивості, як температура каплепадіння, водостійкість, ущільнювальна здатність мастила, залежать тільки від загусника. Відповідно до типу загусника мастила класифікують за чотирма групами: мильні, на неорганічних загусниках, на органічних загусниках і вуглеводневі.

Найбільш поширеним загусником є металеві мила — солі жирних кислот і металів. Металеві мила є поверхнево-активними речовинами, тому вони виконують не тільки роль каркаса, але і додають змащувальному матеріалу протизношувальні і протизадирні властивості. Найчастіше застосовують кальцієве та літієве мило, рідше — алюмінієве, барієве і натрієве.

Найнижчу вартість мають кальцієві мила, що забезпечило їх порівняно широке застосування. Вони забезпечують мастилам водостійкість, адгезію до контактних поверхонь і змащувальні властивості при низьких температурах експлуатації. Використовуються для низькошвидкісних вузлів тертя і при температурах, що не перевищують  $80^{\circ}\text{C}$ .

Найбільш широке розповсюдження знайшли літієві мила, які характеризуються високою межею міцності та стійкістю до окислення, структурною стабільністю, ефективними антикорозійними,

протизношувальними та протизадирними властивостями. Застосовуються в інтервалі температур від  $-50$  до  $+130^{\circ}\text{C}$ .

Крім перерахованих, використовуються мастила, загущені змішаними милами, які складаються з суміші простого металевого мила з різними катіонами. Це натрій — кальцієві, літій — кальцієві, натрій-літій-кальцієві мила.

**Присадки**, які вводяться в мастила, є поверхнево-активними речовинами, призначеними для поліпшення їх триботехнічних, хімічних та реологічних властивостей. **Наповнювачі** вводять у мастила для підвищення допустимих навантажень і поліпшення триботехнічних характеристик мастил. Найбільш поширеними з них є графіт, дисульфіді і диселеніди металів, тальк, порошки пластичних металів, віск торф'яний і буровугільний.

Принципові відмінності пластичних мастил від рідких масел пов'язані з присутністю в мастилах загусників і визначаються:

- наявністю межі міцності, внаслідок чого мастила в стані спокою не течуть і набувають здатності текти тільки за певних умов;
- здатністю мастил відновлювати свою структуру і властивості після зняття навантаження, яке зумовило їх руйнування;
- аномальним внутрішнім тертям, у зв'язку з чим в'язкість мастил залежить не тільки від температури, але й від механічних параметрів, при яких проявляється текучість.

За призначенням пластичні мастила поділяють на антифрикційні, консервації, ущільнювальні та спеціального призначення (канатні, фрикційні, припрацьовуючі та ін.).

## 2. МЕТАЛ ТА ЙОГО ПОВЕРХНЯ

Фазову поверхню зразка металу можна розділити на дві складові: зовнішню (видиму) та внутрішню. **Зовнішня поверхня** — це номінальна поверхня, що визначається макрогеометричними параметрами зразка металу та доступна для безпосередніх механічних або оптичних досліджень. **Внутрішню поверхню** неможливо досліджувати безпосередньо, це внутрішній об'єм металу із системою найрізноманітніших дефектів.

**Ідеальний кристал** — це закономірно просторово розміщені тождіжні частки (атомів, іонів, молекул), розташування яких можливо уявити при допомозі трансляції основної частки.

Усі реальні тверді тіла, як моно-, так і полікристалічні, характеризуються великою кількістю дефектів структури.

Кристалографічні дефекти можна класифікувати за такою схемою:

- 1) теплові коливання;
- 2) точкові дефекти: вакансії, атоми втілення, ізолювані включення домішок;
- 3) лінійні дефекти: краєві та гвинтові дислокації;
- 4) поверхневі дефекти: зовнішня поверхня твердого тіла — мікротріщини; внутрішня поверхня — межі зерен.

### 2.1. Деформація металів

Згідно з діаграмою розтягу металів (рис. 7):

$\sigma_p$  — межа пропорційності — це найбільше навантаження, яке метал може витримати без відхилення від закону пропорційності (закону Гука):

$$\sigma = E \varepsilon,$$

де  $E$  — модуль пружності;  $\varepsilon$  — деформація.



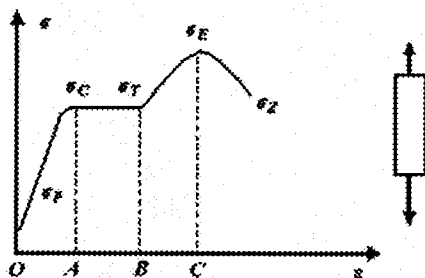


Рис. 7. Діаграма розтягу металів.

$\sigma_C$  — межа пружності — найбільше навантаження, яке метал витримує без залишкової деформації.

Зона OA — зона пружності, а деформація, що їй відповідає — пружна.

$\sigma_T$  — межа текучості — навантаження, при якому зразок починає помітно "текти". Залишкова деформація при цьому не перевищує 0,2%.

Зона AB — зона загальної текучості.

$\sigma_E$  — межа міцності — це найбільше навантаження, при якому не відбувається руйнування матеріалу.

Зона BC — зона зміцнення, у якій пластична деформація розвивається у всьому зразку, що супроводжується його зміцненням.

$\sigma_Z$  — дійсна межа міцності — це найбільше навантаження, яке зумовлює руйнування зразка.

**Деформація металів** — це зміщення атомів кристалічної решітки щодо положення рівноваги. В окремому кристалі під дією зовнішніх сил атоми кристалічної решітки зміщуються відносно свого початкового положення. Якщо це зміщення незначне і не перевищує половини відстані між атомами, то після зняття навантаження атоми знову займають вихідне положення, а розміри кристалу відновлюються. У цьому разі реалізується пружна деформація.

Пластична деформація відбувається при зміщенні одних атомів відносно інших на ціле число міжатомних відстаней (рис. 8). Після зняття навантаження зміщений атом займає інше положення. Пла-

стична деформація реалізується лише за наявності дотичних напруг, розтяг чи стиск зумовлюють лише пружну деформацію.

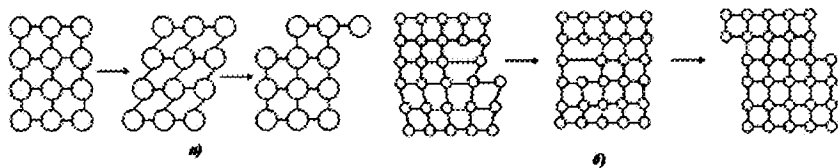


Рис. 8. Схеми пластичної деформації при зсуві.

В реальних металах діє **дислокаційний механізм** пластичної деформації. За цим механізмом пластичний зсув розглядається як процес переміщення дислокацій чи вакансій. Узагальнена схема представлена на рис. 8, б.

Якщо дислокація вже існує в кристалі, то для здійснення пластичної деформації необхідні значно менші зовнішні навантаження. Таким чином, що більше дислокацій існує в металі, то процес зсуву в кристалі буде відбуватися легше. І, навпаки, що менше буде в металі таких дислокацій, то менше можливостей буде для зсуву та міцнішим буде метал. У металі, в якому немає дислокацій, зсув можливий тільки за рахунок одночасного зміщення всієї частини кристалу. В цьому разі міцність бездислокаційного металу повинна бути рівною теоретичній. Але одержати бездислокаційні кристали можливо лише поки що в граничних розмірах. Існує інший шлях зміцнення металів. Установлено, що реальна міцність металів знижується із збільшенням дислокацій тільки спочатку (рис. 9).

Підвищення реальної міцності із зростанням густини дислокацій зумовлено виникненням не тільки паралельних дислокацій, але й дислокацій у різних площинах і напрямках. Такі дислокації будуть заважати одна одній переміщуватись, і реальна міцність металу підвищиться.

Зміцнення поверхні внаслідок збільшення густини дислокацій відбувається при механічному наклепі, подрібненні зерна, при терті.



Рис. 9. Залежність міцності металів від густини дислокацій.

## 2.2. Структура поверхневих шарів

При терті або механічній обробці поверхневі шари твердого тіла зазнають інтенсивного деформування, піддаються імпульсній тепловій дії, насичуються елементами контртіла та навколишнього середовища. Це призводить до зміни їх структури та зумовлює неоднорідність за глибиною (рис. 10).

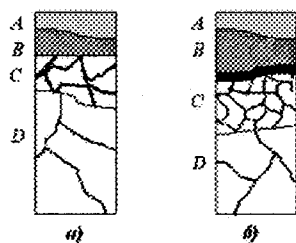


Рис. 10. Структура поверхневого шару зразка з сталі після тертя (а) та шліфування (б).

При терті граничний шар А ( $h \sim 0,3 \text{ нм}$ ) складається з адсорбованих молекул газу, вологи, мастильного матеріалу. Видаляється з поверхні металу при нагріванні у вакуумі.

Шар В ( $h \sim 0,2-8 \text{ нм}$ ) — це окисні плівки, що утворились при взаємодії металу з киснем. Він містить також продукти три-

бохімічних реакцій, сильно деформовані частки металу. Для нього характерна висока концентрація пор та мікротріщин.

Шар С ( $h \sim 5000$  нм) складається із сильно деформованих кристалів, на які впливають температура та механічні навантаження.

Шар Д — це структура вихідного металу. Товщина кожного із зазначених шарів залежить від режимів навантаження та типу мащення в триботехнічному контакті.

При шліфуванні між шарами В і С можлива поява шару товщиною до 5 нм, що складається з дрібних структурних утворень, які важко ідентифікувати, оскільки більшість із них не мають завершеної кристалічної решітки. Такий аморфний шар називають шаром Бейльбі.

**Ювенільна поверхня.** Лише за умов повної відсутності на поверхні твердого тіла інших атомів та молекул поверхня твердого тіла визначається як "фізично чиста" або "ювенільна". Фізико-хімічні властивості ювенільних поверхонь відрізняються від властивостей металів з адсорбційними поверхневими шарами. Наприклад, сталеві ювенільні поверхні характеризуються коефіцієнтом тертя ковзання, що досягає багатьох одиниць; такі поверхні характеризуються власними оптичними константами, значеннями контактних потенціалів, особливими хімічними та каталітичними властивостями. Ювенільну поверхню твердого тіла можна одержати шляхом руйнування його цілісності (злам, різання), сильного нагріву у високому вакуумі, при обробці абразивним порошком.

Однак поверхня твердого тіла може зберігати ювенільні властивості лише в умовах високого вакууму або в атмосфері інертного газу. В навколишньому середовищі поверхня втрачає ювенільні властивості внаслідок взаємодії з атомами та молекулами середовища. Така взаємодія може бути і наслідком хімічних реакцій (окислення), і результатом Ван-дер-Ваальсової адсорбції.

### 2.3. Геометричні характеристики поверхонь деталей машин

Поверхня реальних тіл завжди має відхилення від ідеальної. Існують відхилення макро-, мікро— та субмікрогеометричні.

**Макрогеометричні відхилення** — відхилення поверхні всієї деталі або великих її ділянок від ідеальної. До них належать овальність, конусність, неплосчинність, увігнутість площини. Величини відхилень для різних поверхонь (циліндричних) визначаються відповідними стандартами.

**Мікровідхилення:**

— хвилястість — це сукупність нерівностей, які утворюють хвилю, крок якої  $S_x$  значно перевищує висоту  $H_x$  (рис. 11). Крок хвилі — це відстань між вершинами двох сусідніх хвиль, а висота хвилі — це відстань між вершиною та впадиною. Як правило,  $(S_x/H_x) > 40$ ;

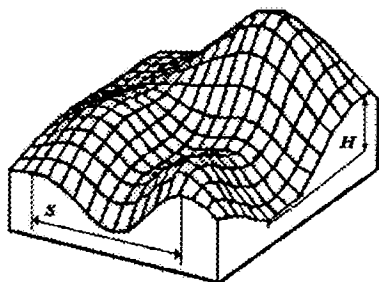


Рис. 11. Схема хвилястої поверхні.

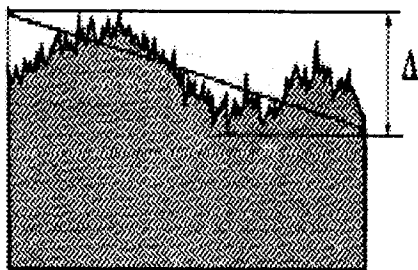


Рис. 12. Перетин реальної деталі площиною.

— **шорсткість** — це сукупність виступів та впадин, висота (глибина) яких знаходиться в межах  $10^{-2} - 10^2$  мкм (рис. 12).

Субмікрошорсткість — це відхилення нанометричних розмірів ( $h \sim 1 - 10^3$  нм), що являють собою кристалографічні площини, зерна, ультрамікроскопічні тріщини, дислокації.

**Площі контакту шорстких тіл**

Дискретність контакту реальних тіл зумовлена хвилястістю та шорсткістю поверхні. Розрізняють такі види площ контакту (рис. 13):

1) **Номинальна** ( $A_n$ ) — це площа, по якій контактували б тіла, якби їх поверхні мали ідеально гладку геометричну форму.

2) **Контурна** ( $A_c$ ) — це сумарна площа ділянок дотику, зумовлена деформацією вершин хвиль. Контурна площа контакту визначається хвилястістю поверхонь, навантаженням та механічними властивостями контактних пар.

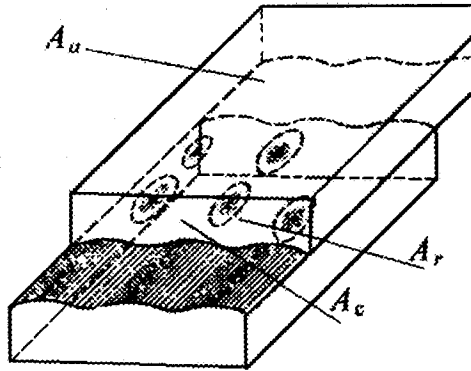


Рис. 13. Схема площ контакту твердих тіл.

3) **Фактична площа контакту** ( $A_f$ ) — це сумарна площа, на якій здійснюється контакт мікронерівностей, що утворюють шорсткість поверхонь. Фактична площа контакту (ФПК) складає 0,01 — 0,1 % номінальної площі. Навіть при великих навантаженнях, при пластичній деформації виступів, вона не перевищує 40 %. ФПК збільшується з підвищенням нормального навантаження, зменшенням шорсткості контактних поверхонь, а також із збільшенням терміну дії навантаження.

Залежно від наведених факторів контакт двох тіл може бути ненасиченим (коли кількість контактуючих нерівностей  $n_f$  менше кількості нерівностей  $n_c$ , розташованих на контурній площі) та насиченим (коли  $n_c = n_f$ ).

## Адгезія між твердими тілами

**Адгезія** — це процес, при якому утворюються з'єднання між двома приведеними у контакт різнорідними тілами (рис. 14). Якщо тіла однорідні, то цей процес називають **аутогезією**.

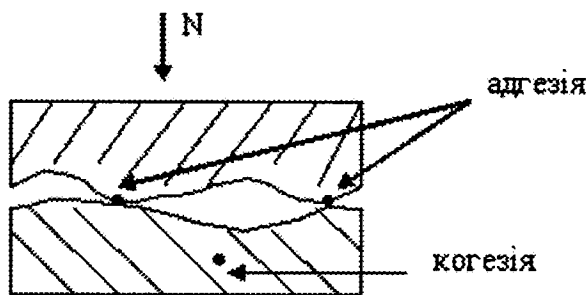


Рис. 14. Схема утворення адгезійних та когезійних з'єднань.

**Когезія** характеризує об'ємну міцність твердого тіла.

Під дією нормального навантаження між двома контактуючими поверхнями виникають адгезійні з'єднання (ділянки схоплювання) у місцях дотику нерівностей поверхонь. При знятті навантаження частина з'єднань руйнується завдяки пружному відновленню деформованих нерівностей. Міцність адгезійної взаємодії двох контактуючих тіл незначна, що пов'язано з невеликою кількістю та розмірами поверхонь, на яких утворюються адгезійні зв'язки. Крім того, в реальних умовах поверхні твердих тіл покриті оксидними та адсорбційними плівками, які перешкоджають утворенню адгезійних з'єднань.

Міцність адгезійних з'єднань підвищується тоді, коли:

- формування контакту відбувається при прикладанні нормального та дотичного навантаження;
- контакт поверхонь відбувається у вакуумі;
- у контакті спостерігається значне підвищення температур.

Указані явища призводять до видалення оксидних плівок, що підвищує імовірність утворення адгезійних з'єднань.

### 3. ВИДИ ТЕРТЯ ТА ТЕОРІЇ ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

#### 3.1. Основні терміни та визначення

**Тертя** — це явище опору відносному переміщенню, що виникає між двома тілами в ділянках дотику їх поверхонь у дотичному до них напрямку. Зусилля, необхідне для подолання опору, називається **силою тертя**. Відношення сили тертя між двома тілами до нормальної сили, яка притискує дані тіла один до одного, називається **коефіцієнтом тертя**.

За кінематичною ознакою розрізняють тертя спокою, ковзання, вертіння і кочення.

**Тертя спокою** є опором контактуючих тіл їх відносному переміщенню, що спостерігається при прикладанні нормального і дотичного навантажень, які не призводять до зміни координат і руйнування ділянок фактичного контакту. В цьому разі вершини контактуючих виступів не зміщуються одна щодо іншої. При терті спокою можливий відносний зсув контактуючих тіл, зумовлений деформацією контактуючих нерівностей і меншою мірою об'ємною деформацією цих тіл. Цей вид тертя має місце в муфтах зчеплення, фрикційних пристроях, ремінних передачах.

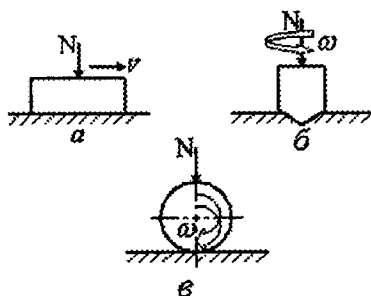


Рис. 15. Схеми контакту тіл при ковзанні (а), вертінні (б) та коченні (в).



**Тертя ковзання** спостерігається при відносному переміщенні контактуючих тіл і супроводжується постійною зміною виступів поверхонь пар тертя. При терті ковзання тіла, які сполучаються, переміщуються так, що вектори швидкостей на кожній загальній ділянці контакту різні за модулем або напрямом (рис. 15, а). Реалізується цей вид тертя в парах: направляюча — супорт, вал — вкладиш, поршень — втулка.

**Тертя вертіння** (рис. 15, б) має місце в опорах годинникових механізмів, ограновуючих дисків, веретен. Характеризується тим, що площа обох поверхонь тертя однакова, а швидкості відносного переміщення різних точок цих поверхонь різні, залежать від їх віддалення від центру контактної площі і знаходяться в інтервалі  $0 - V_{max}$ .

**Тертя кочення** — це опір взаємному переміщенню контактуючих тіл, при повороті одного з яких щодо миттєвої або постійної вісі в контакт вступають нові ділянки поверхонь тертя, а відносна швидкість різних точок цього тіла визначається їх віддаленням від контактної площі (рис. 15, в). Цей вид тертя реалізується в підшипниках кочення, парах колесо — рейка залізничного транспорту, ролик — транспортуюча стрічка конвейерних систем, гвинтових парах кочення. Внаслідок пружності реальних тіл їх контакт є не точкою або лінією, а площиною кінцевих розмірів. Тому кочення супроводжується, як правило, проковзуванням.

Кожному з розглянутих видів тертя притаманна зміна коефіцієнту тертя в певному діапазоні (табл. 3).

Табл. 3. Коефіцієнт тертя при різних видах тертя.

Вид тертя		Коефіцієнт тертя
Ковзання	без змащувального матеріалу	0,1 — 1,0
	граничний режим	0,05 — 0,2
	гідродинамічний режим	0,002 — 0,01
	газодинамічне мащення	0,0005 — 0,001
Кочення	без змащувального матеріалу	0,005 — 0,01
	з змащувальним матеріалом	0,0005 — 0,005

## *Зовнішнє та внутрішнє тертя*

**Зовнішнє тертя** твердих тіл реалізується за умов, коли міцність адгезійних зв'язків менша за когезійну міцність поверхневих шарів контактуючих пар. При цьому механічні властивості матеріалу за глибиною збільшуються у міру віддалення від поверхні на деяку відстань, досягаючи максимальних значень, а потім поступово знижуються до значень, характерних для основного матеріалу (рис. 16).

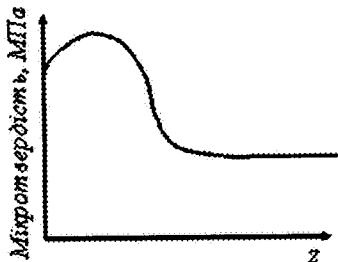


Рис. 16. Зміна мікротвердості матеріалів за глибиною.

Така зміна механічних властивостей приповерхневих шарів твердих тіл одержала назву **правила позитивного градієнту механічних властивостей за глибиною**. Згідно з цим правилом зовнішнє тертя реалізується тоді, коли на поверхні твердого тіла розташовані шари меншої міцності, ніж приповерхневі шари основного матеріалу.

Аналіз напруженого стану в зонах фактичного дотику свідчить, що товщина деформованих поверхневих шарів при зовнішньому терті за наявності пружних деформацій у контакті не перевищує 3–25 мкм. При домінуванні в контакті пластичної складової деформації товщина шарів, які деформуються в процесі тертя, складає 17–80 мкм.

**Внутрішнє тертя** твердих тіл реалізується за умов, коли міцність адгезійних зв'язків перевищує когезійну силу взаємодії однієї з контактних поверхонь. При цьому зсув відбувається в об'ємі поверхневих шарів, спостерігається постійне деформування матеріалу в напрямку ковзання.

### 3.2. Адгезійна, молекулярна та молекулярно-механічна теорії зовнішнього тертя

**Адгезійна теорія тертя** ґрунтується на припущенні, що мікронерівності, які вступають в контакт, утворюють "ділянки схоплювання" внаслідок адгезії на фактичних ділянках контакту (Ф. Боуден, Д. Тейбор). Сила тертя зумовлена опором розриву цих ділянок при відносному переміщенні контактуючих поверхонь:

$$F = \frac{\tau}{c \cdot \sigma_T} N,$$

де  $\tau$  — напруга розриву ділянок схоплювання;

$c$  — стала величина ( $\sim 3$ );

$\sigma_T$  — напруга текучості більш м'якого матеріалу;

$N$  — навантаження.

В залежності від властивостей контактуючих матеріалів зріз може відбуватися на межі розділу мікронерівностей або по більш м'якому матеріалу. З підвищенням навантаження збільшується пластична деформація контактуючих виступів та підвищується імовірність зближення поверхонь, внаслідок чого збільшуються розміри та кількість "ділянок схоплювання", що призводить до зростання сили тертя.

**Молекулярна теорія тертя** заснована на тому, що тертя зумовлено силами міжмолекулярної або міжатомної взаємодії контактних поверхонь (Дезагюльє І., Гарді В., Томлінсон Г, Дерягін Б.В.). При терті молекули, розташовані на вершинах мікронерівностей, які вступають у контакт, наближаються настільки, що виникають сили відштовхування. Залежно від зміщення контактуючих поверхонь виникають сили тяжіння, які перешкоджають розриву утворених зв'язків. Сила тертя за формулою Б.В. Дерягіна:

$$F = f(N + p_q A_r),$$

де  $f$  — коефіцієнт тертя;

$N$  — навантаження;

$p_q$  — рівнодіюча молекулярного тяжіння на одиниці площі фактичного контакту ( $A_r$ ).

**Молекулярно-механічна теорія тертя** запропонована І.В. Крагельським. Згідно з цією теорією тертя має подвійну природу:

— молекулярну ( $F_a$ )— тертя зумовлене силами молекулярної взаємодії на ділянках фактичного дотику;

— механічну ( $F_d$ )— тертя зумовлено опором деформованого матеріалу переміщенню втілених у його об'єм нерівностей більш твердого матеріалу.

**Молекулярна складова ( $F_a$ ).** Сили молекулярної взаємодії на ділянці АВ зумовлюють виникнення фрикційних зв'язків (рис. 17).

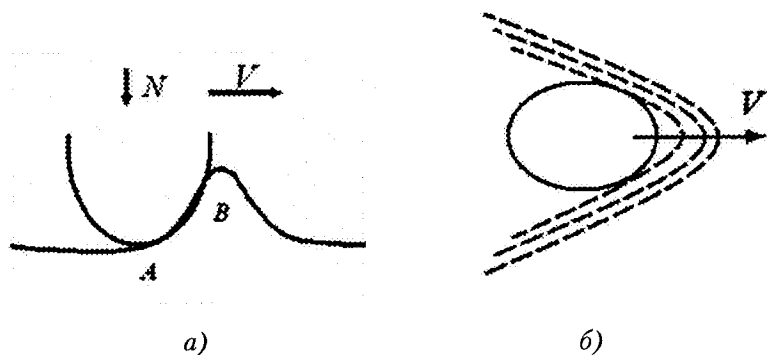


Рис. 17. Переміщення деформованого матеріалу в умовах ковзання при втіленні в його поверхню мікронерівності контртіла: а) — вигляд збоку; б) — вигляд зверху.

Для відносного переміщення необхідно подолати сили молекулярної взаємодії та розрив молекулярних зв'язків. Залежно від переміщення нерівності розрив старих зв'язків супроводжується утворенням нових. Чим більша кількість ділянок дотику і їх розміри, тим більше має бути зусилля, яке необхідне для переміщення контактуючих пар. Отже,  $F_a \sim A_r$ . Залежно від величини сили взаємодії в точках дотику розрив фрикційних зв'язків може відбуватися по

поверхні розділу матеріалів (по лінії АВ) або по об'єму більш м'якого матеріалу. В останньому випадку спостерігається схоплювання контактних поверхонь, підвищення інтенсивності зношування, що обумовлює реалізацію внутрішнього тертя. Для реалізації нормального зовнішнього тертя повинно виконуватися правило позитивного градієнта механічних властивостей за глибиною.

*Деформаційна складова ( $F_a$ )* зумовлена опором деформованого матеріалу поверхневого шару переміщенню втілених нерівностей. Втілена нерівність однієї контактної поверхні в поверхневий шар іншої буде деформувати цей шар. Попереду утворюється хвиля деформованого матеріалу, а з боків матеріал відтісняється врізнобіч. Висота хвилі буде тим більша, чим міцніший адгезійний зв'язок (ділянка АВ), чим пластичніший деформований матеріал та чим глибше втілення мікронерівності.

#### ***Положення молекулярно-механічної теорії тертя:***

— взаємодія між контактуючими парами здійснюється на дискретних ділянках;

— на ділянках контакту при зближенні поверхонь виникають високі сили взаємодії, що зумовлюють міжмолекулярний зв'язок контактних поверхонь (молекулярна складова);

— при відносному переміщенні поверхонь втілені виступи однієї поверхні зминають більш м'який матеріал іншої, опір цього матеріалу переміщенню в його об'ємі нерівностей поверхні контртіла складає механічну складову сили тертя;

— поверхні контактуючих пар покриті окисними та адсорбційними плівками, тому міжмолекулярна взаємодія реалізується не між самими тілами, а між плівками різної природи (забезпечується правило позитивного градієнту механічних властивостей).

### **3.3. Класифікація розриву фрикційних зв'язків (згідно з І.В. Крагельським)**

***Фрикційний зв'язок*** — це ділянка дотику поверхонь, яка утворюється при одночасній дії нормальних та дотичних напруг і зникає

при знятті нормальної напруги. Характер розриву фрикційного зв'язку та комплекс процесів, які протікають у поверхневих шарах, залежать від геометричних, механічних, фізичних, хімічних факторів.

Одним із найвпливовіших факторів є геометричний, який характеризується відношенням глибини втілення до радіуса мікронерівності  $h/R$  (рис. 18).

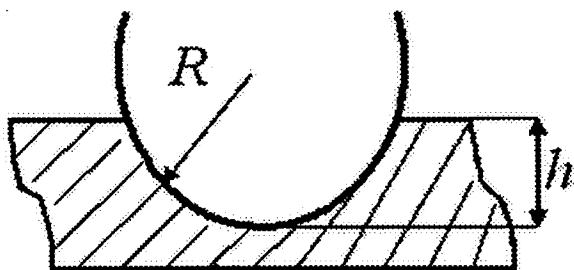


Рис. 18. Схема визначення глибини втілення мікронерівності.

Якщо нерівність моделювати сферичним сегментом, то глибину її втілення розраховують за формулою:

$$h = 240 \frac{\sigma_T^2}{E^2} R,$$

де  $\sigma_T$  – межа текучості матеріалу;

$E$  – модуль пружності.

Ця характеристика дозволяє розрізнити пружний і пластичний контакти та мікрорізання.

Другим фактором є фізико-механічний, який характеризується відношенням тангенціальної міцності молекулярного зв'язку до межі текучості матеріалу основи  $\tau/\sigma_T$ .

При цьому слід розрізнити:

– розрив зв'язку відбувається по поверхні розділу двох тіл (зміна градієнту механічних властивостей за глибиною –  $(d_1/d_2) > 0$ );

— розрив зв'язку відбувається за глибиною основного матеріалу (зміна градієнту механічних властивостей за глибиною —  $(d_{\tau}/d_z) \leq 0$ ), реалізується внутрішнє тертя.

Пропонується розрізнати п'ять видів фрикційного зв'язку (табл. 4):

1) **Пружне відтіснення матеріалу** виступами контртіла реалізується, коли діючі навантаження та адгезія не призводять до утворення в зоні контакту напруг, які не перевищують межу текучості. При цьому знос контактних поверхонь мінімальний.






2) **Пластичне відтіснення матеріалу** відбувається, якщо контактні напруги досягають межі текучості, але матеріал відтісняється виступами контртіла.

3) **Мікрорізання** — контактні напруги чи деформації досягають граничних значень.

4) **Адгезійний розрив** фрикційних зв'язків відбувається по тій поверхні, на якій вони виникли.

5) **Когезійний розрив** виникає, коли міцність фрикційного зв'язку перевищує міцність нижчезрозташованого матеріалу, відбувається глибинний вирив матеріалу.

Табл. 4. Основні характеристики фрикційних зв'язків

Характер деформування	Пружне відтіснення матеріалу	Пластичне деформування	Мікрорізання	Адгезійний розрив	Когезійний розрив
					
Число циклів, що обумовлюють пошкодження	$n \rightarrow \infty$	$1 < n < \infty$	$n \rightarrow 1$	$n \rightarrow \infty$	$n \rightarrow 1$
Умови виникнення	$(h/R) < 0,01$ (чорні метали) $(h/R) < 0,0001$ (кольорові метали)	$(h/R) > 0,01$ (чорні метали) $(h/R) > 0,0001$ (кольорові метали)	$\frac{h}{R} \geq \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{2\tau}{\sigma_T} \right)$	$d_1/d_2 > 0$	$d_1/d_2 < 0$
Інтенсивність зношування	Знос мінімальний	Залежить від ступеня пластичної деформації	Знос максимальний	Знос мінімальний	Знос максимальний; спостерігається схоплювання, вирив металу



## 4. ВИДИ МАЩЕННЯ В ТРИБОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ

### 4.1. Діаграма Герсі – Штрібека

У триботехніці розрізняють такі види мащення: газове, рідинне, тверде, гідро— і газодинамічне, гідро— і газостатичне, еластогідродинамічне, граничне і змішане.

Залежно від товщини змащувального шару визначають вид мащення і природу змащувальної дії за критерієм  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}},$$

де  $h$  — товщина змащувального шару;

$R_a$  — середнє арифметичне відхилення профілю контактуючих поверхонь.

Класифікація режимів мащення згідно зі значенням  $\lambda$  така:  $\lambda = 0-1$  — напівсухий;  $\lambda = 1-1,5$  — граничний;  $\lambda = 1,5-3$  — змішаний;  $\lambda = 3-4$  — еластогідродинамічний (контактно-гідродинамічний);  $\lambda > 4$  — гідродинамічний.

Інформативним показником умов переходу від сухого режиму мащення до гідродинамічного є діаграма Герсі — Штрібека (рис. 19), яка графічно відображає залежність коефіцієнту тертя від критерію Зоммерфельда  $\eta\omega/\rho$ , де  $\eta$  — динамічна в'язкість мастильного матеріалу,  $\omega$  — кутова швидкість,  $\rho$  — навантаження.

Характер впливу кожної величини, що входить до параметра Зоммерфельда, такий:

1) **В'язкість.** При низькій динамічній в'язкості мастильного матеріалу в контактi формується недостатня товщина мастильного шару, необхідна для повного розділення поверхонь, реалізується граничний режим мащення, який характеризується високим ко-

ефіцієнтом тертя. З підвищенням в'язкості товщина мастильного шару збільшується, спостерігається зниження коефіцієнту тертя та перехід до гідродинамічного режиму мащення. Але застосування високов'язкісних мастильних матеріалів може призводити до збільшення коефіцієнту тертя за рахунок підвищення сили внутрішнього тертя в об'ємі рідини.

2) **Кутова швидкість.** При низькій швидкості недостатньо мастильного матеріалу надходить в зону контакту, що призводить до граничного мащення. Із збільшенням швидкості поступово створюються умови для повного розділення поверхонь тертя, коефіцієнт тертя знижується — реалізується гідродинамічний режим мащення. Однак подальше підвищення швидкості обумовлює зростання градієнту швидкості зсуву рідини по товщині, що обумовлює підвищення коефіцієнту тертя.

3) **Навантаження.** При високому тиску товщина сформованого мастильного шару може бути недостатньою для повного розділення поверхонь тертя, спостерігається видавлювання мастильного матеріалу із зони контакту, що призводить до підвищення коефіцієнту тертя та реалізації граничного режиму мащення. При низькому навантаженні може спостерігатися формування товщини мастильного шару вищої за оптимальну, внаслідок чого підвищується сила внутрішнього тертя в шарі рідини.

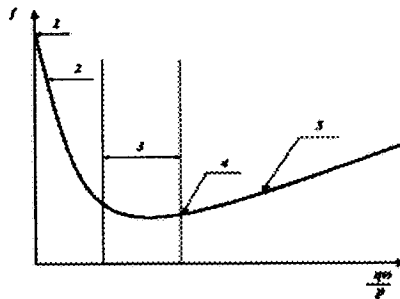


Рис. 19. Діаграма Герсі-Штрібека: 1 — сухий; 2 — граничний; 3 — змішаний; 4 — еластогідродинамічний; 5 — гідродинамічний режими мащення.

## 4.2. Тертя без змащувального матеріалу

*Сухий режим мащення (тертя без змащувального матеріалу)* реалізується тоді, коли контактні поверхні покриті тільки окисними плівками або адсорбованими плівками води і газу. Даний режим мащення реалізується в гальмівній системі, фрикційних передачах і вузлах тертя, де неприпустимо використання змащувальних матеріалів (машини текстильної, харчової, хімічної промисловості) або їх застосування неможливе внаслідок високої температури в зоні контакту.

При сухому мащенні тертя має молекулярно-механічну природу. На ділянках фактичного дотику діють сили молекулярного тяжіння, що проявляються на відстанях, які в десятки разів перевищують міжатомну відстань у кристалічних решітках, і збільшуються з підвищенням температури. Молекулярні сили зумовлюють прилипання або адгезію контактних поверхонь у місцях фактичного дотику. Плівки оксидів, волога і забруднення металевих поверхонь впливають на коефіцієнт тертя неоднозначно. Сили молекулярного тяжіння між ними можуть бути в сотні разів меншими, ніж при взаємодії ювенільних поверхонь. Крім того, міцність оксидів звичайно менша за міцність основного матеріалу, так що опір зрізу частинок при переміщенні разом із силами молекулярної взаємодії значно знижується, і коефіцієнт тертя падає. Однак збільшення товщини плівки оксидів щодо оптимального значення призводить до підвищення площі фактичного контакту, причому, якщо це зростання протікає швидше, ніж зменшення механічної складової сили тертя, то створюються умови для збільшення коефіцієнта тертя.

Сухе тертя супроводжується стрибкоподібним переміщенням поверхонь, із чим пов'язані вібрація автомобіля при включенні зчеплення, "ривки" при гальмуванні, вібрація різців при різанні і порушення плавності роботи повільно рухомих деталей.

Здебільшого для вузлів тертя, які працюють без змащувальних матеріалів, одне з тіл тертя виготовляють з композиту, що містить тверду змащувальну речовину (дисульфід молібдену, диселенід

вольфраму, графіт) або пластичні метали. Тверді змащувальні матеріали, які характеризуються пошаровою структурою і низьким опором зсуву, знижують силу тертя і інтенсивність зношування контактних поверхонь.

### 4.3. Гідродинамічний режим мащення

*Гідродинамічний режим* — це режим змащувальної дії, що характеризується наявністю рідинного мащення, при якому повне розділення поверхонь тертя здійснюється внаслідок тиску, що виникає в шарі рідини при відносному русі цих поверхонь (гідро— і газодинамічне мащення) або під дією зовнішнього тиску (гідро— і газостатичне мащення). При рідинному терті поверхні повністю розділені шаром масла, що знаходиться під тиском. Тиск масла в зазорі врівноважує зовнішнє навантаження, забезпечує рівномірність розподілу напруг у поверхневому шарі матеріалу деталі. Відносне переміщення поверхонь відбувається за наявності тертя в рідкому прошарку. Опір цьому переміщенню визначається внутрішнім тертям у шарі масла. Цьому режиму тертя притаманний досить малий коефіцієнт тертя, зношування деталей при рідинному терті може бути відсутнім або досить незначним. Про рідинне тертя говорять, як про режим досконалого мащення, що забезпечує максимальну довговічність вузла тертя.

Необхідною умовою існування гідродинамічного режиму мащення є розділення контактуючих тіл шаром змащувального матеріалу, товщина якого перевищує сумарну висоту найбільш високих нерівностей поверхонь, що сполучаються. Для реалізації гідродинамічного режиму мащення також необхідна наявність наступних умов: зміна градієнта швидкості, а отже, і дотичних напруг по довжині змащувального шару (при постійній густині рідини ця умова справедлива при змінній товщині змащувального шару, тобто за наявності клиноподібного зазору між парами тертя) і створення градієнта тиску уздовж змащувального шару, у напрямі руху потоку рідини.

Перерахованим вимогам задовольняє ряд вузлів тертя: вал — підшипник ковзання, плунжер — втулка, циліндр — поршень гідравлічних пристроїв і под.

Утворення тиску в мастильному шарі в підшипнику ковзання і розподіл тиску всередині шару представлено на рис. 20.

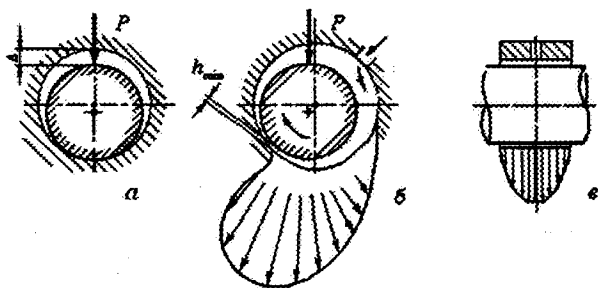


Рис. 20. Схема утворення і розподілу тиску в мастильному шарі підшипника ковзання.

При обертанні валу і наявності внутрішнього тертя в рідині відбувається її безперервне затягування в зазор, що звужується, тобто вал діє як насос, який забезпечує безперервну циркуляцію рідини. Затягування мастильного матеріалу в звужуючу частину зазору призводить до виникнення в його об'ємі надмірного нормального тиску ( $p$ ) на поверхню рідини. Максимальне значення тиску досягається в перетині, розташованому поблизу мінімального зазору. Цей перетин зміщується у напрямі обертання валу під дією позитивного градієнта тиску ( $dp/dx$ ) до того часу, поки рівнодіюча сил нормального тиску і тертя, що діє з боку рідини, не зрівноважить прикладене до валу зовнішнє навантаження. Як тільки в змащувальному шарі підшипника створюється тиск, який виявляється достатнім для урівноваження зовнішнього навантаження і відділення валу від підшипника, — вал спливає на тонкому змащувальному шарі. У частині зазору, що розширюється, тиск в рідині падає. Слід зазначити, що несуча здатність (вантажопідйомність) змащувального шару розташовується так, що його

протяжність у зоні звужуючого зазору буде значно більшою, ніж у зоні розширення, а еюра розподілу тиску в масляному шарі по площі контакту буде несиметричною.

Фундаментальною основою, за якою побудована теорія гідродинамічного мащення, є рівняння О. Рейнольдса, яке в спрощеній формі має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 6U\eta \frac{dh}{dx},$$

де  $x$  і  $y$  – взаємно перпендикулярні координати;

$P$  – тиск всередині мастильного шару;

$h$  – товщина плівки;

$U$  – швидкість ковзання;

$\eta$  – динамічна в'язкість масла.

З рівняння Рейнольдса виходить, що несуча здатність змащувального шару є функцією його товщини ( $h$ ), швидкості ковзання ( $U$ ) і динамічної в'язкості ( $\eta$ ). Що менша товщина шару (зазор), то вища його вантажопідйомність. Тому в конструкціях передбачають зазор між валом і підшипником близько 0,001 радіусу валу. Слід враховувати, що мінімальний зазор між поверхнями тертя повинен перевищувати суму висот найбільш виступаючих нерівностей цих поверхонь, інакше можливий перехід до еластогідродинамічного або змішаного режиму мащення.

Мінімальна товщина шару, при якій ще зберігаються умови для гідродинамічного мащення, може бути орієнтовно визначена за формулою:

$$h_{\min} = 0,57 \frac{\eta U d l}{N},$$

де  $l$  – довжина підшипника ( $l \gg d$ );

$N$  – навантаження.

При виведенні рівняння потоку масла припускають, що:

- об'ємними, гравітаційними, інерційними силами можна нехтувати;
- масло є ньютонівською нестискуваною рідиною, в'язкість постійна;
- тиск за висотою тонкого масляного шару розглядаєть як постійний;
- кривизна поверхонь підшипника порівняно з товщиною плівки незначна;
- ковзання по межі рідина — тверде тіло або газ — тверде тіло відсутнє;
- потік масляного шару розглядається як ламінарний.

Механізм тертя при рідинному мащенні складніший, ніж це витікає з гідродинамічної теорії, що охоплює чисто механічну сторону процесу. Зокрема, шар масла у поперечному напрямку неоднорідний і складається з моно- або полімолекулярного граничного адсорбційного шару; до граничного шару примикає зона мікротурбулентного руху, за якою слідує ламінарний потік масла.

Опір руху гідродинамічнозмашеної системи визначається дотичними напругами в рухомій рідині. Щоб одержати міру опору зрушенню або в'язкості рідини, розглянемо систему з двох плоских твердих поверхонь, представлену на рис. 21.

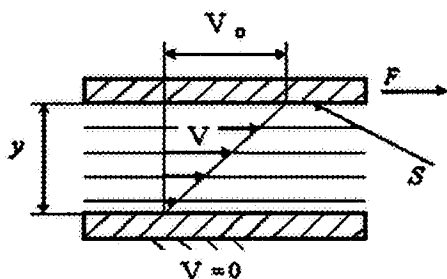


Рис. 21. В'язке тертя між паралельними пластинами.

Нижня поверхня нерухома, а верхня рухається паралельно їй із швидкістю  $V_0$ . Оскільки молекули рідини прилипають до поверхонь,

при помірних швидкостях рідина має ламінарний профіль швидкостей з  $V = V_0$  на верхній площині та  $V = 0$  на нижній. Сила, необхідна для підтримки руху верхньої поверхні, пропорційна площі поверхні  $S$  та  $V_0/y$ , де  $y$  – відстань між пластинами.

Згідно із законом Ньютона, сила тертя в розглянутій системі визначається рівнянням:

$$F = \eta \frac{dV}{dy} S,$$

де  $\eta$  – динамічна в'язкість рідини;

$dV/dy$  – градієнт швидкості зсуву рідини в зазорі між тілами тертя по нормалі до вектора швидкості;

$S$  – площа зсуву.

Коефіцієнт пропорційності  $\eta$  називається **коефіцієнтом в'язкості**, і рідини, що підпорядковуються закону пропорційності між дотичною напругою ( $\tau$ ) і швидкістю зміни градієнта зсуву ( $dV/dy$ ), при якому виконується умова

$$\tau = F/S = \eta(dV/dy),$$

відносять до класу **ньютонівських рідин**.

#### 4.4. Реологічні властивості мастильних середовищ

Вивченням в'язкісних властивостей матеріалів при дії різних зовнішніх умов займається реологія.

**Реологія** – це розділ фізики, що вивчає течію і деформацію реальних суцільних середовищ, які характеризуються в'язкістю, пластичністю, пружністю. Реологія займає проміжне положення між гідродинамікою і теорією пружності.

В'язкість будь-якої дисперсної системи залежить від таких основних чинників:



- концентрації дисперсної фази;
- в'язкості рідкої фази;
- розміру і конфігурації частинок;
- агрегації частинок;
- розчинених в рідкому середовищі макромолекулярних речовин;
- вмісту емульгаторів і поверхнево-активних речовин.

У реології розрізняють так звані **ньютонівські** рідини, які характеризуються тим, що при незмінній температурі їх в'язкість залишається постійною незалежно від швидкості зсуву, при якій проводиться вимірювання в'язкості, і неньютонівські рідини. При ньютонівській течії рідких середовищ швидкість зсуву завжди прямо пропорційна дотичній напрузі зсуву (рис. 22).

У природі величезна кількість рідин не підкоряється закону течії рідини Ньютона, тому що їх в'язкість залежить від швидкості зсуву (полімерні розчини, суспензії, емульсії, мастила). Ці види рідин відносять до класу **неньютонівських**, для яких зв'язок між градієнтом швидкості зсуву та дотичною напругою описується нелінійними складними залежностями (рис. 22).

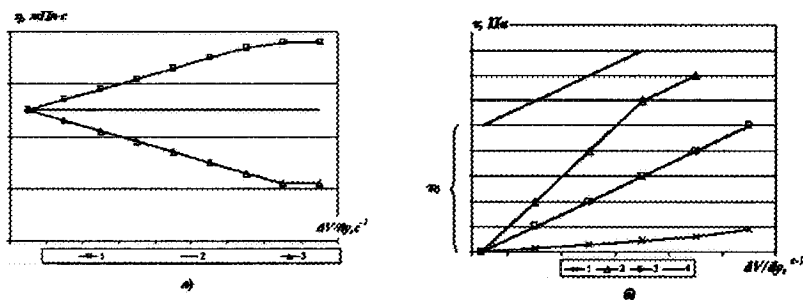


Рис. 22. Залежність в'язкості мастильних матеріалів (а) та напруг зсуву (б) від градієнта швидкості зсуву. 1 — дилатантні, 2 — ньютонівські, 3 — псевдопластичні, 4 — пластичні речовини.

Унаслідок взаємодії частинок неньютонівські рідини мають складну будову та тією чи іншою мірою структуровані залежно від характеру взаємодії складових компонентів.

Розрізняють декілька видів неньютонівських рідин, а саме:

— **пластичні** (рідина або тверде тіло Бінгама) — у таких видах рідин потрібно докласти деяке початкове зусилля для того, щоб почалася їх течія, після чого залежність у координатах напруга зсуву — швидкість зсуву стає прямолінійною. В'язкість таких рідин при низьких швидкостях зсуву дуже велика, а при зростанні цього параметра швидко зменшується і характеризується двома константами, а саме: пластичною в'язкістю і граничною напругою зсуву. Прикладом таких систем є пластичне тверде тіло, наприклад, мастило, яке характеризується текучістю тільки при нарузі зсуву, що перевищує граничну межу текучості  $\tau_0$ ;

— **псевдопластичні** — рідини, у яких в'язкість змінюється відповідно до швидкості зсуву, і будь-яка зміна в'язкості характеризує так звану в'язкість, що здається, тільки для даної швидкості зсуву. В'язкість псевдопластичної рідини здається високою при низьких швидкостях зсуву і зменшується при збільшенні швидкості зсуву. Такими властивостями характеризуються каучуки і пластичні матеріали, що містять анізотропні несиметричні компоненти, взаємодія між якими ослаблюється при зростанні швидкості зсуву;

— **дилатантні** — рідини, які характеризуються зростанням в'язкості із збільшенням швидкості зсуву. За таких умов що сильніше перемішується рідина, то більше вона стає в'язкою, тобто напруга зсуву збільшується швидше, ніж швидкість зсуву. Такі властивості проявляються в суспензіях з великим вмістом твердої фази, що зумовлено збільшенням сили тертя між структурованими компонентами із зростанням швидкості. Масел, здатних до збільшення об'єму (зростання в'язкості під дією напруги зсуву), у природі поки що не виявлено. Це явище можливе в разі недостатньо ретельного розмішування присадок у маслі при їх виробництві.

Відомо, що в'язкість неньютонівських рідин може залежати не тільки від величини швидкості зсуву, але й від тривалості її дії. Ця властивість називається **тиксотропією**. Наприклад, при швидкому перемішуванні в'язкість тиксотропної рідини може помітно

зменшитися, а при знятті зрушуючих зусиль тиксотропна структура поступово відновлюється до початкового стану. Тривалість відновлення початкової структури (*релаксація*) для різних рідин може розрізнятися за часом та залежить від їх хімічної природи і особливостей внутрішньомолекулярних взаємодій.

У табл. 5 представлені визначальні рівняння ньютонівських і неньютонівських рідин, використання яких дає змогу уточнити класичну теорію Рейнольдса.

Чисті мінеральні і синтетичні масла з різними молекулярними масами є ньютонівськими рідинами, що не втрачають своїх властивостей при швидкостях зсуву аж до  $10^6 \text{ с}^{-1}$ , які можуть розвиватися у віскозиметрах в лабораторних умовах. Уведення до базових масел присадок, більшість із яких є ньютонівськими рідинами, може призводити до створення структурної в'язкості (тобто перетворювати масла на неньютонівські рідини). Це характерно для моторних, індустріальних і трансмісійних масел, що містять високомолекулярні в'язкісні та миючо-диспергуючі присадки. Мила і колоїдні частки, залишкові продукти згоряння, дисперговані в працюючих моторних маслах, також додають маслам неньютонівських характеристик. В'язкість таких масел під дією напруги зсуву ніколи не знижується до рівня в'язкості базового масла, що необхідно враховувати при виборі змащувального матеріалу для триботехнічної пари.

Табл. 5. Ньютонівські і неньютонівські рідини.

Тип мастильного матеріалу	Визначальне рівняння
Ньютонівська рідина	$dV/dy = \tau/\eta$
Неньютонівські рідини	
1) пластична (рідина або тверде тіло Бінгама)	$dV/dy = (\tau + \tau_0)/\eta$
2) псевдопластична	$dV/dy = (\tau/\eta)^{1/N}$ при $N < 1$
3) дилатантна	$dV/dy = (\tau/\eta)^{1/N}$ при $N > 1$

#### 4.5. Еластогідродинамічний (контактно-гідродинамічний) режим мащення

Теорію еластогідродинамічного мащення можна визначити як вивчення умов, при яких пружна деформація контактуючих тіл відіграє істотну роль в гідродинамічному процесі мащення. У більшості машин і механізмів сили передаються від однієї деталі до іншої через великі опорні площі, але часто бувають і зосереджені лінійні або точкові контакти. Типовими прикладами останніх є зубчасті передачі й підшипники кочення. Установлено, що значна кількість навантажених контактів із нещільним приляганням поверхонь поводить ся так, якби вони були гідродинамічно змащені, проте розроблена Рейнольдсом теорія взагалі не давала змоги пояснити, чому в найжорсткіших за рівнем напруг умовах повинно існувати подібне мащення. Наприклад, при лінійному контакті шестерень евольвентного зачеплення передбачається високий тиск (оскільки площа, по якій передаються сили, прагне до нуля), і якщо не враховувати пружної деформації зуба шестерні, то важко уявити, що масло здатне протистояти такому тиску. Проте якщо допустити залежність в'язкості масла від тиску і пружну деформацію дотичних твердих тіл, то можна показати існування задовільного мащення в таких умовах, що підтверджено багатьма експериментальними даними.

**Еластогідродинамічний (ЕГД) режим** мащення реалізується в триботехнічному контакті за умов, коли сила тертя і товщина змащувального шару в зоні контакту поверхонь, які знаходяться у відносному русі, визначаються пружними деформаціями поверхонь та залежністю в'язкості мастильного матеріалу від тиску.

Указані чинники забезпечують гідродинамічний режим мащення в більш напружених режимах, ніж це можливо в класичній гідродинамічній теорії. ЕГД-мащення реалізується в парах тертя, які працюють при високих контактних навантаженнях, — зубчастих передачах, підшипниках кочення, деталях газорозподілу у двигунах внутрішнього згорання та ін.

Основи ЕГД-теорії розроблені А.І. Петрусевичем, А.М. Ертелем, А.Н. Грубіним, Д.С. Кодніром, М.В. Коровчинським та ін.

Механізм еластогідродинамічного мащення можна представити таким чином. При коченні або при коченні з проковзуванням масла втягується в зону контакту рухомими поверхнями. За деяких умов, аналогічних умовам виникнення гідродинамічного мащення між ковзаючими поверхнями, в масляному шарі утворюється підйомна сила. Внаслідок незначної протяжності зони контакту і великого тиску для сформованої масляної плівки характерна товщина того ж порядку, що і місцеві деформації контактуючих тіл. Ці деформації впливають на конфігурацію зазору.

На рис. 23 представлена форма зазору і графік тиску для циліндрів в умовах кочення під навантаженням за наявності між ними розділяючого масляного шару. Точка *A* — початок ділянки дотику поверхонь циліндрів в умовах сухого мащення. Перед контактом в масляному клині виникає тиск, який поступово переходить в напівеліптичну форму і на деякій ділянці контакту розподіляється так, як і за умов сухого контакту. Матеріал циліндрів зазнає пружних деформацій в зоні контакту. У зв'язку з тим, що нормальний тиск розподіляється по ширині контактної ділянки за еліптичним законом, поверхні циліндрів у центральній частині контакту (зона *AO*) нагадуватимуть площини, розташовані майже паралельно, а в'язкість рідини в цій частині контакту буде значно вищою, ніж на вході.

Тому гідродинамічний тиск на вході в контакт поступово, у міру переміщення до точки *O*, зростає і досягає максимуму в центральній зоні контактної ділянки. Поблизу зони виходу пар тертя з контакту герцівський тиск наближається до нуля (зона *OC*) і деформація циліндрів така, що спостерігається різке звуження товщини змащувального шару і падіння в'язкості рідини. В результаті швидкість потоку рідини в зоні мінімального зазору різко зростає, що призводить до інтенсивного підйому гідродинамічного тиску (пік тиску в точці *B*).

Місце розташування піку залежить від навантаження, в'язкості масла, швидкості кочення. За А.І. Петрусевичем, величина пікового

тиску дещо менша за найбільший тиск у центральній ділянці контакту. Згідно з проведеними ним дослідженнями, для утворення пікового тиску необхідно, щоб контактне навантаження складало  $>200\text{--}300\text{МПа}$ .

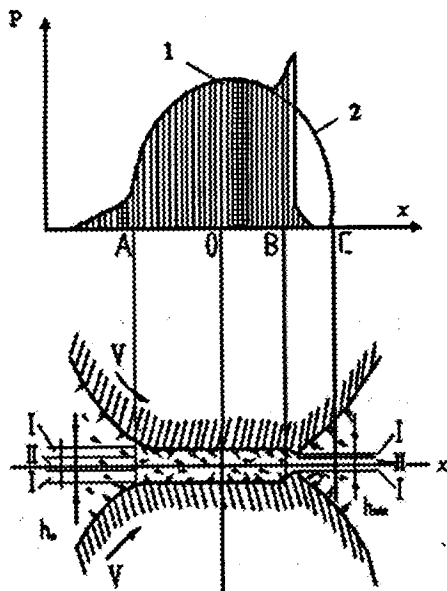


Рис. 23. Розподіл напруг та структура змащувального шару в еластогідродинамічному контакті тертя: I – граничний змащувальний шар; II – гідродинамічний змащувальний шар;  $h_{min}$  – мінімальна товщина змащувального шару;  $h_0$  – товщина змащувального шару в центральній зоні контакту;  $V$  – швидкість поверхонь тертя;  $P$  – контактна напруга; 1 – графік напруг в масляному шарі; 2 – розподіл напруг за Герцем для сухих поверхонь.

Товщина змащувального шару в реальних вузлах тертя при еластогідродинамічному мащенні може значно перевищувати розрахункове значення, особливо при високому тиску, завдяки пружній деформації елементів трибоспряження. Збереженню товщини змащувального

шару при важких режимах навантаження сприяє також те, що збільшення тиску зумовлює зростання в'язкості рідини. Мастильний матеріал не встигає виявити свою текучість (витікати із зони контакту), і внаслідок цього товщина змащувального шару зменшується неістотно навіть при значному зростанні стискаючого навантаження.

Для нестискуваної рідини залежність в'язкості від тиску виражається формулою Баруса

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p),$$

де  $\eta_0$  — динамічна в'язкість рідини при атмосферному тиску;

$p$  — навантаження;

$\alpha$  — п'езокоефіцієнт в'язкості.

Обґрунтованість експоненціальної залежності підтверджується сильним зростанням в'язкості із збільшенням тиску. Наприклад, при тиску по Герцу  $\sim 1$  ГПа в'язкість мінерального масла зростає в  $10^6$  разів порівняно з її значенням за атмосферних умов.

При застосуванні гіпотези про ньютонівські властивості масла з використанням формули Баруса п'езокоефіцієнт  $\alpha$  є функцією типу масла, температури і тиску, але якщо масло хоча б в деяких точках зони контакту набуває неньютонівських властивостей, то  $\alpha$  стає функцією додаткових параметрів — радіусу кривизни поверхонь тертя, швидкостей кочення і ковзання, що обмежує його практичне використання.

Відносна товщина шару масла на основі теорії подібності є функцією трьох безрозмірних параметрів:

$$h/R = f(U, G, W)$$

де  $U = \eta_0 V / E' R$  — безрозмірний параметр швидкості;

$G = \alpha E'$  — безрозмірний параметр матеріалу;

$W = F / E' R L$  — безрозмірний параметр навантаження.

Представлені розрахункові формули товщини ЕГД-плівки можна узагальнити залежністю:

$$H = kU^a G^b W^c,$$

де значення  $k$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  наведені в таблиці 6.

Слід зазначити, що представлені залежності з високими показниками кореляції відображають властивості плівки в умовах чистого кочення або кочення з невеликим проковзуванням. При збільшенні частки проковзування слід коректувати формули за допомогою коефіцієнтів, залежних від неізотермічних процесів у триботехнічному контакті.

Табл. 6. Розрахункові коефіцієнти для визначення товщини ЕГД-шару

Автори формули	Коефіцієнти				Похибка щодо формули Д. Доусона, %
А.М. Ергель, А.І. Грубін	1,95	0,727	0,727	-0,091	+10
Д. Доусон	2,65	0,7	0,54	-0,13	—
Х. Кшеміньскі-Фреда	1,65	0,7	0,61	-0,12	+3
Б. Хемрок	3,07	0,71	0,57	-0,11	-4

Дані про зміни температур по ділянці дотику поверхонь тертя, одержані в різних умовах, показують важливість впливу швидкості ковзання і контактного тиску на температури поверхні кулі і мастильного матеріалу (рис. 24). Вони також свідчать про істотний вплив нагрівання в зоні входу, яке, у свою чергу, знижує в'язкість масла і п'єзокоефіцієнт, тобто основні характеристики, що визначають товщину ЕГД-шару.

Ще однією робочою умовою, яка рідко враховується при розрахунках товщини мастильного шару, згідно з еластогідродинамічною теорією мащення, є підведення і розподіл масла в найближчих ділянках стосовно основної зони контакту. В багатьох експериментальних дослідженнях доведено, що недостатня



кількість мастильного матеріалу істотно впливає на еластогідродинамічні характеристики системи. Більше того, цей вплив може виявитися вирішальним чинником для робочих характеристик деталей машин, оскільки створюються передумови для реалізації масляного голодування в контакті (рис. 25, 26).

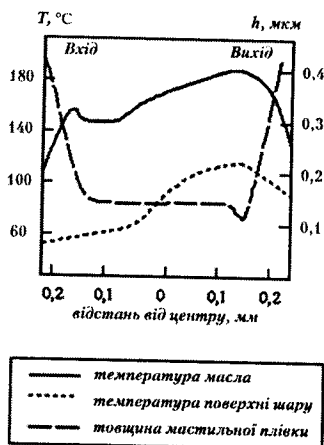


Рис. 24. Температури в зоні еластогідродинамічного контакту ковзання уздовж середньої лінії контакту (контакт кулі з площиною  $r = 15,9$  мм,  $\sigma_{max} = 1$  ГПа,  $V = 1,4$  м/с).

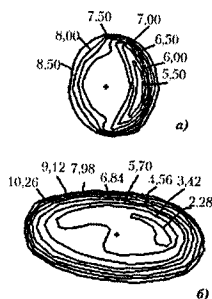


Рис. 25. Розподіл товщини мастильного шару ( $H \cdot 10^5$ ) в точковому (а) та еліптичному (б) ЕГД-контактах.

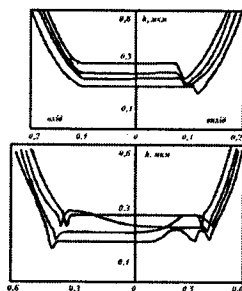


Рис. 26. Динаміка зміни розподілу товщини мастильного шару в умовах масляного голодування для масла МС-20.

#### 4.6. Змішаний і граничний режими мащення

Якщо умови гомогенного тертя не виконуються, то за природою і за походженням визначальних його сил тертя режим мащення є гетерогенним або змішаним. **Змішаним тертям** називається сума всіх, або мінімум двох видів тертя. При цьому частина поверхонь пар тертя контактує безпосередньо (тертя без змащувального матеріалу), а частина розділена граничною плівкою (граничне мащення) або гідро-чи еластогідродинамічною плівкою змащувального матеріалу.

Змішане тертя має місце при малій швидкості руху і великих навантаженнях, при нестационарних режимах пуск — зупинка. Змішане тертя характеризується комплексністю визначальних його сил і накладанням різнорідних функціональних залежностей. Так, у зоні тертя існують тільки окремі ділянки безпосереднього металевого контакту, поверхня яких незначна порівняно з номінальною площею тертя, а змащувальний матеріал в триботехнічному контакті характеризується об'ємними властивостями при товщині масляної плівки тільки більше 0,1 мкм.

Сила змішаного тертя визначається за формулою:

$$F_{\text{зміш}} = F_{\text{сух}} - F_{\text{рід}} = f_0 N - \eta A (dV/dh),$$

де  $f_0$  — коефіцієнт сухого тертя;

$N$  — нормальне навантаження;

$\eta$  — динамічна в'язкість масла;

$A$  — площа тертя;

$V$  — швидкість;

$h$  — товщина плівки.

Визначаючи силу тертя при змішаному режимі мащення, необхідно враховувати, що вона включає складові сил тертя в декількох режимах, які різні як за фізичною природою, так і за характером залежності від таких параметрів, як тиск, швидкість, температура. Тому цей вид тертя не можна розглядати як суму його складників.

Під *граничним режимом мащення* розуміється тертя між твердими тілами за наявності на їх поверхні мастильного матеріалу. При цьому швидкість ковзання і питомий номінальний тиск такі, що підйомна сила, яка визначається гідродинамічними ефектами, незначна. Як наслідок, навантаження у контактуючих парах урівноважується зусиллями на дискретних ділянках силового контакту. В найпоширенішій теорії граничного тертя передбачається, що деяка частина цих зон не покрита плівкою масла, виникає сильна адгезійна взаємодія між контактуючими нерівностями, і сила тертя в основному визначається опором зрізу адгезійних з'єднань. Невелика частина тангенціального опору визначається в'язким опором зсуву плівок масла, що збереглися на ділянках силового контакту.

Граничне тертя визначається багатьма чинниками, серед яких:

- стан і властивості твердих поверхонь;
- кінетика адсорбційних процесів молекул змащувального матеріалу в зоні контакту і фізико — механічні властивості граничних шарів;
- ефективна товщина граничного шару, тиск, швидкість, температура;
- динамічна зміна і адаптація граничних шарів до умов навантаження, а також явища термічного розпаду молекул, хімічні реакції модифікації і окислення.

Слід зазначити, що багаточисельність і мінливість чинників, які впливають на параметри змішаного і граничного режимів мащення, представляють сукупність механо-фізико-хімічних процесів гетерогенної системи трибологічних процесів, взаємозв'язок яких є найменш вивченим питанням трибології.

Трибологічний стан системи при граничному режимі мащення визначається процесами на поверхнях розділу тверде тіло — мастильний матеріал — тверде тіло, на які впливають чинники навколишнього середовища. Щоб зрозуміти механізми граничної змащувальної дії, потрібно розглянути фізико-хімічні процеси утворення проміжної захисної плівки між контактними поверхнями,

яка здатна зменшити число безпосередніх взаємодій твердих тіл і характеризується низьким опором зсуву.

#### 4.6.1. Механізми формування граничних змащувальних шарів

Структура граничних змащувальних шарів визначається як фізико-хімічними властивостями молекул, які утворюють плівки, так і станом та природою твердої поверхні. Граничні шари можуть мати різноманітну будову, проходячи всі форми структуризації від твердого кристалічного до рідкого стану. До числа основних типів будови граничних шарів належать пошарові (ламельярні) і решітчасті (ретикулярні) структури. Відомі структури гомогенні, побудовані з тотожних молекул, і гетерогенні. Джерелом ретикулярних структур є поліморфізм органічних молекул при їх адсорбції і молекулярній взаємодії.

Густина покриття поверхні залежить від просторової структури молекул і положення полярної групи. Лінійноланцюгові молекули з полярною групою на кінці ланцюга утворюють більш щільні покриття, ніж стеричнопросторові молекули або молекули з полярною групою всередині ланцюга. Процес насичення адсорбційного шару супроводжується міграцією молекул внаслідок слабкості Ван-дер-Ваальсових сил фізичної адсорбції, що надає змащувальній плівці властивості "самозаліковування" при місцевих пошкодженнях.

Коефіцієнт тертя поверхонь, покритих адсорбованими плівками, зменшується із збільшенням довжини аліфатичних молекул внаслідок підвищення когезійної взаємодії. Ефективність зниження сили тертя парами адсорбованих молекул з однаковою довжиною ланцюга зменшується в ряду: жирні кислоти, ефіри жирних кислот, спирти, вуглеводні. Антифрикційні властивості у ненасичених жирних кислот виражені менш яскраво, ніж у насичених.

Орієнтацію адсорбованих молекул розглядають здебільшого перпендикулярно до поверхні, у вигляді шарів смектичної структури, які утворюють "молекулярний ворс" (рис. 27, а).

Щодо нематичної структури молекул з довгими осями паралельно поверхні (рис. 27, б) у літературі є недостатньо відомостей.

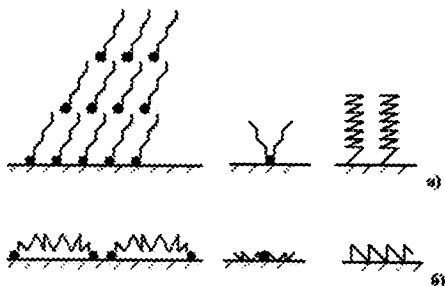


Рис. 27. Схема розташування адсорбованих молекул на поверхні твердого тіла.

Оскільки утворення плівок відбувається за законами адсорбції, то воно залежить від концентрації полярних речовин у змащувальному матеріалі і температури. Найміцніші адсорбційні шари на металах утворюють поверхнево-активні речовини (ПАР): жирні кислоти, їх спирти та ефіри, тваринні і рослинні жири, аміді, аміни та їх похідні. Незважаючи на те, що мінеральні масла є сумішшю неактивних вуглеводнів, вони завжди забруднені органічними кислотами, смолами та іншими ПАР.

Граничні шари на контактних поверхнях можуть утворюватися із компонентів змащувального масла внаслідок **фізичної адсорбції, хемосорбції або трибохімічних реакцій**.

При **фізичній адсорбції** молекули мастильного матеріалу утримуються на поверхні металу за рахунок Ван-дер-Ваальсових поверхневих сил. Молекули моно— або полімолекулярних шарів за таких умов зв'язані слабо, і утворення плівки характеризується зворотним процесом. Полярні молекули приєднуються переважно у вертикальній орієнтації, наприклад, адсорбовані молекули стеаринової кислоти висотою 1,9 нм (рис. 28). Багато молекул зближуються гранично щільно і зміцнюють плівку поперечними когезійними силами. Ця прилипаюча до поверхні тверда плівка з

молекул, які зчіплюються між собою, здатна протистояти проникненню мікронерівностей і перешкоджати безпосередньому металевому контакту поверхонь тертя.



Рис. 28. Структура полімолекулярних шарів розчину стеаринової кислоти.

Фізичні адсорбційні граничні шари чутливі до температури, оскільки теплота обумовлює десорбцію, порушення орієнтації і плавлення плівки. Їх ефективність виявляється тільки при незначних об'ємних температурах і в умовах незначного тепловиділення при терті, тобто при малих навантаженнях і швидкостях.

Ефективність мастильної дії, крім адсорбційного чинника, залежить від хімічної взаємодії металу і компонентів змащувального матеріалу — **хемосорбції**. В цьому разі протікає хімічна реакція без видалення атома металу із кристалічної решітки.

Відомим прикладом хемосорбції є реакція утворення плівки "металевого мила" між молекулами жирних кислот і оксидом заліза на поверхні металу. Таке металеве мило має не тільки бажані властивості міцності на зріз, але і характеризуються вищими температурами плавлення порівняно з чистими жирними кислотами. Наприклад, температура плавлення стеаринової кислоти складає  $69^{\circ}\text{C}$ , а її металеве мило  $\sim 120^{\circ}\text{C}$ .

Граничні хемосорбційні шари забезпечують ефективну змащувальну дію при помірних навантаженнях, температурах і швидкостях, але втрачають свої властивості в тяжких умовах експлуатації внаслідок десорбції або плавлення плівки при

сумісній дії робочих чинників і підвищеного тепловиділення в зоні контакту.

Якщо між атомами металу і молекулами мастильного матеріалу виникає **хімічна реакція**, при якій реалізується обмін валентними електронами і утворюється нова хімічна речовина, то відбувається формування хімічно модифікованих граничних плівок. Більшість хімічно реагуючих речовин містять у молекулах атоми сірки, хлору, фосфору та ін. Вони утворюють на поверхні розділу плівки солей металів із низькою міцністю на зріз, але високою температурою плавлення, такі, як сульфідні, хлоридні, фосфідні та ін. Так, ефективність галогеновмісних сполук виявляється в інтервалі температур 100 – 300°C, сульфідних плівок – до 800°C. Слід зазначити, що коефіцієнт тертя сульфідних плівок вищий за коефіцієнти тертя плівок із галогеновмісних сполук внаслідок їх вищого опору зсуву.

Хімічно модифіковані граничні шари ефективні при високих навантаженнях, температурах і швидкостях. Такі умови звичайно називають "передумовами до схоплювання", але найбільшу небезпеку серед них представляють високі температури.

Антифрикційні властивості розглянутих граничних шарів представлені на рис. 29.

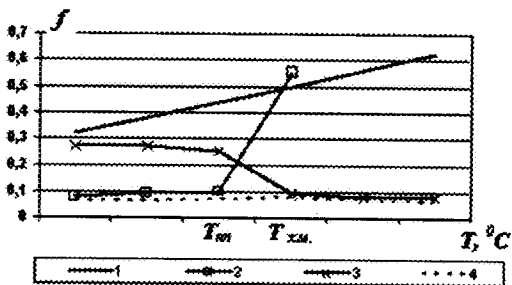


Рис. 29. Залежність коефіцієнта тертя триботехнічної пари при граничному мащенні від температури.

Крива 1 побудована для контактних поверхонь, змащених чистими базовими мінеральними або синтетичними маслами. Вона

показує, що первинні значення коефіцієнта тертя достатньо високі і в міру збільшення температури при напрацюванні цей параметр підвищується, оскільки слабкі адсорбційні зв'язки між компонентами масел і металевою поверхнею розриваються.

Крива 2 відноситься до розчину жирної кислоти в базовому маслі. До температури плавлення металевого мила  $T_{пл}$  коефіцієнт тертя низький, але при зростанні температури, яка призводить до дезорієнтації граничної плівки, він різко зростає.

Крива 3 характерна для протизадірної присадки, розчиненої в базовому маслі, ефективність дії якої виявляється тільки вище температури хімічної реакції  $T_{х.р.}$ , при якій формуються хімічно-модифіковані шари.

Крива 4 — гіпотетична крива при ефективній комбінації варіантів 2 і 3: надійне мащення контактних поверхонь до температури  $T_{пл}$  забезпечується жирною кислотою, а вище цієї температури ефективна змащувальна дія забезпечується протизадірною присадкою.

Крім розглянутих видів граничних шарів, мастильна дія мінеральних і синтетичних масел характеризується виникненням особливого процесу генерації органічного продукту, що відкладається на контактних поверхнях у вигляді твердоподібних плівок (рис. 30).

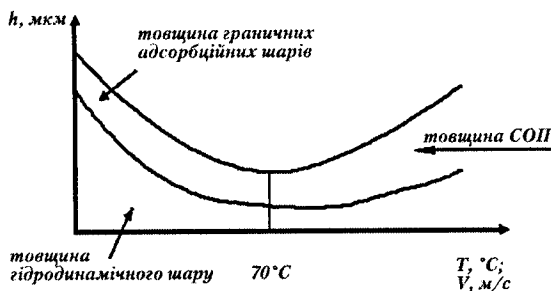


Рис. 30. Структура змащувального шару ( $h$ ) базових масел в функції швидкості ( $V$ ) та температури ( $T$ ).

Утворення **самогенеруючих органічних плівок (СОП)** є механо-хімічним окислювально-полімеризаційним процесом за участю



кисню повітря при каталітичній дії активованого тертям металу. Механізм утворення СОП полягає у взаємодії макрорадикалів молекул масла з ювенільною поверхнею металу. СОП є високоякісним змащувальним матеріалом, що характеризується антифрикційними властивостями і протизношувальною ефективністю, які протидіють втомному зношуванню. СОП не втрачають ефективності в найважчих умовах тертя — при високих температурах і низьких швидкостях, де ні гідродинамічні, ні структуровані шари, ні мила не здатні забезпечити стабільну мастильну дію.

У міру формування і адаптації граничних шарів у процесі напруження в особливих умовах впливу твердої фази якісно змінюються реологічні характеристики змащувального матеріалу. В змащувальному шарі відбуваються складні молекулярні і надмолекулярні зміни, що призводять до структуризації вуглеводневих компонентів масла і переходу у нев'язкий структурований стан, характерний неньютонівським рідинам. А.С. Ахматов характеризує ці зміни як такі, що набувають "структурної в'язкості" асоційованих речовин напівколоїдного типу під дією поверхні металу. Утворені граничні шари характеризуються анізотропними властивостями: в тангенціальному напрямі молекулярні шари легко згинаються, та при товщині шару, яка перевищує деяке критичне значення, ковзають один відносно іншого, а по нормалі до твердої поверхні гранична плівка характеризується високим опором стиску, її несуча здатність обчислюється тисячами кілограмів на квадратний сантиметр. Квазікристалічні шари анізотропні в широкому інтервалі тиску і температур, що зумовлює їх високу несучу здатність і поліпшення антифрикційних та протизношувальних властивостей у контакті.

*Механізм граничного тертя* можна представити в такому вигляді. Під дією нормального навантаження граничний шар зазнає пружних деформацій. За певних умов можлива пружна і пластична деформація мікровиступів контактних поверхонь і їх взаємне втілення, що не супроводжується руйнуванням адсорбованого номолекулярного шару (рис. 31, 1).

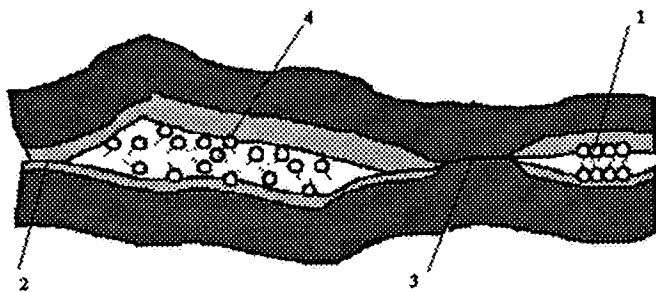


Рис. 31. Схема контакту поверхонь твердих тіл при граничному режимі мащення.

На окремих, найбільш навантажених ділянках контакту, а також у зонах локального нагрівання поверхонь можливе порушення суцільності граничного шару і виникнення адгезійної взаємодії між окисними плівками елементів трибоспряження (рис. 31, 2). На ділянках максимально навантажених мікронерівностей можливе руйнування не тільки адсорбційної, але й окисної плівки, що призводить до виникнення ювенільних поверхонь та зумовлює їх схоплювання (рис. 31, 3). Найменш навантажені мікронерівності контактних поверхонь розділені полімолекулярним граничним шаром мастильного матеріалу (рис. 31, 4). Загальний опір відносному переміщенню тіл тертя складається з опору зрушенню мономолекулярного граничного шару, окисних плівок, ділянок схоплювання, полімолекулярного шару і опору деформованого матеріалу переміщенню втілених у його об'єм мікронерівностей контртіла.

#### 4.6.2. Структурні зміни поверхневих шарів металу при терті

Тертя є дисипативним процесом, у якому основна частина роботи зовнішніх сил витрачається на поглинання енергії матеріалом поверхневих шарів і утворення теплоти. Процес дисипації реалізується пружно — пластичною деформацією поверхневих шарів металів.

Протікання *процесу мікропластичної деформації* в поверхневих шарах характеризується такими формами:

- у напрямку руху контактних пар у поверхневих шарах (100 — 1000 А) відбувається інтенсивна і направлена пластична деформація, що призводить до аморфізації поверхневих шарів металу;
- прояв бар'єрного ефекту поверхні — утворення "derbis-шару" з підвищеною густиною дислокацій, який перешкоджає виходу площин ковзання на поверхню і гальмує розвиток об'ємної деформації;
- у нижчерозташованих шарах (до 100 мкм) має місце хвильовий процес розповсюдження пружних деформації, пов'язаний із відносним переміщенням поверхонь.

Пластична деформація, з погляду теорії недосконалих кристалів, є рухом, розмноженням і розрядкою дислокацій. Вона має подвійний характер, який обумовлюється двома процесами — зміцненням і розміцненням. Структурні зміни відбуваються, в основному, в найтонших поверхневих шарах, де пластична деформація максимальна. Пластична деформація істотно збільшує фізико-хімічну активність поверхневих шарів металу, від якої залежать будова і властивості граничних плівок, кінетика фізичної і хімічної адсорбції.

За наявності в змащувальному матеріалі ПАР виявляються ефекти Ребіндера.

**Зовнішній ефект Ребіндера.** Елементарні структурні складові твердого тіла (атоми, молекули), які розташовані всередині об'єму, взаємодіють з оточуючими частками у всіх напрямках. Результуюча цих сил взаємодії наближається до нуля, що відповідає мінімуму потенційної енергії. Поверхневі частки твердого тіла внаслідок некомпенсованих зв'язків характеризуються надлишковою енергією, що зумовлює їх взаємодію з молекулами навколишнього середовища або з атомами (молекулами) контртіла.

При адсорбції ПАР вільна енергія твердого тіла зменшується. При цьому знижується опір поверхневого шару твердого тіла пластичному деформуванню, полегшується пластичний зсув у зернах та вихід дислокацій на поверхню. Верхній шар металу може мати меншу мікротвердість, ніж нижчерозташовані, насичені дислокаціями шари, а також більш низьку межу текучості та коефіцієнт зміцнення. Деформований у присутності ПАР поверхневий шар

металу характеризується більш дрібною зернистою структурою. Це *явище адсорбційної пластифікації твердих тіл під дією поверхнево-активних речовин називається зовнішнім ефектом Ребіндера*. Товщина пластифікованого шару становить орієнтовно 0,1 мкм. На відміну від хімічного модифікування поверхні, ефект Ребіндера має вияв при одночасній дії середовища (ПАР) та механічних навантажень, а при видаленні ПАР адсорбційне пластифікування поверхні не виявляється.

*Внутрішній ефект Ребіндера (адсорбційно-розклинюючий) — це явище адсорбційного пониження міцності* (виникнення крихкого руйнування при низьких напругах аж до самовільного диспергування). Реалізується при дифузії активних компонентів мастильного матеріалу до вершин новоутворених тріщин, коли активні центри молекул досягають ділянки, розмір якої менше двох розмірів молекул, останні розклинують її (рис. 32). При цьому тиск на стінки у вершині тріщини досягає 10 МПа, що зумовлює розрихлення кристалічної решітки металу в цих місцях та ініціює подальший розвиток тріщини. За таких умов знижується опір матеріалу втомному руйнуванню.

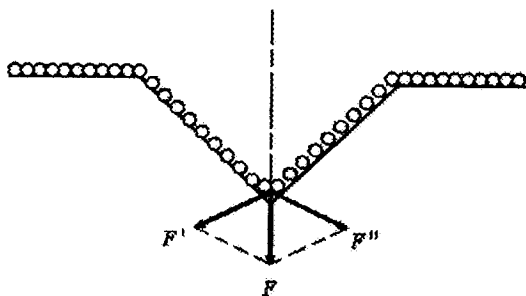


Рис. 32. Схема розклинюючої дії активних компонентів мастильного матеріалу.

Полімолекулярні шари, чинячи опір потоншенню, виявляють розклинюючу дію (ефект Дерягіна). Розклинюючий тиск залежить від природи ПАР і поверхні твердого тіла. У розчинів жирних кислот товщина граничного шару і міцність розклинюючої дії — лінійна функція вуглеводневого радикала.

## 5. ЗНОШУВАННЯ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ

### 5.1. Основні поняття та закономірності зношування

**Зношування** — це процес відділення матеріалу з поверхні твердого тіла при терті та (або) збільшення залишкової деформації, що супроводжується поступовою зміною розмірів цього тіла.

**Знос** — це зміна розмірів та форми твердого тіла внаслідок зношування. Абсолютний знос — це знос, виражений в одиницях довжини, об'єму або ваги. **Лінійний знос** ( $\Delta h$ ) — знос, який визначається зміною розміру по нормалі до поверхні тертя. **Об'ємний знос** ( $\Delta V$ ) — знос, який визначається зміною об'єму. **Ваговий знос** ( $\Delta m$ ) — знос, який визначається зміною ваги. Місцевий знос — лінійний знос на окремій ділянці поверхні тертя.

Кількісними характеристиками зношування є інтенсивність та швидкість зношування.

**Інтенсивність зношування** ( $I$ ) — відношення абсолютного зносу деталі (або випробовуваного зразка) до пройденого шляху тертя.

Лінійна інтенсивність зношування — це товщина зношеного шару  $\Delta h$ , яка приходить на одиницю шляху тертя:

$$I_h = \Delta h / L.$$

Величина  $I_h$  є безрозмірною, у більшості випадків інтенсивність зношування реальних тіл  $I_h = 10^{-3} - 10^{-13}$ .

Вагова інтенсивність зношування — це вага речовини, яка видаляється з поверхні зношеного тіла за одиницю шляху тертя:

$$I_m = \Delta m / L.$$

Об'ємна інтенсивність зношування — це об'єм матеріалу, зношеного за одиницю шляху тертя:

$$I_V = \Delta V/L.$$

При визначенні інтенсивності зношування може виявитися доцільнішим відносити абсолютний знос не до шляху тертя деталі, а до іншого вимірника, загального для всіх вузлів і агрегатів даної машини. Так, наприклад, таким вимірником для автомобілів може бути прийнято кількість кілометрів пробігу, а для тракторів — кількість гектарів оранки.

**Швидкість зношування** ( $i$ ) — відношення абсолютного зносу деталі (або випробовуваного зразка) до часу, протягом якого відбувалося випробування. Розрізняють лінійну ( $i_h$ ), об'ємну ( $i_V$ ) та вагову ( $i_m$ ) швидкості зношування:

$$i_h = \Delta h/\Delta t; i_V = \Delta V/\Delta t; i_m = \Delta m/\Delta t.$$

**Зносостійкість** ( $\epsilon_I$ ) — властивість деталі, матеріалу або спряжених деталей чинити опір зносу в певних умовах експлуатації або випробувань. Зносостійкість пар тертя визначають величиною, оберненою до інтенсивності зношування, тому зносостійкість реальних вузлів тертя може приймати значення від  $10^3$  до  $10^{13}$ .

Граничним зносом деталі (вузла) називається знос, при якому подальша експлуатація стає неможливою внаслідок виходу деталі (вузла) з ладу, неекономічною або неприпустимою внаслідок зниження надійності механізму.

### 5.1.1. Стадії зносу триботехнічних пар

Якщо відкласти по осі абсцис час  $t$  роботи пари тертя (рис. 33), а по осі ординат — який-небудь з вимірників зносу  $U$  (втрата ваги або зменшення лінійного розміру), то одержимо криву зносу деталі

в часі. Тангенс кута  $\alpha$ , утвореного віссю абсцис і дотичною до кривої в довільній її точці, визначає швидкість зносу в даний момент часу.

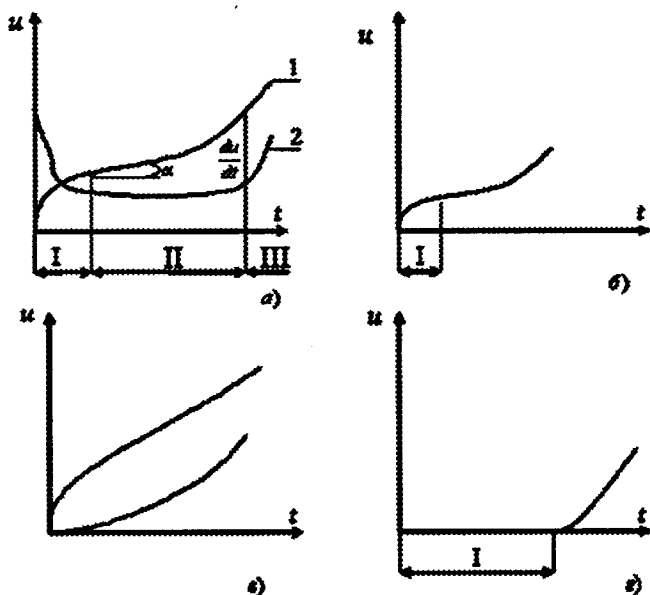


Рис. 33. Схеми зносу контактних поверхонь при різних режимах експлуатації.

На кривій зносу загалом (крива 1, рис. 33, а) виділяються три ділянки, що відповідають трьом стадіям зносу. Перша стадія (I) — це початковий знос, який спостерігається при припрацюванні. Деталі після збирання сполучаються по мікрориступах шорсткості на вершинах хвиль, і площа фактичного дотику в початковий період мінімальна, тому при навантаженні діє великий питомий тиск, результатом чого є значна пластична деформація; нерівності частково зминаються і руйнуються як по вершинах, так і по впадинах. Спрацьовування шорсткості і

згладжування макронерівностей і хвилястості супроводжується збільшенням несучої поверхні, інтенсивність зносу знижується. Разом з тим “проорювання” взаємно утвореними об’ємами і продуктами зносу у напрямі відносної швидкості створює нові шорсткості, які орієнтовані уздовж напрямку руху і не співпадають з напрямом ризок при початковій обробці поверхонь. Після певного часу напрацювання і за незмінних умов роботи створюється стабільна шорсткість. Ця нова шорсткість може бути більшою або меншою за початкову: грубіші поверхні в процесі припрацювання стають чистішими, а більш чисто оброблені — грубішими. Кожна з поверхонь, що сполучаються, до кінця припрацювання набуває властивої їй шорсткості за даних умов тертя.

Мікротвердість поверхонь тертя до кінця припрацювання стає також визначеною, не залежною від початкового стану поверхонь. Таким чином, у період припрацювання відбувається переформовування поверхні та зміна її фізико-хімічних властивостей.

Друга стадія (II), представлена на кривій прямолінійною ділянкою, є режимом сталого зносу  $tga = const$ , характерного при нормальній експлуатації пар тертя. Процес сталого зносу характеризується деформацією, руйнуванням і безперервним відтворенням на окремих ділянках нового поверхневого шару із стабільними властивостями. При зношуванні деталей у процесі сталого періоду можуть істотно змінюватися властивості елементів трибоспряження. Так, збільшення зазорів у зчленуваннях погіршує умови рідинного мащення і може підвищити чинник динамічності, а стирання цементованих або поверхневозагартованих шарів призводить до відкриття поверхні із зниженою зносостійкістю. Зміни в макрогеометрії поверхонь, наприклад, утворення овальності і конусності шийок валів і циліндрів, місцеве спрацьовування ділянок, нерівномірний знос зубців коліс за довжиною і под., є також причинами, які погіршують умови тертя. Ці та аналогічні їм обставини можуть



викликати при подальшій роботі трибоспряження знос зростаючої інтенсивності. Знос набуває катастрофічного характеру для нормального функціонування елементів сполучення, що характерно для третьої стадії (III).

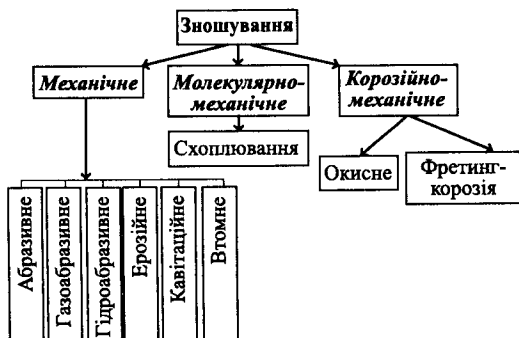
Крива 2 на рис. 33, *a* відображає швидкість зносу.

Особливо часті випадки кривих зносу представлені на рис. 33, *б–г*. Крива на рис. 33, *б* відповідає ситуації, коли після закінчення припрацювання поступово накопичуються чинники, які прискорюють знос, через що відсутній сталий період. Криві на рис. 33, *в* представляють випадки, коли відсутнє припрацювання і період нормальної експлуатації настає відразу з початку роботи. Криві розрізняються залежностями зміни швидкості зносу від часу. Ці закономірності зносу характерні для інструменту і робочих ділянок машин — наприклад, знос різця по задній грані або леза лемеша плуга по ширині задньої фаски. Проте і деякі елементи машин можуть зношуватися так само, наприклад, деякі ланцюгові передачі сільськогосподарських машин. Крива на рис. 33, *г* відноситься до зносу деталей, які знаходяться під дією високих контактних напруг, причому ці деталі працюють тривалий час практично без стирання. Такі умови роботи призводять до втомного викрошування поверхневих шарів, що посилюється дією продуктів зносу.

### **5.1.2. Класифікація видів зношування контактних поверхонь**

Зношування контактних поверхонь слід розглядати як підсумковий результат одночасного протікання елементарних актів руйнування та зміни властивостей матеріалу, природа яких різноманітна. Це визначає різноманітність видів зношування на ділянках контактних поверхонь у певний проміжок часу. Однак для кожної пари тертя при певних експлуатаційних режимах характерний домінуючий вид зносу, який визначає інтенсивність зношування контактуючих пар. Поруч із провідним існують і супутні види зношування.

Згідно із загальноприйнятою класифікацією, всі види зношування можна розділити на три групи: механічний, молекулярно-механічний та корозійно-механічний.



Перша група об'єднує види зношування, які є наслідком руйнування поверхневого шару твердого тіла при багатократних деформаціях цього шару.

Друга група видів зношування характеризує адгезійні процеси на ділянках фактичного дотику, утворення ділянок схоплювання, які руйнуються під дією тангенціальної сили.

Третя група включає види зношування, для реалізації яких необхідна наявність хімічних процесів, що ініціюються імпульсною, тепловою та механічною дією на матеріал контактних поверхонь.

## 5.2. Абразивне зношування

**Абразивне зношування** — це видалення з поверхні тертя матеріалу або його пластичне деформування під дією твердих часток, що супроводжується зміною лінійних розмірів деталі.

**Абразивне зношування закріпленими частками** спостерігається у двигунах внутрішнього згоряння (циліндр — поршневе кільце), при обробці матеріалів абразивним інструментом та ін. При абразивному зношуванні металів твердими закріпленими частками можлива одночасна реалізація двох механізмів руйнування (рис. 34):

— **мікрорізання** — спостерігається при однократному навантаженні з утворенням стружки перед часткою. На поверхні тертя виникають канавки, орієнтовані вздовж вектора швидкості ковзання. Цей механізм характерний при зношуванні крихких матеріалів;

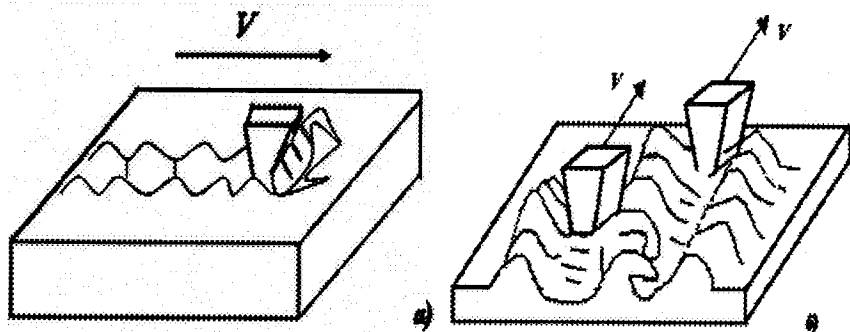


Рис. 34. Абразивне зношування твердого тіла внаслідок мікрорізання (а) та пластичного деформування (б).

— **багатократне пластичне деформування**. При першому проході втіленої частки матеріал видавлюється із зони контакту, утворюючи виступи на краях канавки. Абразивна частка при другому проходженні по найближчій траєкторії до виступів відтісняє пластично деформований матеріал назад, заповнюючи об'єм канавки. Багатократне передеформування матеріалу при наступних проходженнях частки призводить до втомленості та видалення цього матеріалу з поверхні. Поверхня металу при абразивному зношуванні покривається багатьма паралельно розташованими канавками, в окремих випадках дно канавки покривається мікротріщинами, які перпендикулярні до вектора швидкості.

Інтенсивність абразивного зношування залежить від низки факторів. Найбільш суттєвими з них є номінальний тиск ( $P_0$ ) та

твердість матеріалу контактних поверхонь ( $HV$ ) (рис. 35):

$$I \sim k(P_0/HV),$$

де  $k$  — коефіцієнт пропорційності.

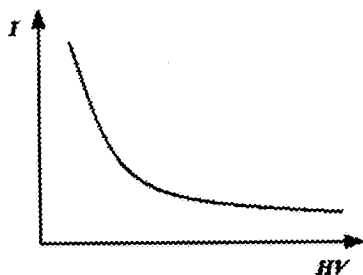


Рис. 35. Залежність інтенсивності абразивного зношування від твердості матеріалу.

Окисні плівки інколи характеризуються вищою твердістю, ніж чистий метал. Із представленої діаграми твердості технічно чистих металів та їх окислів за шкалою Мооса видно, що найбільшу твердість, рівну 9, має окисел алюмінію  $Al_2O_3$ , а твердість алюмінію — 2 (рис. 36). Унаслідок цього при терті алюмінію по сталі його окисні плівки, а також продукти руйнування цих плівок, можуть привести до сильного зносу навіть найтвердіших сталей. Чистий абразивний знос характерний для пар: хромована сталь — алюмінієві сплави.

**Абразивне зношування твердими частками.** Механізм зношування контактних поверхонь при наявності в зоні контакту вільного абразиву (частин зносу, оксидів, нагару, пилу), залежить від співвідношення твердості поверхонь контактуючих пар та твердості абразиву, а також від навантаження. Критерій оцінки переходу від мікрорізання до багатоциклового деформування:

$$k_T = HV/HV_a;$$

при  $k_T < 0,5$  — можливо мікрорізання; при  $k_T > 0,7$  — деформування.

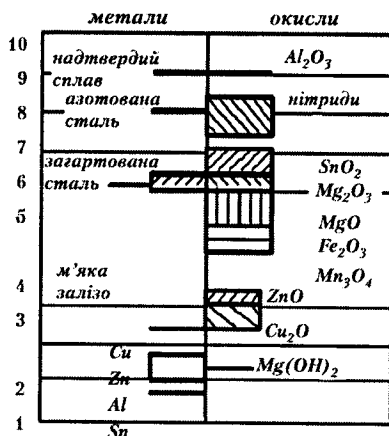


Рис. 36. Діаграма твердості технічно чистих металів та їх окислів за шкалою Мооса.

Втілена частка при її русі відносно поверхні може спричинити подряпину або зрізати мікроскопічну стружку. Різання можливе тільки за умови певного співвідношення глибини проникнення абразиву до радіусу втіленої частки. Так, для Ст 3 це співвідношення —  $h/R > 0,16$ .

При попаданні в зазори пар тертя абразивних часток останні можуть брати участь у сприйнятті прикладеного навантаження та залежно від умов впресовуватися в поверхні контактуючих пар, роздавлюватися на більш дрібні частки, ковзати по поверхні, пружно чи пластично деформуватися.

Абразивні частки можуть потрапляти в робочі порожнини машин та на поверхні тертя з повітря, з мастильним матеріалом та ін. З абразивних часток, які потрапляють з повітря, найбільший знос здійснюють частки кварцу. Ці частки розміром від 1 до 30 мкм можуть тривалий час знаходитися в повітрі. Повітряні фільтри на двигунах автомобілів можуть затримувати тільки великі частки пилу, дрібні частки розміром декілька мікрон потрапляють у двигун з повітрям. Очищувальна здатність фільтрів

становить 98–99%. При експлуатації автомобілів у запиленому повітрі 0,5–1,0 г/м<sup>3</sup> з кожним кубометром повітря потрапляє в циліндри від 5 до 20 мг пилу. Значна їх частка видаляється з відпрацьованими газами. Решта осідає на стінки циліндра, інтенсифікуючи знос циліндро-поршневої групи, проникає в картер та розноситься маслом по всій масляній системі, призводячи до зносу інших пар тертя, особливо шийки колінчастого валу. Найбільшому абразивному зносу піддаються циліндри та поршневі кільця.

При потраплянні абразивних часток в підшипники з м'яким антифрикційним шаром ці частки впресовуються в заливку та підвищують знос вала. При товстому шарі бабітової заливки потраплення абразивних часток у підшипник не зумовлює серйозних відхилень від його нормальної роботи.

Абразивні частки несуттєво впливають на знос гумових підшипників. Пружність гуми не дає змоги абразивній частці створити високу контактну напругу, при якій реалізовувалося б шліфування поверхні сталюого вала, вона може тільки полірувати його.

### 5.3. Втомне зношування

**Втомне зношування** (пітінг для пар кочення) — це процес руйнування поверхні твердого тіла, зумовлений циклічною зміною деформації поверхневого шару, при цьому амплітудне значення напруг не перевищує межу міцності матеріалу.

Цьому виду зносу піддаються підшипники кочення і ковзання, шийки колінчастих валів, кулачкові механізми, зубчасті передачі, гальмівні диски.

Проявляється цей вид руйнування у вигляді раковин, віспин, які утворюються внаслідок розвитку у поверхневому шарі тріщин, що призводять до викришування матеріалу.

Існує дві ділянки зародження тріщин: на поверхні (у зв'язку з концентрацією напруг на поверхнях нерівностей) та у

підповерхневому шарі на глибині локалізації максимальних дотичних напруг.

Кінетика втомного зношування металів та утворення часток зносу включає такі стадії (рис. 37):

- структура фрикційного контакту складається із вторинних структур, підповерхневих шарів та матеріалу основи;
- при терті вторинні структури підлягають в'язкопластичній деформації та мікроруїнуванню;
- поверхневі шари металу зазнають пружнопластичні деформації. Вони є джерелом надходження речовини у вторинні структури;
- мікротріщини зароджуються на дефектах структури різної природи та масштабу.

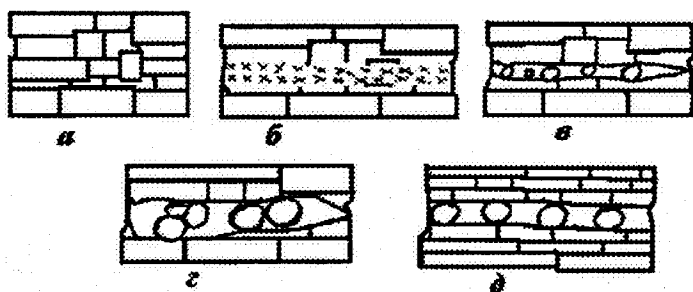


Рис. 37. Схема утворення часток зносу при втомному зношуванні металів. а) – стадія пластичного деформування; б) – розрив матеріалу; в) – відділення часток; г) – пластичне зміцнення; д) – розрив утворених часток.

Перша стадія – інкубаційна, характеризує період накопичення дефектів кристалічної решітки в окремих мікротріщинах. Дефекти локалізуються в перенапружених кристалічних зернах, особливо на межі зерен. На другій стадії спостерігається мікроковзання (пластичний зсув). При багатократному навантаженні відбувається циклічний знакозмінний зсув, який призводить до утворення

розрихленого шару, в якому зароджуються пори та мікротріщини. Третя стадія — це ріст тріщин до критичних розмірів унаслідок концентрації напруг в їх вершинах або розміцнення матеріалу (внутрішній та зовнішній ефекти Ребіндера, ефект Дерягіна). Четверта стадія — викришування матеріалу, зумовлене утворенням тріщини.

**Втомне руйнування поверхонь кочення.** Розрізняють початкове, обмежене та прогресуюче викришування.

Початкове викришування характерне для початкової стадії на найбільш напружених ділянках дотику в період припрацювання. Згодом воно припиняється, а утворені на поверхні раковини заповнюються пластичнодеформованим металом. Завдяки цьому процесу відбувається самозаліковування найбільш зношених зон, утворених у початковий період напруцювання, і розподіл контактних напруг стає більш рівномірним.

Обмежене викришування — це руйнування більших ділянок поверхні, які є зонами концентрації напруг (вершини хвиль).

Прогресуюче викришування не припиняється протягом всього періоду навантаження тіл кочення при експлуатації.

Опір тіл кочення втомленості характеризується залежністю числа циклів навантаження до їх руйнування від контактної напруги (рис. 38):

I — період можливої втомленості;

II — період обмеженої межі витривалості в пружній зоні;

III — межа витривалості.

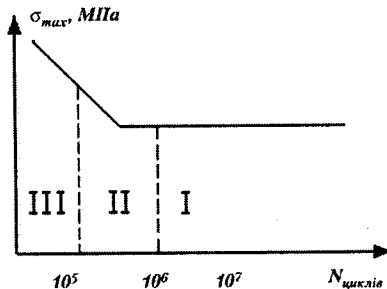


Рис. 38. Крива втомного руйнування металів.



Швидкість втомного руйнування залежить від співвідношення швидкостей кочення контактуючих тіл. При коченні з проковзуванням випереджаюча поверхня має на 30–100 % більшу межу витривалості, ніж відстаюча. Т.К. Трубін запропонував пояснення, згідно з яким сили тертя в контакті на випереджаючій поверхні направлені проти, а на відстаючій — за швидкістю кочення (рис. 39).

Розкрита тріщина відстаючої поверхні розвивається назустріч напрямку руху. Масло з великою швидкістю надходить у тріщину і закриває її. Надалі тріщина закривається випереджаючою поверхнею і тиск на її стінки ще більше зростає. На випереджаючій поверхні гідродинамічний тиск у шарі мастильного матеріалу видавлює масло з тріщини. За вказаних умов на випереджаючій поверхні пітинг розвивається значно менше.

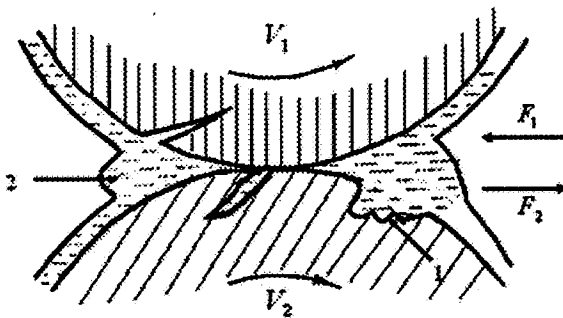


Рис. 39. Схема контакту поверхонь в умовах кочення з проковзуванням.  $V_1$ ,  $F_1$  — швидкість та сила тертя випереджаючої поверхні;  $V_2$ ,  $F_2$  — швидкість та сила тертя відстаючої поверхні, 1 — утворення раковини; 2 — мастильний матеріал.

#### 5.4. Молекулярно-механічне (адгезійне) зношування

**Молекулярно-механічне зношування** — це процес утворення міцних з'єднань у зонах фактичного дотику контактних поверхонь,

глибинного вириву матеріалу одного тіла та переносу на поверхню тертя іншого, що супроводжується зміною їх розмірів.

Цей вид зносу характерний для зубчастих передач, зубчато-гвинтових передач, важконавантажених підшипників ковзання, підшипників кочення, пар тертя циліндр — поршневе кільце, для вузлів тертя, які експлуатуються у вакуумі та при високій температурі.

Молекулярно-механічне зношування є результатом руйнування адгезійних зв'язків, які виникають між контактуючими парами на ювенільних ділянках поверхонь. Тому для реалізації цього виду зношування необхідно в першу чергу видалення плівок із поверхонь. При терті цей процес відбувається при тепловій та механічній дії.

Підвищення температури на ділянках фактичного дотику сприяє десорбції адсорбованих плівок газу і мастильних речовин та полегшує їх руйнування при механічній дії. При цьому на поверхнях металів можлива інтенсифікація процесу окислення. Окисні плівки руйнуються під дією нормальних та дотичних напруг. Швидкість їх руйнування визначається не тільки рівнем зовнішнього механічного навантаження, але й співвідношенням опору деформованої плівки та металу. Якщо твердість оксиду вища за твердість металу, то основний метал, який піддається пластичному деформуванню, зумовлює його ламке руйнування. В місцях розриву метал виходить на поверхню, що прискорює утворення адгезійних з'єднань із спряженою поверхнею. Якщо твердість плівки оксиду нижча за твердість металу, то її руйнування слабне, вона розкочується по поверхні та значно знижує ймовірність утворення ювенільних поверхонь та адгезійних з'єднань.

За Боуденом, характер розриву ділянок схоплювання чи адгезії зводиться до чотирьох можливих випадків:

1. Міцність зв'язку менша за міцність металів пари тертя — зріз відбувається по зв'язку. Кількість металу, що видаляється з поверхонь тертя, незначна, хоч можна спостерігати підвищення коефіцієнта тертя.

2. З'єднання міцніше, ніж один із металів. Зріз відбувається у товщі менш міцного металу, при цьому його частки будуть налипати на більш тверду поверхню. З часом на твердій поверхні утворюється плівка з більш м'якого металу, ковзання відбувається між однаковими металами.

3. З'єднання міцніше, ніж обидва метали. Основна кількість розривів спостерігається у товщі менш міцного металу, але можливий вирив і більш міцного металу.

4. Взаємодія однакових металів. Теоретично міцність з'єднання та основного матеріалу повинні бути однаковими. Однак у металі в процесі тертя відбуваються такі процеси, як наклеп і рекристалізація, тому міцність з'єднань змінюється.

Схоплювання матеріалів виявляється в різних формах — від субмікроскопічних пошкоджень, локального руйнування поверхневого шару до глибинного вириву, що призводить до катастрофічного руйнування.

Схоплювання можна розглядати як процес миттєвого утворення і руйнування металевих зв'язків мікроділянок у процесі тертя. При цьому відбувається руйнування мікровиступів з відділенням частинок або налипанням їх на поверхні тертя. Згідно з класифікацією Б.І. Костецького, при "сухому" терті для контактних поверхонь характерні **зноси схоплюванням першого і другого роду**. Знос схоплюванням другого типу відрізняється від зносу схоплюванням першого типу переважним впливом теплового ефекту, нагріванням зони тертя до температур розм'якшення металу. Поверхні тертя, що піддавалися зносу схоплюванням першого типу, являють собою хаотичне скупчення впадин, виступів, борозен, слідів текучості і налипання металу. В результаті процесів схоплювання другого типу поверхня тертя виходить шорсткою з відносно плавними переходами і слідами оплавлення за наявності кольорів побежалості. Цей процес супроводжується рекристалізацією, відпалом та загартовуванням металу. Наприклад, при  $T = 400^{\circ}\text{C}$  кобальт з гексагональною кристалічною решіткою перетворюється в модифікацію з об'ємно-

центрованою кубічною решіткою. При цьому активність металу різко підвищується, зростають кількість та розміри адгезійних ділянок схоплювання, спостерігається перехід до заїдання, який характеризується стрімким збільшенням коефіцієнта тертя (рис. 40). Знаходячись у стані локального розплавлення, з'єднані поверхні легко утворюють міцні адгезійні з'єднання, що і зумовлює значення  $f$ , який перевищує одиницю.

Г.В. Виноградовим було доведено, що явища, аналогічні процесам схоплювання першого і другого типів, мають місце не тільки при "сухому" терті, але і при терті з використанням мастильних матеріалів. Ці явища були виявлені при дослідженні важких режимів граничного мащення сталі по сталі при зміні швидкості ковзання від 1 м/с і нижче і одержали назву процесів відповідно "холодного" і "гарячого" заїдання.

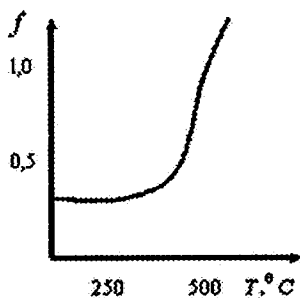


Рис. 40. Вплив температури на коефіцієнт тертя кобальту по кобальту у вакуумі ( $10^5$  тор).

Обидва ці процеси характеризуються істотним підвищенням коефіцієнтів тертя. Процес гарячого заїдання виникає при середніх і високих швидкостях ковзання і супроводжується різким зростанням температури поверхонь тертя і їх інтенсивним зношуванням. Холодне заїдання, що виникає при низьких швидкостях ( $<0,001$  см/с), не супроводжується помітним збільшенням температури в зоні тертя. Воно характеризується відносно повільним

наростанням сили тертя і, на відміну від зносу схоплюванням першого типу при "сухому" терті, не пов'язано із значним збільшенням інтенсивності зношування.

Розглянемо механізм заїдання на прикладі зубчастих передач. При низьких швидкостях кочення у тихохідних передачах товщина мастильного шару між поверхнями зубців в умовах ЕГД-мащення із збільшенням навантаження зменшується. Можливий перехід до граничного режиму мащення, що супроводжується руйнуванням плівки внаслідок пластичної деформації, металевий контакт поверхонь реалізується без суттєвого підвищення температури. У швидкісних передачах тепло, що утворюється, не відводиться повністю до початку наступного циклу контакту. Температура на контакті поступово зростає, і після того, як вона досягне критичного значення для даного масла, мастильний шар розривається. Заїдання у циліндричних зубчастих колесах виникає здебільшого на вершинах зубців веденого колеса і на поєднаних із ним ніжках ведучого колеса. Це зумовлено руйнуванням мастильного шару пружком зуба при вході в контакт.

При експлуатації машин для якісної оцінки ступеню пошкодження поверхонь користуються спеціальними термінами:

**Натир** — це ділянка поверхні тертя, яка відрізняється за кольором від сусідніх ділянок та піддається впливу найбільших контактних навантажень. Натир може бути дзеркальним внаслідок згладжування та полірування мікронерівностей або утворення рисок у напрямку ковзання чи темного кольору — внаслідок локального підвищення температури та утворення окисних плівок.

**Задир** — це утворення внаслідок схоплювання борозни, яку видно, з відтисненням матеріалу врізнібіч та в напрямку ковзання.

**Заїдання** — це найбільш сильна форма вияву схоплювання, яка характеризується наявністю: широких та глибоких борозен із нерівними краями; виривом металу; направленим пластичним деформуванням; утворенням наростів; можливе також оплавлення

поверхні. Ці чинники можуть призводити до заклинювання деталей.

Інтенсивність молекулярно-механічного зношування збільшується з підвищенням навантаження, швидкості ковзання та температури у зоні тертя, зниженням твердості одного з матеріалів та швидкості відновлення захисних окисних плівок на поверхнях тертя. Із збільшенням навантаження протягом короткого проміжку часу спостерігається перехід до катастрофічного заїдання, що зумовлено підвищенням кількості адгезійних з'єднань між контактуючими поверхнями, тоді як при низьких навантаженнях заїдання не реалізується (рис. 41).

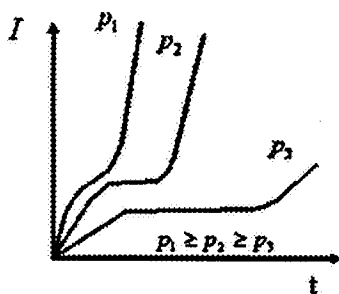


Рис. 41. Вплив навантаження на інтенсивність молекулярно-механічного зношування.

## 5.5. Окисне зношування

**Окисне зношування** — це процес зміни лінійних розмірів контактних поверхонь, зумовлений руйнуванням окисних плівок, які безперервно оновлюються внаслідок взаємодії активного пластичнодеформованого поверхневого шару металу з киснем повітря або мастильного матеріалу.

Цей вид зношування характерний для підшипників кочення, металевих коліс, фрикційних передач, поршневих пальців двигунів, деталей гідравлічних насосів.

Б.І. Костецький поділяє процес окисного зношування на три етапи:

1) деформування та підвищення активності металу. Внаслідок пластичного деформування при терті поверхневий шар насичується дислокаціями та вакансіями, що забезпечує високу активність поверхневого шару та здатність до взаємодії з киснем;

2) утворення вторинних структур. Цей процес відбувається внаслідок взаємодії активних центрів поверхневого шару металу з киснем і появою окисної плівки (рис. 42, а). При цьому можлива поява розчинів кисню та тонких евтектик його з'єднань з металом або утворення хімічних з'єднань кисню з металом (для сталі це  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). У другому випадку міцність з'єднання плівки з металом нижча, ніж у першому. Товщина плівок окислів металів — 10–100 нм;

3) руйнування вторинних структур. Руйнування окисних плівок обумовлене багатократним їх деформуванням при терті, наявністю внутрішніх напруг та великою густиною дефектів структури (рис. 42, б). Унаслідок різниці постійних кристалічної решітки окисний шар зазнає стискаючої напруги, а метал — напруги розтягу. При фрикційному навантаженні окисна плівка відділяється від металу на межі їх розділу на окремих ділянках завдяки появі та росту підповерхневих мікротріщин, розташованих паралельно до поверхні (рис. 42, в).

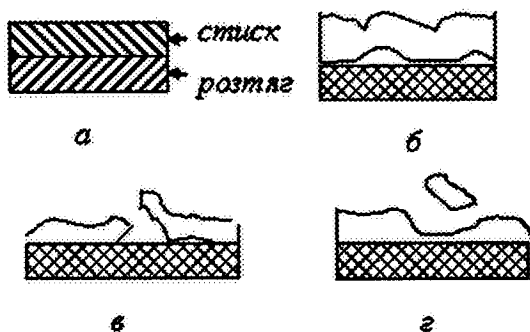


Рис. 42. Кінетика утворення часток зносу при окисному зношуванні.

У міру збільшення кількості циклів навантаження сітка мікротріщин стає більш щільною. Відбувається злиття поверхневих та підповерхневих тріщин, викришування ділянок, видалення їх із зони тертя. На ювенільній поверхні металу одразу утворюється нова окисна плівка (рис. 42, з).

Окисне зношування контактних поверхонь реалізується при нормальних та підвищених температурах при сухому, змішаному та граничному режимах мащення. Інтенсивність зношування може бути суттєвою, але поверхні зберігають низьку шорсткість, оскільки окисні плівки перешкоджають їх схоплюванню. Про існування кореляції між інтенсивністю зношування ( $I$ ) та процесом окислювання свідчать результати впливу навантаження на  $I$  та вміст у продуктах зносу окислів заліза  $Fe_2O_3$  та  $FeO$  (рис. 43).

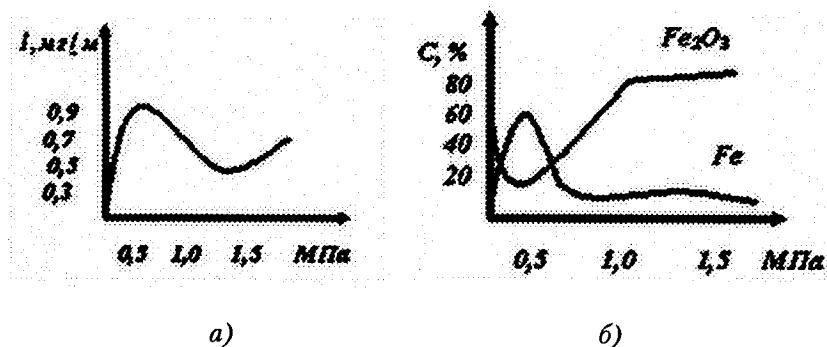


Рис. 43. Вплив тиску на інтенсивність зношування середньовуглецевої сталі (а) та вміст часток зносу (б).

Максимальній інтенсивності зношування відповідає мінімальний вміст в частках зносу  $Fe_2O_3$  і максимальна кількість чистого металу. Це свідчить про суттєвий вплив на  $I$  молекулярно-механічного зношування, яке реалізується на ділянках схоплювання без окисних плівок. Мінімальна інтенсивність зношування спостерігається у випадках, коли товщина плівки  $Fe_2O_3$  достатня для захисту основного металу від схоплювання.



При випробуванні на знос сталі 45 при швидкості ковзання від 1,5 м/с до 10,5 м/с в середовищі інертних газів (аргон, азот), які виключають можливість окислення при терті, спостерігається інтенсивне молекулярно-механічне зношування, зумовлене безперешкодним протіканням схоплювання (рис. 44).

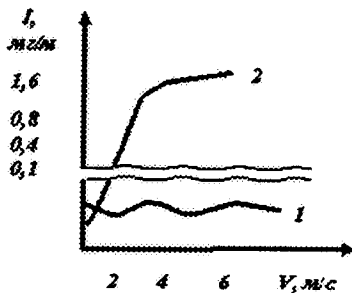


Рис. 44. Інтенсивність зношування Ст 45 в середовищі кисню (1) та аргону (2).

У середовищі кисню, навпаки, спостерігається тільки окисне зношування без ознак схоплювання.

Слід зауважити, що для одних матеріалів пар тертя кисень може відігравати позитивну роль, для інших — негативну. Для металів і сплавів першої групи характерне формування окисних плівок, що підвищують зносостійкість металів, на яких вони утворюються. На металах і сплавах другої групи утворюються крихкі, слабо зчеплені з основою окисні плівки, що знижують зносостійкість основних матеріалів. У разі циклічного руйнування оксидів високої твердості знос матиме характер абразивного, а не окислювального.

## 5.6. Корозійно-механічне зношування

**Корозійно-механічне зношування.** Цей вид зношування включає процес хімічної або електрохімічної взаємодії середовища

з металом, формування модифікованого шару та його втомне руйнування.

За механізмом протікання розрізняють два види корозії — хімічну та електрохімічну, а за умовами протікання — контактну, газову, в електролітах, біокорозію та ін.

Хімічна корозія при терті протікає внаслідок хімічної взаємодії металу з навколишнім середовищем. Тертя активізує хімічну корозію завдяки підвищенню хімічної активності пластичнодеформованого металу та температури на локальних ділянках контакту.

Електрохімічна корозія виявляється при терті в електролітах (морська вода, кислі та лужні розчини, розчини солей). За наявності електроліту між окремими ділянками фрикційного контакту виникає різниця потенціалів. За таких умов тертя представляє собою багатоелектродну систему — набір гальванічних мікроелементів. При терті однорідних металів різниця потенціалів  $\Delta U$  виникає внаслідок деформації окремих ділянок матеріалу.

Корозія у трибомеханічній системі має як позитивні, так і негативні наслідки. При оптимальній швидкості протікання корозійних процесів у зоні контакту на поверхнях тертя поєднаних тіл утворюється модифікований шар та їх зносостійкість підвищується. У випадку підвищення ступеня корозійних процесів на поверхнях тертя утворюються товсті шари продуктів хімічної взаємодії, які легко руйнуються. Це призводить до катастрофічного зносу.

### ***Корозійно-механічне зношування циліндро-поршневої групи двигунів внутрішнього згорання***

Поршневі кільця та гільзи, що виготовляються з чавуну, утворюють між собою та всередині металу за наявності електроліту гальванічні пари внаслідок виникнення різниці потенціалів між структурними складовими чавуну — перлітом, графітом, фосфідною евтектикою. Крім того, нерівномірність температури

зумовлює утворення анодних ділянок у зонах з підвищеною температурою.

Згоряння у циліндрах дизелів палива з підвищеним вмістом сірки призводить до збільшення зносу поршневих кілець і гільз у 3–4 рази. Сірка палива згоряє, утворюючи  $\text{SO}_2$ , а близько 7% її внаслідок каталітичного окислення  $\text{SO}_2$  переходить у сірчаний ангідрид  $\text{SO}_3$ , який з водяними парами продуктів згоряння утворює сірчану кислоту  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Корозійний вплив сірки пов'язаний із конденсацією  $\text{SO}_2$  з продуктів згоряння на стінки циліндра. Деякого зниження зносу можна досягнути підвищенням температури стінок за рахунок регулювання кількості охолоджувальної рідини, але радикальним рішенням є нейтралізація конденсованих на стінках кислот за допомогою введення лужних добавок в масло. Підвищення лужного числа моторного масла має бути оптимальним, оскільки надлишок лугу, який не пішов на нейтралізацію кислих продуктів, стає причиною підвищення хімічної активності. Крім того, підвищення лужного числа масла, яке досягається за рахунок збільшення кількості в ньому металовмісних детергентів, інтенсифікує абразивне зношування (рис. 45).

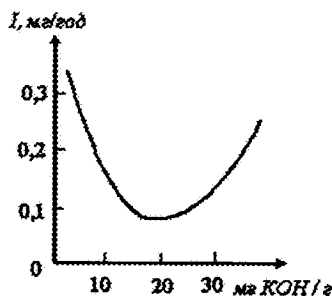


Рис. 45. Вплив лужного числа моторного масла на знос поршневих кілець.

Корозійний чинник може стати домінуючим при зносі двигунів внутрішнього згоряння незалежно від робочого процесу в них. Наприклад, при згорянні бензину, крім водяної пари, утворюються

двоокис вуглецю, невелика кількість окислів сірки, окисел азоту (наслідок окислення бензину при високій температурі згорання робочої суміші) і сполуки бромів або хлору, що виділяються з тетраетилсвинцю, який входить до складу палива як антидетонатор.

При взаємодії цих сполук із водяними парами утворюються кислоти — вугільна, сірчата, сірчана, азотиста, азотна, бромистоводнева і соляна, які в основному виносяться з циліндра з вихлопними газами. Проте при зниженні температури стінок циліндра кислоти легко конденсуються, сприяючи підвищенню зносу стінок і поршневих кілець, корозії поршня і поршневого пальця. Випробування двигуна без регулювання температури в системі охолодження і такого ж двигуна зі встановленим термостатом показали, що знос другого склав  $1/3$ — $1/4$  від зносу першого.

Різка підвищення зносу циліндро-поршневої групи ДВЗ установлене при використанні спиртового палива, наприклад, метанолу, особливо в чистому вигляді (рис. 46).

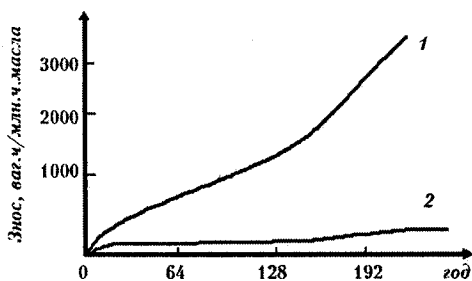


Рис. 46. Рівень протизношувальних властивостей моторних масел. 1 — паливо — метанол; 2 — паливо — бензин.

Причому найбільша інтенсивність зношування характерна для низькотемпературного режиму роботи двигуна. Підвищення зносу в цьому разі пояснюється наявністю в моторному маслі корозійно-активних продуктів (формальдегіду, мурашиної кислоти), а також змиванням спиртовим паливом масляної плівки з поверхонь тертя.

Слід зазначити, що, незважаючи на корозійно-механічний знос, поверхні тертя можуть мати блиск і високий клас чистоти.

### ***Корозія підшипників***

Проблема корозії підшипників виникла після впровадження у швидкісні двигуни внутрішнього згорання антифрикційних свинцевих, мідно-свинцевих та кадмієвих сплавів. Усі антифрикційні сплави якоюсь мірою зазнають корозії під впливом органічних кислот, які знаходяться в маслі або утворюються при окисленні вуглеводневих сполук. Олов'янисті бабіти більш стійкі до корозійних пошкоджень.

Стадії процесу руйнування мідно-свинцевих сплавів такі: поява чорних ділянок, концентрація їх на окремих ділянках поверхні, поява каверн та тріщин. Механізм руйнування цих сплавів представляють так: органічні кислоти із свинцем утворюють свинцеві мила, які вимиваються маслом, унаслідок чого знижується механічна міцність.

### **5.7. Фретинг-корозія**

***Фретинг-корозія*** — це процес руйнування поверхонь тертя при малих циклічних переміщеннях поєднаних поверхонь, що супроводжується зміною їх лінійних розмірів.

Цей вид зношування спостерігається у болтових, штифтових, шпоночних з'єднаннях, парах "вал-ступиця", у шарнірах, ресорах, кулачкових механізмах та ін.

Достатнім для протікання фретинг-корозії є наявність переміщень амплітудою 0,025 мкм. Руйнування контактних поверхонь виявляється в утворенні на поверхнях взаємного дотику деталей виразок і продуктів корозії у вигляді плям, порошку, наросту-утворення.

Необхідною умовою вияву фретинг-корозії є проковзування поверхонь контактуючих тіл, починаючи з величин, які на

порядок перевищують міжатомну відстань. Під дією сил тертя кристалічна решітка поверхневих шарів при циклічних тангенціальних зміщеннях розхитується та руйнується. Максимальне зміщення при циклічних коливаннях не повинно перевищувати розмір ділянки дотику. Завдяки цьому частки зносу не можуть вийти за межі фактичної площі контакту та забезпечують виникнення високих напруг на її локальних ділянках. Зростання тиску та наблизений до одиниці коефіцієнт взаємного перекриття поєднаних поверхонь призводять до виникнення високих температур у зоні контакту. Знакозмінний характер відносного переміщення контактних поверхонь знижує імовірність релаксації напруг. Вищезазначені чинники призводять до протікання втомних процесів, схоплювання, інтенсивного окислення та абразивної дії окисних часток на контактні поверхні.

Для зменшення інтенсивності фретинг-корозії застосовують методи, основними з яких є зменшення мікрозміщень, зниження сил тертя, створення проміжної зони концентрації ковзання.

Зменшення мікрозміщення між контактуючими поверхнями можливе за рахунок підвищення сил тертя. Тертя можливо підвищити або збільшенням контактної напруги шляхом зменшення площі дотику деталей або підвищенням коефіцієнту тертя за рахунок збільшення шорсткості. Підвищення контактної напруги призведе до позитивних наслідків, коли проковзування поверхонь значно знизиться і буде субмікроскопічним, на відміну від мікроскопічного. Якщо вібрацію неможливо зупинити, то напрямом зниження пошкоджень поверхонь може бути зменшення тертя або перенесення його в проміжну зону. Високий опір фретинг-корозії встановлено для пари сталь -політетрафторетилен, поліаміди і поліхлорвініл.

В умовах протікання фретинг-процесу звичайні масла не ефективні, до їх складу вводять антиокислювальні присадки, дисульфід молібдену, парафін, застосовують свинцеві білила, тверді речовини, установлюють гумові прокладки.

## 5.8. Механізми зношування при диспергуванні та пластичній деформації

**Знос унаслідок диспергування.** Велика кількість поєднаних деталей не має на робочих поверхнях ділянок схоплювання, подряпин, вони працюють в умовах гідродинамічного або еластогідродинамічного мащення та при помірних температурах. При цьому в тонких поверхневих шарах контактних поверхонь не відбувається хімічних та структурних змін. У таких умовах руйнування поверхневого шару відбувається внаслідок диспергування (подрібнення) окремих ділянок контакту. Інтенсивність зношування при цьому низька, а чистота поверхонь деталей висока.

Процес зносу реалізуються за таким механізмом: на площах фактичного дотику матеріал піддається багатократній пластичній та пружній деформації, що призводить до розміцнення та розрихлення структури матеріалу з поступовим видаленням окремих блоків. Процес розміцнення, імовірно, близький до процесу зародження та розвитку втомної тріщини під дією циклічних навантажень.

Зносу внаслідок диспергування підлягають шарнірно-болтові з'єднання, поршневі пальці шатунів, золотникові пари паливної апаратури та ін.

**Знос внаслідок пластичної деформації.** Цей вид зношування реалізується при зміні розмірів та форми контактної поверхні внаслідок пластичної деформації поверхневого шару або окремих його ділянок. Часто цей вид зношування називають **зминанням**. Зминанню піддаються сидла шарових клапанів, зубці шестерен, різбові з'єднання, підшипники ковзання з м'яких сплавів.

Найчастіше цей вид зношування спостерігається при низьких швидкостях ковзання (кочення) та високих навантаженнях, тобто за умов, коли температура у зоні контакту недостатня для виникнення схоплювання та заїдання пар тертя. Зминання проявляється і при високих температурах та швидкостях, однак за цих умов поверхні контактуючих пар повинні бути розділені

високоміцною окисною або мастильною плівкою. За умов, коли відсутній мастильний матеріал у зоні тертя, змінання переходить у схоплювання. Пластична деформація може реалізовуватися як на локальних ділянках контакту, так і поширюватися на весь об'єм деталі.

У першому випадку спостерігається видавлювання матеріалу з максимально навантаженої зони на периферійні ділянки. Видавлений матеріал зазнає повторних деформацій та відділяється у вигляді часток зносу. Фактично цей процес характеризується як знос унаслідок малоциклової втомленості. Поверхня тертя може мати вигляд нерегулярного рельєфу.

### 5.9. Зношування при вибіркового перенесенні

Явище вибіркового перенесення не належить до окремого виду зношування. Очевидно, це фізико-хімічний метод підвищення зносостійкості контактних поверхонь за рахунок утворення та безперервного оновлення на поверхнях тертя плівки міді, яка характеризується низьким опором зсуву. Цей вид зношування характерний для вузлів тертя, одним з елементів яких є сплави або композити, що містять мідь або її сполуки, а як мастильний матеріал застосовують гліцерин або інші речовини, здатні відновлювати мідь з окислів.

Розглянемо механізм вибіркового перенесення у парі тертя сталь — бронза при змащуванні гліцерином. У початковий період тертя гліцерин окислюється і, діючи як слабка концентрована кислота, розчиняє поверхневий шар бронзи. Атоми легованих елементів (олово, цинк, алюміній та ін.) потрапляють у мастильний матеріал, а на поверхні залишаються атоми міді (ефект вибіркового розчинення). Внаслідок цих процесів на поверхні бронзи утворюється шар міді, в пори якого проникає гліцерин. За наявності окислів гліцерин відновлює мідь. Мідь характеризується високою активністю, вона з'єднується з виступами сталльної поверхні, переноситься на них. Цей процес супроводжується доти, поки поверхні



тертя обох контактуючих пар не вкриються суцільною мідною (сервовитною) плівкою.

Властивості мідної плівки, яка формується при терті, інші, ніж у звичайної міді, одержаної відновленням мідних руд. Утворена *сервовитна плівка* має рихлу структуру, містить поверхневоактивні речовини мастильного матеріалу. Верхній шар плівки не містить окислів, дислокацій, не наклепується, він знаходиться у вигляді розплаву та характеризується низьким опором зсуву. Товщина сервовитної плівки досягає 1—2 мкм, що дає змогу збільшити в десятки разів площу фактичного дотику та забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження в контакті, що виключає можливість реалізації пластичного деформування.

При граничному терті й терті без мастильного матеріалу поверхні деталей завжди покриті окисними плівками, які перешкоджають безпосередньому контакту металевих поверхонь і їх взаємопроникненню. Проте окисні плівки крихкі, не здатні до багатократного деформування і тому в процесі тертя руйнуються в першу чергу, внаслідок чого їх захисна дія слабшає. У режимі вибіркового перенесення тертя відбувається без окислення поверхонь і тому не супроводжується утворенням окисних плівок. Захист поверхонь від окислення забезпечують щільні шари позитивно заряджених адсорбованих поверхнево-активних речовин, які утворюються в процесі тертя і запобігають надходженню кисню до сервовитної плівки. При звичайному терті окисні плівки перешкоджають виходу дислокацій на поверхню. Це прискорює наклеп поверхневого шару і його руйнування. Сервовитна плівка не наклепується і здатна багатократно деформуватися без руйнування, оскільки за відсутності окисних плівок дислокації в ній легко розріджуються.

Майже всі мастильні матеріали містять ПАР, що й зумовлює пластифікацію поверхневого шару металів унаслідок прояву ефекту Ребіндера і зниження сил тертя між ними. При звичайному терті окисні плівки перешкоджають проникненню змащувального

матеріалу (а разом з ним і ПАР) до основного металу, що знижує ефект Ребіндера; через це пластичні деформації ділянок контакту охоплюють глибші шари (рис. 47.).

При вибірковому перенесенні окисні плівки відсутні, і дія ефекту Ребіндера реалізується повною мірою, внаслідок цього деформується лише сервовитна плівка, підповерхневі шари металу деформації не зазнають. Оскільки молекули ПАР знаходяться в порах сервовитної плівки, не виключене ковзання і всередині плівки за принципом дифузійно-вакансійного механізму, але з незначною витратою енергії. Вказані процеси забезпечують значне зниження тертя і зношування елементів трибоспряження.

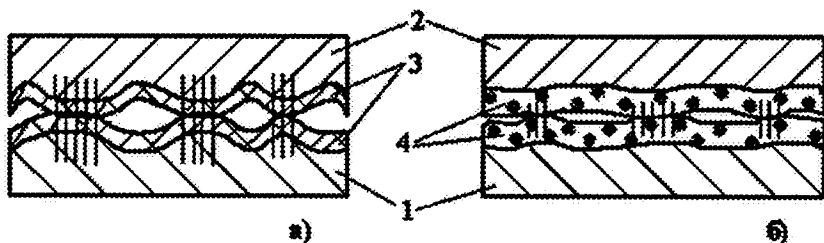


Рис. 47. Схема розповсюдження деформацій в зоні контакту при граничному режимі мащення (а) та вибірковому перенесенні (б): 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисні плівки; 4 – сервовитні плівки.

Ефект вибіркового перенесення реалізується також у важко-навантажених парах тертя сталь – сталь, які змащуються мастилами (ЦИАТИМ-201) та мінеральними маслами, до складу яких входять присадки з активним атомом міді, та в метало-полімерних парах тертя, один з елементів яких містить мідні сполуки.

## 6. ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ

У коло основних завдань технології входить одержання матеріалів та заготовок із заданими властивостями, обробка заготовок для одержання деталей із певною точністю, зміцнення робочих поверхонь деталей різними методами.

### 6.1. Вибір технологічного процесу

Одержання якісного матеріалу залежить від методів обробки, режимів різання, стабільності структури матеріалу.

Наприклад, матеріал (сірий чавун) при виготовленні поршневих кілець для зняття внутрішніх напруг піддають низькотемпературному відпалу. Заготовку завантажують у холодну або нагріту не вище 200°C піч, відпал проводять при температурі 550–600°C, витримують 2 год. при швидкості нагрівання 100°C/год. Є рекомендації проводити витримку від 1 до 8 год. залежно від розмірів та конфігурації заготовки. При тривалій витримці чавуну в умовах відносно високих температур відбувається часткова коагуляція цементиту в перліті, можлива його міграція до межі зерен, спостерігається перехід від пластинчастого перліту до зернистого. Особливо це характерно для тонкостінних відливок. Зазначені дефекти окремо або у взаємодії знижують зносостійкість чавуну.

Послідовність операцій та режимів обробки деталей безпосередньо впливає на їх зносостійкість. Так, валки холодної прокатки можуть оброблятися за двома схемами технологічної послідовності:

1) обточування ( $\nabla 6$ ), загартовування бочки з індукційним нагріванням, грубе шліфування, чисте шліфування, доводка не нижче  $\nabla 10$ ;

2) аналогічний процес, однак перед загартовуванням є додаткова операція— шліфування.

За другим варіантом поверхня бочки валка має більш однорідну структуру, що сприяє підвищенню втомної контактної витривалості.

## 6.2. Формування оптимальної топографії поверхні

Для кожного вузла тертя і певних режимів його експлуатації характерна своя оптимальна топографія поверхонь, при якій спостерігається мінімальна інтенсивність зношування. Незалежно від режиму мащення, у процесі припрацювання вихідна шорсткість переходить в експлуатаційну. Що ближчою є вихідна мікрогеометрія до рівноважної, то менший період припрацювання.

Вплив вихідної чистоти поверхні на інтенсивність зношування обмежується стадією припрацювання. На рис. 48 представлено вплив початкової шорсткості контактних поверхонь на інтенсивність зношування за умов  $R_{a1} < R_{a2}$ .

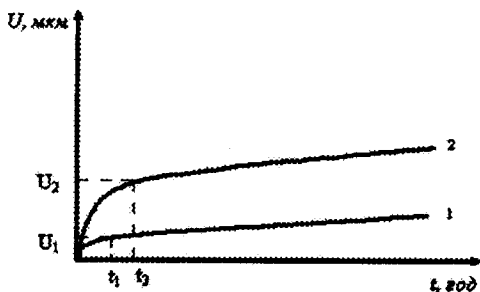


Рис. 48. Залежність інтенсивності зношування від початкової шорсткості контактних поверхонь.

Крива 1 належить до початкової шорсткості  $R_{a1}$  з періодом припрацювання  $t_1$  меншої тривалості. Починаючи з моменту  $t_2$ , розташування кривих 1 і 2 паралельне — швидкості зносу рівні,

але зберігається постійна різниця зношування, яка зумовлена більшою швидкістю зносу в період припрацювання поверхонь із шорсткістю  $Ra_2$  (крива 2).

Занадто гладкі поверхні (вище на два класи чистоти) чи занадто грубі щодо оптимальної шорсткості негативно впливають на зносостійкість. Поверхні низьких класів шорсткості контактують по відносно невеликій кількості ділянок дотику з незначною загальною площею при високих середніх контактних навантаженнях. У зв'язку з видаленням значних нерівностей у процесі припрацювання при формуванні фактичної площі дотику початковий знос збільшується. При цьому не виключено утворення великих часток зносу, які можуть призвести до задирів. Поверхні високих класів шорсткості у меншій кількості адсорбують мастильний матеріал. З іншого боку, внаслідок великої фактичної площі дотику швидкість зношування низька і може бути недостатньою для такого спрацювання спряжених поверхонь, яке необхідне для попередження критичної концентрації навантаження в період припрацювання. В результаті може відбутися заїдання навіть після тривалої роботи.

Для деталей вузлів тертя, що експлуатуються у режимі пуск — зупинка, при низьких швидкостях ковзання, в умовах реверсивного тертя важливо забезпечити безперервний доступ мастильного матеріалу в зону контакту. Тому розроблена ціла низка технологічних заходів щодо створення "карманів" для мастильного матеріалу. Так, при хонінгуванні втулок за допомогою крупнозернистого абразивного інструменту виконується швидкісна операція зі створення сітки канавок, яка виконує роль "резерву мастильного матеріалу".

Створення "карманів" забезпечується також при обкатуванні деталей роликами, шариками, алмазним інструментом. При цьому відбувається і зміцнення поверхневого шару пластичним деформуванням. Внаслідок обкатки на 20—40% підвищується твердість поверхні, а зносостійкість може підвищуватись у середньому втричі.

### 6.3. Обробка деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД)

Різниця конструктивних особливостей інструменту для пластичного деформування дозволяє у широких межах досягти різної варіації якості поверхні (табл. 7). В основному при всіх видах обробки тиском зносостійкість деталей підвищується. Цьому сприяє підвищення твердості поверхневих шарів та створення особливої форми нерівностей на поверхні.

Табл. 7. Способи обробки поверхонь поверхневим пластичним деформуванням

Спосіб обробки	Деталі, які обробляються (розмір в мм)	Досягнуті значення при обробці		
		клас шорсткості	ступінь наклепу, %	глибина наклепу, мкм
Вигладжування алмазним конусом	Осі, вали $5 < d < 50$ $l$ – не обмежено	11–12	20–25	1000
Обкатування багатошаровим обкатником пружної дії	Осі, вали $d > 8$ $l$ – не обмежено	8–11	20–50	5000
Ударна обробка шариковими головками інерційної дії	Осі, вали $d > 10$ $l$ – не обмежено	8–10	15–30	500

**Алмазне вигладжування** застосовують для обробки сталі, кольорових металів та сплавів. Ураховуючи ламкість алмазу, не слід обробляти переривисті поверхні.

Обкатування та розкатування поверхні застосовують при обробці циліндричних поверхонь, канавок, галтелей.

**Калібрування (дорнування)** проводять із малими чи великими натягами. У першому випадку зона пластичної деформації не поширюється на всю товщину деталі. Така обробка підвищує клас шорсткості поверхні, зменшує похибки форми. Тонкостінні гладкі циліндри та втулки калібрують із великими натягами, при цьому зона пластичної деформації охоплює всю деталь.

**Вібронакатуванням** можливо одержати п'ять видів рельєфу. У вібронакатаних поверхнях одержують більші радіуси закруглення вершин нерівностей, однакову висоту повздовжньої та поперечної шорсткості, що забезпечує більшу величину опорної поверхні.

**Електромеханічний спосіб** зміцнення застосовують для сталевих та чавунних деталей. Твердість окремих марок сталей підвищується у 4–5 разів при глибині її поширення до 0,2–0,3 мм. Найбільше згладжування шорсткості спостерігається при швидкості обробки 10–15 м/хв., зусиллі ролика 20–75 кгс, кількості проходів – 3. Зносостійкість нормалізованих сталей після електромеханічного способу зміцнення підвищується в 4–10 разів порівняно із зносостійкістю після полірування або шліфування. Зносостійкість загартованої сталі ШХ15 може бути підвищена у 2 рази.

#### 6.4. Нанесення захисного покриття

Одним із найбільш перспективних напрямків підвищення зносостійкості є нанесення захисного покриття на поверхню деталей. Для цього використовують матеріали, які характеризуються високою адгезійною схильністю до матеріалу деталі, низьким опором зсуву та здатністю витримувати без руйнування багатократні деформації. В першу чергу до них відносяться м'які метали (мідь, олово, свинець і т.д.), тверді змащувальні матеріали (графіт, диселеніди і дисульфідні металів) та композити на основі полімерів. Особливої уваги заслуговують покриття, які являють собою пористий каркас, наприклад, з міді, пори якого заповнюються сухою

змащувальною речовиною. Ці покриття забезпечують реалізацію правила позитивного градієнта механічних властивостей по глибині.

В останній час для нанесення захисного покриття використовують похідні фторовмісних сполук "Епілам" та "Фолеокс". Вони утворюють на поверхні металу хемосорбційні шари та сприяють утриманню мастильного матеріалу на поверхнях контактуючих пар. Застосування такого покриття найбільш ефективно при граничному режимі мащення, інтенсивність зношування знижується при цьому на порядок.

Для важконавантажених вузлів тертя використовують деталі, на поверхнях яких сформована плівка з твердих матеріалів типу нітриду титану, оксиду алюмінію, кераміки, карбідів та боридів. У цьому класі покриттів перспективне застосування матеріалів на основі металів або полімерів, що вміщують ультраалмази (синтетичні алмази розміром 4–8 мкм). Покриття на основі ультраалмазів забезпечують підвищення зносостійкості контактних поверхонь у 3–10 разів. Твердість гальванічного покриття з ультраалмазами досягає 10000–14000 МПа.

### 6.5. Опромінення потоками енергії високої густини

Для підвищення зносостійкості деталей використовують лазерне легування тонких поверхневих шарів металів і сплавів, локальне поверхнєве загартування сталей, лазерне зміцнення титанових сплавів шляхом їх оксидування поверхневого шару. До цієї групи відносять іонне бомбардування, обробку електронним променем, радіаційне опромінення, іонну імплантацію.

**Лазерна обробка** — це одержання на окремих ділянках поверхні деталей зміцнених шарів із високою мікротвердістю. Для лазерного способу вводу енергії в речовину характерні точкова локалізація, дозованість та стерильність.

**Іонна імплантація** — метод нанесення покриття за рахунок бомбардування поверхні матеріалу іонами з енергією вище  $10^4$  еВ.



Таке бомбардування зумовлює зміни структури або хімічного складу поверхневого шару.

### **6.6. Термічна обробка робочих поверхонь деталей (поверхнєве загартування)**

Поверхнєве загартування застосовують для утворення твердого зносостійкого шару на певних ділянках у деталях, які виготовляються з середньо- або високовуглецевих сталей, а також із перлітних, ковкого, сірого та високоміцного чавунів із вмістом не менше 0,6% зв'язаного вуглецю.

За способом нагрівання розрізняють такі методи поверхневого загартування: полумєний, контактний, високочастотний, при нагріванні в електроліті.

**Полумєне поверхнєве загартування.** При цьому способі загартування деталі нагрівають полум'ям суміші горючих газів та кисню, використовують також керосиново-киснєве полум'я. Форма полум'я повинна відповідати загартованій поверхні. Для охолодження використовують воду або повітря.

Наприклад, циклічним способом швидкого обертання загартовують циліндричні поверхні ( $d < 150$  мм,  $l < 2d$ ) — шийки прямих та колінчастих валів, осей, внутрішніх отворів, зубців коліс з модулем до 8 мм.

**Поверхнєве загартування з контактним нагріванням електричним струмом.** За допомогою електроду, який має форму ролика, що ковзає по поверхні сталльної деталі, до неї підводиться струм; при протіканні струму в контакті виділяється теплота. Нагрітий під загартування об'єм металу охолоджується емульсією або водою. За даним способом нагрівання поверхнєвий шар металу товщиною 0,05—0,2 мм заміщується незагартованим, так як його температура не досягає критичної внаслідок інтенсивного охолодження ролика (для забезпечення його стійкості температуру підтримують в межах 400—450°C). Незагартований шар видаляється при шліфуванні. Наявність такого шару попереджує

утворення загартованих тріщин. За вказаним методом загартовують шийки валів, рейки, направляючі станин.

**Високочастотне загартування** — це поверхневе загартування при нагріванні металу індукованим в ньому змінним струмом високої частоти. Глибина нагрівання поверхні тим менша, чим вище частота струму. За цим способом загартовують всі прямі та колінчасті вали, кулачкові та шліцьові вали, шестерні, важелі перемикання коробок швидкостей, гільзи циліндрів, кільця поршнів.

Глибину загартованого шару назначають не менше 1,5–2,0 мм. При високих контактних навантаженнях для попередження вдвлювання загартованого шару глибину загартування назначають 4–5 мм. Загартування для підвищення втомної міцності слід проводити на глибину 10–15% діаметру деталі. Правильний вибір температурного режиму забезпечує утворення залишкових напруг стиску. Якщо загартуванню підлягає частина поверхні, то в граничних місцях загартованого шару на поверхні розташована зона з залишковими напругами розтягу. Наявність цих напруг (150–200 МПа) знижує втомну міцність деталі (рис. 49).

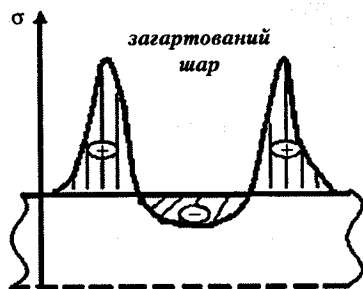


Рис. 49. Розподіл залишкових напруг на поверхні при локальному загартуванні.

Причини зниження міцності на межі загартованої ділянки повинні враховуватися при виконанні поверхневого загартування. Так, якщо загартування шийки колінчастого валу проводять

з метою зміцнення, то враховуючи можливість очікування найбільших робочих напруг в галтелях, необхідно загартувати галтелі і шийку з прилеглими до них ділянками шоки.

### 6.7. Хіміко-термічна обробка поверхонь

Ці методи дозволяють змінити структуру та властивості поверхневого шару металів шляхом насичення його атомами легуючих елементів у процесі теплової обробки в хімічно активному середовищі.

**Цементація** — процес насичення поверхневого шару маловуглецевої сталі (до 0,3% С) вуглецем. Цей шар товщиною 0,5–2,5 мм стає більш твердим, однак в ньому виникають значні внутрішні напруги. Проводять цементацію при  $T = 950\text{--}980^\circ\text{C}$  в рідкому, твердому та газовому карбюризаторі. Низьковуглецеві цементовані сталі застосовують для малонавантажених деталей: поршневі пальці, кулачкові вали, черв'яки (до 25 мм).

**Азотування** — насичення поверхневого шару деталі азотом, який утворює з металами нітриди. Наявність таких сполук забезпечує підвищення твердості, зносостійкості, опору ерозії та кавітації. Якщо товщина азотованого шару менша зони деформації при терті, то шар легко руйнується.

**Силіціювання** — насичення чорних металів кремнієм на глибину 0,3–1 мм. Цей метод дає змогу підвищити стійкість металу до зносу та впливу хімічно активних середовищ. Однак поверхневий шар стає ламким.

**Оксидування** — процес утворення окисної плівки на поверхні металу. На поверхні сталі формуються дрібні кристали  $\text{FeO}$  з низькою твердістю, які утворюють пористий шар. Цей шар міцно з'єднаний з основним металом, характеризується низьким опором зсуву та здатний утримувати у своєму об'ємі мастильний матеріал.

**Фосфатування** — утворення на поверхні деталей із чорних та кольорових металів плівок товщиною до 50 мкм з нерозчинних

фосфорнокислих солей. Плівка характеризується високою стійкістю до хімічно активних речовин та зносу, має високу пористість та твердість. Цей метод застосовується для попередження заїдання і зменшення інтенсивності зношування при фретинг-корозії. Існує позитивний досвід фосфатування поршневих кілець, циліндрових гільз, втулок великих двигунів, пальців верхніх головок шатунів та ін. Слід зазначити, що при фосфатуванні може підвищуватися ламкість сталі внаслідок насичення металу воднем.

**Сульфідкування** — насичення поверхневого шару сіркою, що супроводжується утворенням сульфїду та дисульфїду залїза. Сульфїдний шар характеризується високою адсорбційною активністю, низьким опором зсуву та забезпечує високу зносостійкість деталі.

## 6.8. Гальванічні покриття поверхонь деталей

**Електролітичне хромування** як технологічний метод підвищення зносостійкості сталей займає одне з перших місць.

Для підвищення зносостійкості деталей шар хрому товщиною до 0,1–0,2 мм наносять безпосередньо на сталеву поверхню. Електролітичний хром характеризується низьким коефіцієнтом тертя, високою твердістю (НВ 1000–1100). Зносостійкість хромованих деталей підвищується в 5–10 разів. Покриття неефективно змочується маслами, тому застосовують створення пор та каналів.

Існують такі види зносостійкого хромованого покриття: гладкий хром, гладкий хром по накатуванню, пористий хром, плямистий хром, хром з ситовидною пористістю.

Залежно від режимів обробки пористість покриття може бути канальчатою або точковою. Точкова пористість характеризується більшою маслємністю, тому її застосовують для зміцнення деталей, які працюють у важконавантажених умовах, наприклад, для верхніх компресійних поршневих кілець двигунів. Точкова пористість характеризується також швидким припрацюванням, але

меншою зносостійкістю, ніж канальчата. Канальчатим хромом часто покривають гільзи циліндрів. Знос пористо-хромованих гільз та поршневих кілець менший, ніж нехромованих у 4–7 разів, при цьому знос спряжених сталевих деталей зменшується в 3–5 разів.

**Залізнення** – процес електролітичного осадження заліза з водних розчинів його закисних солей. Покриття можуть бути високої твердості, яка наближається до твердості сталі, тому цей процес інколи називається осталування.

Найбільш широке застосування процес має при нарощуванні металу на зношену поверхню сталевих та чавунних деталей для відновлення їх розмірів. Компоненти електролітів недефіцитні, швидкість нарощування шару висока, товщина сформованого осаду на відновленій поверхні може досягати 8 мм.

## **6.9. Електроіскрове та електродугове зміцнення поверхонь**

Електричний розряд залежно від його тривалості протікає в імпульсній формі (іскра) або в стаціонарній (дуга). Електричний розряд супроводжується сильним нагріванням зони розряду та руйнуванням поверхонь електродів. Електроіскровому зміцненню піддаються всі чорні метали. Механізм процесу складний та представляє собою сукупність ерозійного, термічного та термохімічного процесів і контактного перенесення матеріалу. Для зміцнюючих електродів застосовують тверді сплави, складовими яких є карбіди титану та вольфраму, ферохром, чисті алюміній та хром, білий чавун, вуглеграфіт. Електроіскрове зміцнення застосовують для деталей дорожніх будівельних машин, що працюють в абразивному середовищі, деталей механізмів ливарних цехів, для відновлення посадочних місць у нерухомих спряженнях.

## **6.10. Експлуатаційні методи**

Конструктивна досконалість і висока якість виготовлення і установки машини не гарантують тривалої та безаварійної її

роботи. Довговічність вузлів тертя машин і механізмів значною мірою залежить від умов їх експлуатації, дотримання норм, направлених на зниження інтенсивності зношування тіл тертя, своєчасному проведенні профілактичних заходів, заміни або відновлення зношених деталей. Важливою передумовою правильного використання і грамотної експлуатації машини є наявність її технічного опису, правил технічної експлуатації і основних правил техніки безпеки при обслуговуванні машини, альбома креслень і карти змащування. Вказана документація складається під безпосереднім керівництвом конструктора на підставі досвіду експлуатації подібних машин, результатів експериментальних робіт, стендових і експлуатаційних випробувань дослідних зразків. Існують такі експлуатаційні методи забезпечення високої надійності вузлів тертя.

### **6.10.1. Обкатування машин та механізмів**

Призначення даного методу — припрацювання в єдиному комплексі всіх пар тертя, які входять до складу машини. Під час обкатування повинні бути реалізовані два процеси:

— макрогеометричне припрацювання — знос поверхонь по вершинах хвиль шорсткості і на ділянках, де початкові технологічні неточності, дефекти монтажного походження, силові й теплові деформації перешкоджають розповсюдженню реальної зони контакту до проектної;

— мікрогеометричне припрацювання — формування оптимальної топографії поверхні з певними параметрами і спрямованістю, характерною для кожної поверхні тертя при роботі машини на експлуатаційному режимі найбільшої тривалості.

Режим обкатування — це послідовність і тривалість навантаження машини при відповідних швидкісних режимах. Обкатування машини починають із холостого ходу на малих швидкостях. Холостий хід використовують також для перевірки справності всіх систем. Якщо при нормальній експлуатації машини

деякі вузли тертя працюють при підвищених температурах, то при обкатуванні повинен бути етап, аналогічний такому теплово-му режиму. Тому обкатування, наприклад, автотракторних двигунів складається з холодного (з приводом від стороннього джерела) і гарячого режимів. Момент закінчення періоду обкатування визначається за такими критеріями: мінімум потужності, необхідної для роботи машини на холостому ході; найбільша ефективна потужність при заданому режимі навантаження; низька концентрація і відсутність крупних часток зносу в змащувальному матеріалі.

### 6.10.2. Змащування вузлів тертя

Це один з найбільш ефективних методів продовження терміну служби триботехнічної пари. При роботі машин кількість змащувального матеріалу зменшується внаслідок витоків через нещільності, деяка його частина переходить у шлам, частина видаляється водою, випаровується.

Термін заміни моторного масла перш за все зумовлений проявом наступних явищ:

- зниженням ефективності змащувальних властивостей масла у зв'язку з накопиченням у ньому продуктів старіння і різних забруднень;

- розрідженням масла паливом;

- накопиченням високо— і низькотемпературних осадів;

- спрацьовуванням присадки.

Починаючи приблизно з 1960 р., вимоги до експлуатаційних властивостей моторних масел підвищуються. Потужність двигунів подвоїлася, ступінь стискання зріс від 6,5 : 1 до 9 : 1 (рис. 50).

Значно зросли також температурні чинники, які впливають на елементи двигуна, включаючи і моторне масло. Робочі умови для сучасних автомобілів все більше й більше коливаються між високошвидкісною їздою (шосе) і уповільненим рухом в колоні

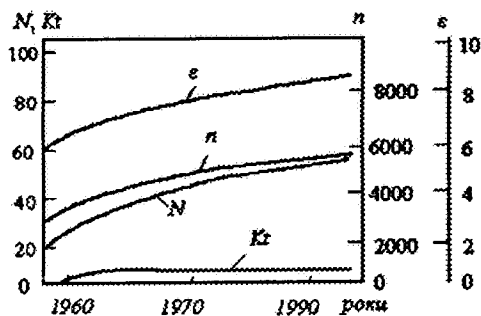


Рис. 50. Зміна характеристик двигунів внутрішнього згорання:  $N$  — потужність, кс/л;  $K_t$  — зниження витрати палива %;  $n$  — номінальна частота обертання, об/хв;  $\epsilon$  — ступінь стискування

та на короткі відстані (міські умови). Терміни заміни масла, які в 1960 р. складали ~ 3000 км пробігу, зросли на сучасному етапі експлуатації машин до 10000 км. Це стало можливим завдяки безперервному поліпшенню якості моторних масел, запобіганню низькотемпературному шламоутворенню, підвищенню термічної стабільності і протизношувальних властивостей. Застосування змащувального матеріалу після закінчення терміну його заміни зумовлює підвищення зносу елементів вузла тертя внаслідок ослаблення змащувальних властивостей. Проте передчасна заміна змащувального матеріалу також недоцільна, оскільки новий змащувальний матеріал спочатку характеризується менш ефективними змащувальними властивостями, оскільки містить низьку концентрацію продуктів окислення вуглеводнів, здатних утворювати з металом стійкі з'єднання, які захищають його від безпосереднього контакту з контртілом. Графік термінів змащування для автомобілів розробляють згідно з режимом експлуатації в найбільш несприятливий сезон. Для складання карти змащування використовують інструкції і схеми заводів-виробників, результати експериментальних досліджень і досвід експлуатації.



### 6.10.3. Вибір режиму роботи і умов експлуатації

Робота машини характеризується навантажувальними, швидкісними та температурними режимами. Ідентична продуктивність машини може бути досягнута при різних поєднаннях параметрів навантажувального і швидкісного режимів. Деякий діапазон сумісності вказаних чинників може виявитися найбільш вигідним з погляду зносостійкості, задовольняючи й вимогам економічності.

Значною мірою довговічність трибоспряжень визначається частотою і правильним виконанням запуску машини, оскільки в пусковий період інтенсифікується зношування. На частку пускового зносу припадає 50–70% загального зносу двигуна при роботі на сталому режимі. Один пуск двигуна за зносом еквівалентний 15–17 км пробігу. Значний знос при пуску двигуна зумовлений низкою причин. Після зупинки двигуна масло, знаходячись у нагрітому стані, швидко стікає з гарячих стінок циліндрів, видавлюється і залишається в підшипниках у незначній кількості. Нормальна подача масла у верхню робочу зону циліндра починається тільки через 3–12 хв. після початку пуску двигуна, і змащування відбувається при граничному режимі.

Підвищений знос деталей ходової частини транспортних засобів відбувається в період їх зупинки. При гальмівному моменті колеса, який дорівнює або перевищує момент від сил зчеплення колеса з полотном дороги, відбувається перехід від кочення до ковзання (юз). Юз призводить до місцевого спрацьовування коліс по колу кочення і зменшує термін служби шин через стирання протектора.

Тривалі сталі режими роботи машини при навантаженнях, нижчих за номінальні, інколи підвищують знос. Наприклад, тепловий режим, який створюється, у двигунах внутрішнього згорання за подібних умов, несприятливий для роботи циліндро-поршневої групи.

## 7. ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ВУЗЛА ТЕРТЯ

Застосування матеріалів для виготовлення елементів трибо-технічної пари є складною задачею, оскільки їх вибір повинен здійснюватися з урахуванням великої кількості чинників. До них, зокрема, належать:

- конструкція та призначення вузла тертя;
- вимоги щодо загальної міцності деталей, терміну їх служби та надійності з урахуванням собівартості матеріалу;
- технологія виробництва та витрати на виготовлення деталей;
- рівень статичного та динамічного навантаження;
- швидкість відносного переміщення тіл;
- температура експлуатації;
- властивості мастильного матеріалу;
- вид мащення.

Матеріал повинен відповідати вимогам щодо зносостійкості та коефіцієнта тертя, характеризуватися низькою вартістю та високою технологічністю.

Найбільш важливою вимогою є раціональне поєднання сумісності матеріалів спряжених тіл. З урахуванням даного фактора виключається можливість схоплювання поверхонь. Найважливіша умова підбору матеріалів пар тертя — це вибір таких матеріалів, які б не утворювали при терті міцних адгезійних зв'язків, а руйнування цих зв'язків здійснювалося б на межі розділу контактуючих поверхонь. Один з матеріалів повинен характеризуватися низьким опором зсуву, а в контакті повинні домінувати пружні деформації. Нераціонально використовувати сполучення однакових матеріалів (мідь-мідь, бронза-бронза, титан-титан), а також пари тертя, в яких обидва елементи виготовлені з м'яких матеріалів (алюмінієвий сплав-мідь, мідний сплав-свинець і т.д.).

Поєднання твердого матеріалу з м'яким забезпечує високу довговічність вузла тертя при низьких навантаженнях та температурі.

У важконавантажених низькошвидкісних вузлах тертя ковзання та в опорах кочення доцільним вважається поєднання твердих матеріалів.

Деталі відповідно до їх експлуатаційного призначення виготовляють із конструкційних, фрикційних, зносостійких та антифрикційних матеріалів. У багатьох випадках матеріали наносять у вигляді покриття, плівок чи накладок на основу з конструкційного матеріалу.

З *конструкційних сталей* (Ст 15, Ст 20, Ст 45, Ст 40Х, Ст 30ХМ) виготовляють деталі, які задовольняють вимогам щодо високої міцності, жорсткості. Це деталі типу валів, пальців, зубчастих коліс та ін.. Із сталі, а також із чавуну виготовляють циліндри, поршні, плунжери та поршневі кільця.

*Фрикційні матеріали* — це матеріали, які в контакті з металевою поверхнею розвивають високий, стабільний коефіцієнт тертя. Вони застосовуються у гальмах та фрикційних муфтах валів. Фрикційні матеріали класифікують на такі групи:

- 1) органічні (дерево, шкіра, повсть);
- 2) металеві (чавун, сталі У6, У7, марганцева сталь та ін.);
- 3) асбестокаучукові;
- 4) пластмасові (текстоліт, асбестотекстоліт);
- 5) металокерамічні на мідній та залізній основі.

*Зносостійкі матеріали* — це матеріали, які при терті навіть у важких умовах навантаження відносно мало зношуються. Як зносостійкі матеріали застосовують конструкційні сталі, що зміцнюють у всьому об'ємі або в окремих ділянках, спеціальні сталі, чавуни, металокераміку, гуму, пластики.

Для підвищення ефективності роботи підшипників ковзання були розроблені антифрикційні сплави, які характеризуються низьким коефіцієнтом тертя при роботі зі сталеву цапфою. *Антифрикційним матеріалом* може бути будь-який підшипниковий матеріал, як металевий, так і неметалевий з твердістю, меншою, ніж у спряженої деталі.

Антифрикційними властивостями підшипникового матеріалу є:

- висока статична та динамічна міцність при підвищених температурах;

- здатність утворювати стабільний граничний шар та швидко відновлювати його в місцях руйнування;

- низький коефіцієнт тертя при граничному мащенні;

- відсутність задирів на валу у випадках масляного голодування;

- високі теплопровідність та теплоємність;

- ефективна припрацьовуваність.

На сучасному етапі відсутні підшипникові матеріали, які б задовольняли всі зазначені вимоги: міцність олов'янистих бабітів, наприклад, знижується з підвищенням температури, що обмежує їх застосування в напружених умовах експлуатації; припрацьовуваність антифрикційних бронз незадовільна, неметалеві антифрикційні матеріали мають низьку теплопровідність. Основна вимога до структури антифрикційних сплавів була вперше сформульована в 1897 р. Шарпі. Згідно з правилом Шарпі, ефективно працюючі антифрикційні сплави повинні складатися із розподілених у пластичній основі твердих часток, які характеризуються низьким коефіцієнтом тертя з валом та не спричинюють утворення задирів. Дійсно, цьому правилу відповідали на той час усі відомі підшипникові сплави. Однак із часом були розроблені сплави, у яких м'які включення свинцю розподілені у твердій матриці, наприклад, свинцевиста бронза.

Зв'язок експлуатаційних факторів із вибором матеріалів простежується на прикладі поршневих газозушільнюючих кілець та циліндрів двигунів внутрішнього згорання. Газозушільнюючі кільця робочих циліндрів малообертових судових дизелів із низьким тепловим навантаженням можна виготовити з перлітного чавуну. При певному хімічному складі, структурі, технології відливки та обробки ці матеріали забезпечують високу зносостійкість пари циліндр — поршневе кільце. При високих теплових навантаженнях, як, наприклад, у автомобільних двигунах, де велику роль відіграє корозійний знос циліндро-поршневої групи, кільця

виготовляють із легованих чавунів. Матеріал для цільних поршне-вих кілець — перлітні леговані чавуни з добавками хрому, нікелю, молібдена, вольфрама. Але в дизелях, які характеризуються висо-кими значеннями максимального тиску згорання, іноді застосову-ються сталеві кільця з пористим хромуванням робочої поверхні.

### 7.1. Правила сполучення матеріалів

При виборі сумісності елементів пари тертя необхідно перш за все враховувати, в якому режимі тертя передбачається експлуа-тація даного вузла. При цьому на підставі досвіду експлуатації або аналізу роботи подібних вузлів необхідно встановити переважні види пошкоджень триботехнічної пари. Ступінь пошкоженості контактних поверхонь з урахуванням режиму мащення визна-чається умовами роботи: навантаженням, швидкістю і температу-рою (табл. 8).

Табл. 8. Види пошкоджень контактних поверхонь

Гідродинамічний режим мащення	Змішаний або гранич-ний режими мащення	Змащування без мастильного матеріалу
Втомні пошкодження (тріщини, викришування, руйнування).	Втомні пошкодження (тріщини, викришування, руйнування).	Знос за рахунок схоплювання, який супро-воджується виривом та перенесенням металу з однієї поверхні на іншу.
Знос за рахунок абра-зивної дії часток, які попадають в масло.	Знос за рахунок абра-зивної дії часток та схоплювання на ок-ремим ділянках доти-ку.	Утворення глибоких та широких борін, які обу-мовлюють задир повер-хонь тертя.
Кавітаційні пошко-дження вкладишів.	Утворення глибоких та широких борін, які обумовлюють задир поверхонь тертя.	Знос за рахунок зминан-ня (пластичної дефор-мації) поверхонь тертя.
Корозійні пошко-дження.		

Є декілька правил сполучення матеріалів.

1. Сполучення твердого матеріалу з м'яким, який характеризується температурою рекристалізації нижчою, ніж середня температура поверхонь тертя. Пластичний матеріал не наклепується при роботі, характеризується позитивним градієнтом механічних властивостей по глибині. Хороші результати дають пари хром — гума (при змащуванні мінеральним маслом і водними розчинами) та хром — бронза при змащуванні мастилами.

2. Сполучення твердого матеріалу з твердим (сполучення пар з азотованої, хромованої та загартованої сталей). Такі триботехнічні пари характеризуються високою зносостійкістю внаслідок низької імовірності взаємного втілення нерівностей їх контактних поверхонь.

3. Запобігати сполученню м'якого матеріалу з м'яким, а також пар з однакових матеріалів — незагартованої сталі, алюмінієвих сплавів, мідного та алюмінієвого сплавів, хрому і алюмінію та ін. Зазначені пари характеризуються низькою зносостійкістю та ненадійні в роботі, при незначних перевантаженнях у парах утворюються ділянки схоплювання та спостерігається глибинний вирив матеріалу з налипанням на поверхню тертя.

4. Застосовувати у важкодоступних для змащування конструкціях пористі та металокерамічні матеріали і антифрикційні сплави.

5. Застосовувати як фрикційні та антифрикційні матеріали пластичні маси. В ряді випадків вони підвищують надійність конструкцій, знижують вібрації та покращують акустичні властивості машин.

6. Прагнути шляхом вибору матеріалів пари тертя, змащувальних матеріалів або присадок до них створювати при роботі триботехнічної пари умови для реалізації режиму вибіркового перенесення при терті.

7. При виборі матеріалів урахувати можливість при експлуатації насичення поверхонь тертя воднем, що різко знижує зносостійкість і надійність роботи вузла тертя. Застосовувати

матеріали, які стійкі до насичення водню в поверхневих шарах металу.

8. При остаточному доведенні сталевих деталей вузлів тертя їх поверхні піддавати фінішній антифрикційній безабразивній обробці.

Вибір матеріалів пар тертя в умовах ковзання при заданих або прийнятих розмірах деталей, які сполучаються, і визначення цих розмірів при проектному розрахунку проводять за деякими критеріями:

– найбільш простий спосіб перевірки ґрунтується на розрахунку по середньому тиску  $p$ . Спосіб придатний для пар тертя, що працюють з малими швидкостями ковзання при невисоких температурах навколишнього середовища, і забезпечує передбачення умов заїдання елементів трибоспряження;

– якщо режим тертя триботехнічної пари визначається не тільки тиском  $p$ , але і швидкістю  $V$ , то застосовують метод, ідея якого полягає в наступному: якщо  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання, то  $fpV$  є питомою потужністю тертя. Оскільки надійна робота вузла можлива лише при теплонавантаженості, що не перевищує певну величину для даної конструкції і умов її експлуатації, то, позначивши через  $A$  граничну кількість теплоти, яка може знаходитися з одиниці площі в одиницю часу, умову напруженості вузла по теплонавантаженості можна записати:

$$fpV < A \text{ якщо } f = \text{const, то } pV < \text{const}$$

## 7.2. Розташування матеріалів за твердістю у парах тертя

У парах, що утворені ковзаючими поверхнями, які мають різні твердості та розміри площ тертя, розрізняють дві умови, пов'язані з розташуванням матеріалу:

1)  $H_1 > H_2; S_1 < S_2;$

2)  $H_1 < H_2; S_1 < S_2,$

де:  $H_1$  і  $H_2$  – твердості, а  $S_1$  і  $S_2$  – площі поверхонь пар тертя.

Пару з розташуванням матеріалів за першою умовою називають прямою парою тертя, за другою — зворотною (рис. 51).

У випадку прямої пари тертя по більшій поверхні ковзає більш тверде тіло, у випадку зворотної — ковзає більш м'яке тіло.

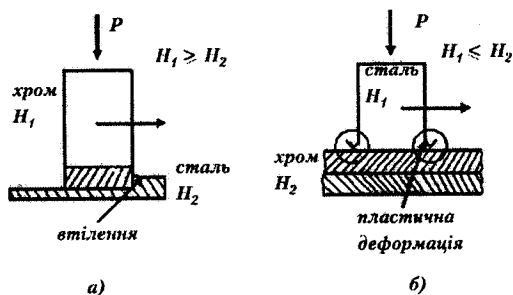


Рис. 51. Прямая (а) та зворотна (б) пари.

Прикладом прямої пари є ковзання хромованого поршневого кільця по циліндру з перлітного чавуну, зворотної пари — хромоване робоче дзеркало циліндра та чавунне кільце. Недостатня надійність пари тертя у зв'язку з розташуванням матеріалів може виявитися у схоплюванні та заїданні. Досвід експлуатації машин, стендові та лабораторні дослідження показують, що зворотні пари тертя більш стійкі до заїдання, а при заїданні спостерігається менша кількість пошкоджень.

Для більшості пар тертя різних механізмів та агрегатів, які працюють за наявності мастильного матеріалу, добра сумісність контактних поверхонь забезпечує надійність роботи вузлів тертя в режимі порушення суцільності мастильного шару. В деяких випадках такий режим економічно обґрунтований, оскільки забезпечення гідродинамічного режиму вимагає великих затрат на конструктивні зміни, що призведе до надлишкової витрати матеріалів. Для вузлів тертя, які працюють в умовах "сухого" або граничного



машення, сумісність матеріалів контактних поверхонь є одним із визначальних чинників для безперервної роботи триботехнічної пари.

### 7.3. Заміна у вузлах машин тертя ковзання на тертя кочення

Така заміна у багатьох випадках доцільна з погляду підвищення надійності роботи деталей і економічності машин. Застосування опор кочення найбільш виправдано у вузлах тертя, що експлуатуються при низьких та середніх навантаженнях і швидкостях, за умов відсутності хімічноактивних речовин, вібрацій та ударних навантажень.

Підшипники кочення характеризуються такими перевагами:

- зменшуються втрати на тертя, тому опори кочення доцільніше встановлювати у вузлах машин, які працюють в умовах частих пусків і зупинок;

- на виготовлення вкладишів підшипників ковзання витрачається велика кількість кольорових металів (мідь, олово, свинець і т.д.);

- зменшується витрата змащувальних матеріалів;

- відпадає потреба в примусовому охолодженні;

- спрощується догляд за конструкцією в періоди технічного обслуговування ;

- у валів при правильно призначених посадках відсутній знос шийок;

- підшипники кочення стандартизовані, що спрощує конструювання підшипникового вузла;

- застосування підшипників кочення зменшує вартість машини.

Але існують і недоліки підшипників кочення, до яких слід віднести:

- недостатня надійність при високих обертових швидкостях і динамічних навантаженнях (схильність до викришування);

- великі діаметральні розміри при меншій довжині, ніж у підшипників ковзання;

- незадовільна робота в умовах вібраційного навантаження;

- великий шум при роботі;

- недостатня корозійна і теплова стійкість;

- незручні, коли потрібна роз'ємна опора.

## 8. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ

### 8.1. Характеристики складових надійності та технічного стану об'єкта

**Надійність** — це властивість технічної системи виконувати роботу, зберігаючи в часі або за пробігом експлуатаційні показники в заданих межах у відповідності з прийнятими умовами експлуатації, технічним обслуговуванням, ремонтом, умовами зберігання та транспортування. Надійність є одним з основних показників якості технічної системи, який виявляється в часі та відображує зміни, які відбуваються в об'єкті протягом усього терміну експлуатації.

При аналізі та оцінюванні надійності машин і механізмів користуються узагальненим поняттям "об'єкт". **Об'єкт** — це предмет певного цільового призначення, що розглядається в періоди проектування, виробництва, експлуатації, вивчення, дослідження та випробовування на надійність. Об'єктами можуть бути технічні системи та їх складові, зокрема апарати, прибори, окремі деталі та ін.

Необхідно мати на увазі, що зміни показників якості технічної системи у часі можуть бути абсолютними та відносними.

**Абсолютні зміни** якості пов'язані з різноманітними процесами, які діють на об'єкт і змінюють властивості або стан матеріалів, із яких він виготовлений, за рахунок чого знижуються експлуатаційні характеристики об'єкта і відбувається його фізичне старіння.

**Відносні зміни** якості об'єкта пов'язані з появою нових технічних систем з більш досконалішими характеристиками, і властивості даного об'єкта стають більш низькими у порівнянні з середнім рівнем, хоча в абсолютних значеннях вони можуть і не змінитися, тобто відбувається моральний знос об'єкта.

Наука про надійність вивчає зміни показників якості технічних систем під впливом тих причин, які зумовлюють тільки абсолютні зміни їх властивостей.

Особливістю надійності є її зв'язок з усіма етапами проектування, виготовлення і експлуатацією машини, починаючи з моменту, коли формується і обгрунтовується ідея створення нового механізму чи машини, і закінчуючи прийняттям рішення про її списання. При оцінці надійності триботехнічної системи використовують такі методи розрахунків і джерела інформації про зміну роботоздатності машин та механізмів, які дозволили б прогнозувати кінетику зміни її характеристик у різноманітних умовах експлуатації.

Завдання надійності пов'язане у першу чергу з прогнозуванням, тому що констатація того або іншого рівня надійності для триботехнічної системи, яка відпрацювала свій ресурс, має досить малу цінність. Особливо на ранніх стадіях створення нового об'єкта (при проектуванні або при наявності дослідного зразка) необхідно дати оцінку його надійності у передбачуваних умовах експлуатації.

**При проектуванні й розрахунку** триботехнічної системи закладається її надійність. Вона залежить від конструкції машини і конструктивних особливостей її вузлів; матеріалів, які використовуються; методів захисту від різноманітних зовнішніх чинників; системи мащення; пристосованості до ремонту і обслуговування та ін.

**При виготовленні (виробництві)** триботехнічної системи забезпечується її надійність. Вона залежить від якості виготовлених деталей, методів контролю продукції, що випускається, можливостей управління складовими технологічного процесу, від якості складання машини і її вузлів, методів випробовування готової продукції та інших показників технологічного процесу.

**При експлуатації** триботехнічної системи реалізується її надійність. Показники безвідмовності і довговічності проявляються

тільки в процесі використання машини і залежать від методів і умов її експлуатації, прийнятої системи ремонту, методів технічного обслуговування, режимів роботи та інших експлуатаційних чинників.

Надійність є комплексною властивістю і включає такі складові: безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність.

**Безвідмовність** — це властивість об'єкта безперервно зберігати роботоздатний стан протягом деякого часу або напрацювання. Напрацювання — це тимчасове поняття, що служить для кількісної оцінки надійності об'єкта і характеризує тривалість або об'єм роботи об'єкта. Вона може вимірюватися в годинах, кількістю циклів вантаження, кілометрах пробігу та в інших величинах, які визначаються специфічними особливостями виробу. Розрізняють напрацювання до відмови, між відмовами, до граничного стану.

**Довговічність** — це властивість об'єкта зберігати роботоздатний стан виробу до граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту. Об'єкт може перейти в граничний стан, залишаючись роботоздатним, якщо, наприклад, його подальше застосування за призначенням стане неприпустимим за вимогами безпеки, економічності й ефективності.

**Ремонтпридатність** — властивість об'єкта, що характеризує його пристосованість до відновлення роботоздатного стану шляхом технічного обслуговування і ремонту. Дані заходи включають попередження і виявлення відмов і пошкоджень, а також встановлення причин, які їх зумовлюють.

**Збережуваність** — властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, які характеризують здатність об'єкта виконувати необхідні функції до і після зберігання і (або) транспортування.

Указані найважливіші властивості надійності характеризують певні технічні стани об'єкту. Розрізняють п'ять основних видів технічного стану об'єктів.

**Справний стан** — стан об'єкта, при якому він відповідає всім вимогам нормативно-технічної та (або) конструкторської (проектної) документації.

**Несправний стан** — стан об'єкта, при якому він не відповідає хоч би одній з вимог нормативно-технічної та (або) конструкторської (проектної) документації.

**Роботоздатний стан** — стан об'єкта, при якому значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної та (або) конструкторської (проектної) документації.

**Нероботоздатний стан** — стан об'єкта, при якому значення хоч би одного параметра, що характеризує здатність виконувати задані функції, не відповідає вимогам нормативно-технічної та (або) конструкторської (проектної) документації.

**Граничний стан** — стан об'єкта, при якому його подальша експлуатація недопустима або недоцільна, тому що відновлення його роботоздатного стану неможливе або недоцільне.

Перехід об'єкта (виробу) з одного зазначеного технічного стану в інший відбувається внаслідок подій — пошкоджень або відмов.

## 8.2. Економічний аспект надійності

Показником надійності з економічної точки зору може слугувати відношення суми витрат, пов'язаних із виготовленням і експлуатацією об'єкта, до терміну його експлуатації:

$$K_e = \frac{Q_{\text{виг}} + Q_{\text{експ}}}{T_e},$$

де  $K_e$  — економічний показник надійності;

$Q_{\text{виг}}$  — вартість виготовлення об'єкта;

$Q_{\text{експ}}$  — сумарні затрати на експлуатацію, ремонт і обслуговування об'єкта;

$T_e$  – період експлуатації об'єкту.

Необхідно прагнути до мінімального значення цього показника за рахунок раціонального розподілу капіталовкладень між сферою виробництва і сферою експлуатації.

Порівняння різних варіантів досягнення необхідного рівня надійності триботехнічної системи повинно ґрунтуватися на умові одержання найбільшого сумарного економічного ефекту з урахуванням затрат при виробництві й експлуатації та визначенням того позитивного економічного ефекту, який дає використання об'єкта за призначенням.

Загалом зміна в часі сумарного економічного ефекту при експлуатації машин складає:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{виг}} - Q_{\text{експ}} + Q_{\text{пр}}$$

де  $Q_{\text{виг}}$  – витрати на виготовлення машини;

$Q_{\text{експ}}$  – витрати на експлуатацію, які включають технічне обслуговування та ремонт;

$Q_{\text{пр}}$  – прибуток, який одержують при експлуатації (позитивний ефект).

У початковий період експлуатації машин  $T_1$  повертаються витрати, які були передбачені при проектуванні, дослідженні, виробництві, транспортуванні нової машини (рис. 52).

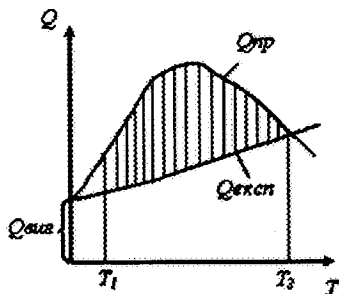


Рис. 52. Модель економічної ефективності об'єкту.

У цей термін об'єкт характеризується нульовим позитивним ефектом. Економічно ефективним є період експлуатації машини  $T_1$ — $T_2$ , коли використання транспортного засобу приносить прибуток, оптимізуються всі експлуатаційні можливості об'єкта, при цьому витрати на технічне обслуговування та ремонт мінімальні.

При тривалій експлуатації машини виявляються техніко-економічні наслідки зниження її надійності, що призводять до простою, усунення відмов, придбання запасних частин. Період, де виконується умова  $Q_{виз} + Q_{експ} > Q_{пр}$ , вважається граничною межею експлуатації, оскільки витрати на технічне обслуговування та ремонт перевищують позитивний ефект від прибутку, подальша експлуатація машини недоцільна.

### 8.3. Числові характеристики випадкових величин

У теорії імовірності та математичній статистиці використовується ряд понять, які є основними: дослід (експеримент, випробування, спостереження), подія, імовірність і випадкова величина.

**Дослід** — це практичне створення відтворюваної сукупності умов, у яких спостерігається певне явище та фіксується результат. Дослід не обов'язково повинен бути поставлений людиною, він може відбутись незалежно від неї. При цьому від людини залежить тільки рішення, що саме спостерігати та які параметри фіксувати.

**Подія** — це явище, яке очікується в результаті дослідів. Воно може статися або не статися.

**Імовірність** — величина, що чисельно характеризує можливість появи (або не появи) події, яка вивчається. Розрізняють математичну (або теоретичну) та дослідну (або статистичну) імовірності. Математична імовірність події  $x$  ( $P(x)$ ) може бути визначена як відношення кількості випадків  $m$ , які сприяють появі події, до кількості всіх можливих подій  $n$ :

$$P(x) = m/n.$$

Імовірність події приймає значення від нуля до одиниці:  $0 < P(x) < 1$ .

Імовірність як міра можливості появи події стає визначеною характеристикою цієї події, якщо усереднюються результати великої кількості спостережень.

Основними параметрами, які характеризують роботу об'єктів у часі і використовуються для оцінки їх надійності, є випадкові величини.

**Випадкова величина** — це змінна, яка в результаті досліду може приймати різні, заздалегідь невідомі значення. Випадкові величини бувають:

— **дискретні (перервні)** — величини, які можуть мати тільки цілі числові значення (кількість відмов, ремонтів);

— **безперервні** — величини, які приймають будь-які значення в певних межах, тобто відображаються не тільки цілими числами, а й дробовими (напрацювання до відмови, величина зносу деталі).

Випадкова величина найбільш повно може бути задана функцією розподілу, яка визначає для кожного значення  $x$  імовірність того, що випадкова величина  $X$  прийме значення, менше, ніж  $x$ , тобто:

$$F(X) = P(X < x).$$

Із цього визначення випливає, що функція розподілу завжди є спадаючою. Визначення імовірності як деякої нормованої міри (міра всієї множини елементарних подій дорівнює 1) показує, що значення функції розподілу при необмеженому зростанні  $x$  прямує до 1, а при необмеженому спаданні  $x$  — прямує до 0.

Співвідношення, яке встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини та відповідним цим значенням імовірностями, називається **законом розподілу**.

Універсальний спосіб задання закону розподілу випадкової величини будь-якої природи полягає у використанні математичних функцій — інтегральної  $F(x)$  і диференційної  $f(x)$ .



Коли змінна  $X$  проходить через яке-небудь із можливих значень дискретної величини  $x$ , функція розподілу змінюється стрибко-подібно, причому величина стрибка дорівнює імовірності цього значення. Для значення  $X_5$  функція  $F(x)$  змінюється на величину

$P_5$  і досягає одиниці, оскільки  $\sum_{i=1}^n P_i = 1$  (рис. 53).

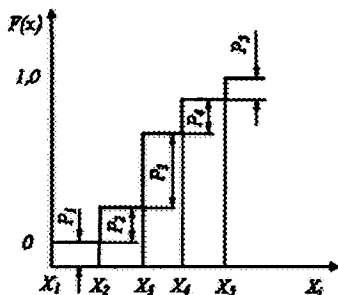


Рис. 53. Функція розподілу дискретної випадкової величини.

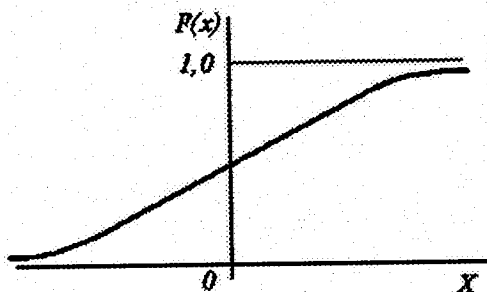
Представлену функцію розподілу дискретної випадкової величини  $F(x)$  називають **інтегральним законом розподілу**.

При великій кількості значень випадкової величини її функція розподілу буде мати відповідно більше число стрибків, і, переходячи до безперервної випадкової величини, одержимо безперервну функцію розподілу.

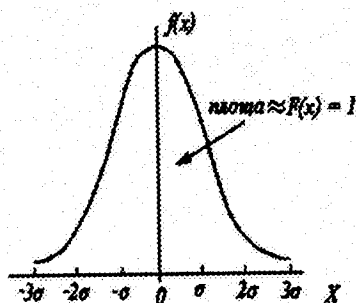
Допустимо, що функція  $F(x)$  безперервна і диференціюється:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$

Похідна від неї характеризує щільність, з якою розподіляється значення випадкової величини в даній точці. Функція  $f(x)$  називається щільністю розподілу випадкової величини  $X$  або **диференційним законом** (рис. 54).



a)



б)

Рис. 54. Функція  $F(x)$  (а) та щільність  $f(x)$  (б) розподілу безперервної випадкової величини.

Слід зазначити, що для дискретної випадкової величини функції щільності розподілу не існує.

Диференційна функція має такі основні властивості:

1. Щільність розподілу невід'ємна, тобто:  $f(x) > 0$ .
2. Інтеграл від диференційної функції у нескінченних межах (від  $-\infty$  до  $+\infty$ ) дорівнює одиниці,

$$\text{тобто } \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1.$$

У графічному зображенні це означає, що вся площа криволінійної трапеції, обмеженої віссю абсцис і графіком диференційної функції, дорівнює одиниці (рис. 54, б).

На практиці найчастіше не має потреби описувати випадкову величину через функцію або графік, це пов'язано зі складними експериментами, затратами часу, праці і коштів. Досить знати окремі числові параметри, які характеризують, наприклад, деяке середнє, навколо якого будуть групуватися можливі значення випадкової величини.

З характеристик положення в теорії імовірності найважливішу роль відіграє математичне очікування випадкової величини. Розглянемо дискретну випадкову величину  $X$ , що має можливі значення  $x_1, x_2, \dots, x_n$  з імовірностями  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Нам потрібно охарактеризувати якимсь чисельним положенням значення випадкової величини  $X$  на осі абсцис з урахуванням того, що ці значення мають різні імовірності. Визначимо середнє значення випадкової величини  $X$ , яке позначимо  $M(X)$ :

$$M(X) = \frac{x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i}$$

Враховуючи, що  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ , то

$$M(X) = \sum_{i=1}^n x_i p_i$$

Це середнє значення називається математичним очікуванням.

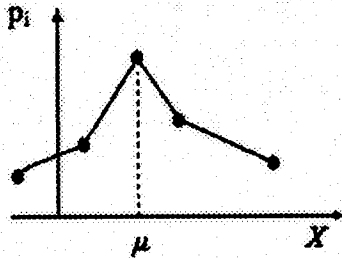
**Математичним очікуванням випадкової величини** (центром розподілу) називається сума добутків усіх можливих значень випадкової величини на імовірність цих значень.

Одержана формула для математичного очікування відповідає випадку дискретної випадкової величини. Для безперервної випадкової величини  $X$  математичне очікування виражається інтегралом:

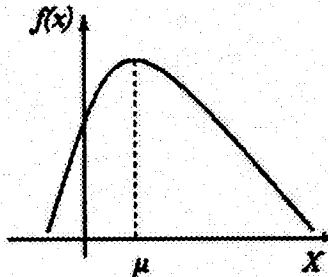
$$M(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x) dx,$$

де  $f(x)$  — щільність розподілу величини  $X$ .

Іншою характеристикою положення є мода. **Модю** ( $\mu$ ) випадкової величини називають її найбільше випадкове значення (рис. 55).



а)



б)

Рис. 55. Положення моди ( $\mu$ ) перервної (а) та безперервної (б) випадкових величин.

Якщо крива розподілу має більш, ніж один максимум, то розподіл називається "полімодальним" (рис. 56).

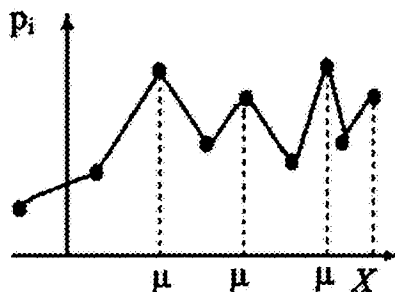


Рис. 56. Полімодальний розподіл випадкової величини.

**Дисперсією випадкової величини ( $D(X)$ )** називають математичне очікування суми добутків квадрату відхилення цієї величини від її математичного очікування на імовірність цих значень:

$$D(X) = \sum_{i=1}^n (x_i - M(X))^2 p_i \text{ — для дискретної величини,}$$

$$D(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x_i - M(X))^2 f(x) dx \text{ — для безперервної величини.}$$

Дисперсія має розмірність квадрата випадкової величини. Для наочної характеристики розсіювання користуються величиною, розмірність якої збігається з розмірністю випадкової величини. Це **середнє квадратичне відхилення** ( $\sigma$ ) або стандартне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{D(X)}.$$

Розсіювання у відносних одиницях характеризується коефіцієнтом варіації ( $V$ ), який визначається як відношення  $\sigma$  до  $M(X)$ :

$$V = \sigma / M(X).$$

Середнє квадратичне відхилення і коефіцієнт варіації є відомою "мірою" надійності середніх. Чим менші  $\sigma$  та  $V$ , тим однорідніша сукупність події та тим надійніше обчислена середня величина (рис. 57).

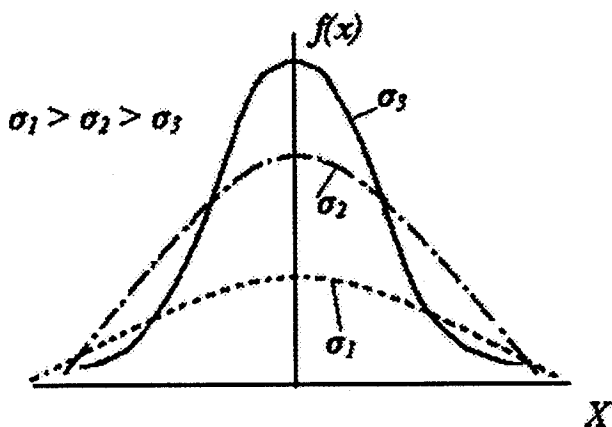


Рис. 57. Вплив середнього квадратичного відхилення на розмах варіації.

## 9. ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

### 9.1. Критерії оцінки безвідмовності системи

Однією із складових надійності є **безвідмовність**, яка характеризує властивість системи зберігати роботоздатність без вимушених відмов протягом заданого часу або пробігу. **Роботоздатність** — це стан триботехнічної системи, при якому вона здатна виконувати задані функції, зберігаючи значення даних параметрів у межах, установлених нормативно-технічною документацією. Нормативно-технічна документація передбачає методи технічного обслуговування та ремонту, встановлює оптимальні норми параметрів та діапазон їх допустимих відхилень, визначає допустимий рівень впливу зовнішніх чинників. Роботоздатність об'єкта пов'язана не тільки із спроможністю виконувати певні функції, але й із тим, щоб вихідні параметри виробу знаходились у допустимих межах.

Порушення роботоздатності об'єкта проявляється в його **відмові**. Відмова може виникнути через деякий проміжок часу, який є випадковою величиною.

Існує ще два поняття, які характеризують стан об'єкта. **Пошкодження** — подія, що полягає в порушенні справного стану об'єкта при збереженні роботоздатності. **Дефект** — кожна окрема невідповідність об'єкта встановленим нормам або вимогам, при яких об'єкт зберігає роботоздатність.

Дані поняття відображають стан, відмінний від відмови. Відповідно до визначення відмови як події, що полягає в порушенні роботоздатності, передбачається, що до появи відмови об'єкт був роботоздатний. Відмова може бути наслідком неусунених пошкоджень або наявності дефектів: подряпин, ділянок розвитку корозії, невеликих деформацій.

Залежно від причини виникнення відмови слід по-різному оцінювати і час роботи об'єкта. Існує два основних випадки

(табл. 9). Перший — коли час оцінюється календарною тривалістю роботи об'єкта. Це характерно для таких причин порушення роботоздатності об'єкту, як корозія, вплив зовнішніх чинників (температури, опромінення) та ін. Час роботи до відмови об'єкту в цьому разі називається **терміном служби до відмови**.

Однак для більшості машин та механізмів основне значення для оцінки втрати роботоздатності має не календарний час, а тривалість роботи об'єкта або відповідний їй об'єм виконаної роботи (кількість циклів, кілометри пробігу, виготовлення продукції та ін.). Час роботи об'єкта до відмови (в годинах) за такими критеріями називається **наробіткою до відмови**.

Табл. 9. Оцінка тривалості експлуатації триботехнічної системи

Час роботи	Час роботи до відмови (випадкова величина)	Регламентований час роботи об'єкту (детермінована величина)
В календарних годинах	$T$ — термін служби до відмови	$T_{сл}$ — тривалість служби
В відпрацьованих годинах	$T$ — наробітка до відмови	$T_p$ — ресурс

Триботехнічна система характеризується, як правило, не одним, а декількома вихідними параметрами. Термін служби або наробітка до відмови — це час досягнення граничного значення будь-яким із його вихідних параметрів. Якщо термін служби або наробітка до відмови регламентовані, то ці показники називаються відповідно тривалістю служби та ресурсом. Ресурс обчислюється як сумарне напрацювання об'єкту від початку його експлуатації або його відновлення після ремонту до переходу в граничний стан. Після настання граничного стану система списується або направляється в ремонт.



## Імовірність безвідмовної роботи

Основним показником оцінки безвідмовної роботи об'єкта є імовірність безвідмовної роботи. **Імовірність безвідмовної роботи ( $P(t)$ ) або коефіцієнт надійності** — це імовірність того, що в заданому інтервалі часу технічна система буде знаходитись в робото-здатному стані або не настане відмова.

Функція  $P(t)$  характеризує зміну надійності в часі та є достатньо наочною оцінкою. Наприклад, якщо імовірність безвідмовної роботи машини протягом  $T = 100$  годин дорівнює 0,95, це означає що із більшої кількості машин даної моделі у середньому біля 5 відсотків машин втратять свою робото-здатність раніше, ніж через 100 годин роботи.

На практиці цей показник визначається статистичною оцінкою (за умови, коли об'єкт, у якому встановлена відмова, не відновлюється та не замінюється справним):

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0},$$

де  $N_0$  — загальна кількість однакових дослідних об'єктів (елементів);

$n(t)$  — кількість об'єктів, для яких установлена відмова за час  $t$ .

Імовірність безвідмовної роботи ( $P(t)$ ) та імовірність появи відмови ( $F(t)$ ) утворюють повну групу подій, тому

$$P(t) + F(t) = 1.$$

Допустимі значення  $P(t)$  вибираються залежно від ступеня безпеки відмови. Наприклад, для авіаційної техніки допустимі значення коефіцієнта надійності складають  $P(t) = 0,9999$ , тобто  $P(t) \rightarrow 1$ , для автотранспортних засобів —  $P(t) \sim 0,8-0,9$ .

На рис. 58 криві  $P_1(t)$  та  $F_1(t)$  перетинаються в точці, що відповідає середньому терміну напрацювання об'єкта  $t = T_{сер}$ , при якому  $P_1(t) = F_1(t) = 0,5$ .

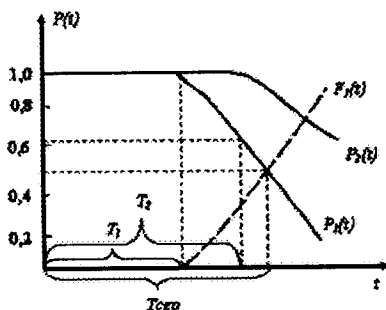


Рис. 58. Зміна ймовірності безвідмовної роботи ( $P(t)$ ) та ймовірності появи відмови ( $F(t)$ ) при наробітці об'єкта.

Крива  $P_2(t)$  характеризує більш надійну систему, для якої ймовірність безвідмовної роботи наближається до 1 при тривалості терміну напрацювання  $t=T_2$ . Установлюючи оптимальний термін напрацювання ( $T$ ), забезпечують відповідне значення ймовірності безвідмовної роботи системи, оскільки вони пов'язані функціональною залежністю:

$$P(t) = \int_{t-T}^{\infty} f(t) dt ,$$

де  $f(t)$  — щільність розподілу терміну служби системи до відмови за даними вихідними параметрами.

Хоч значення  $P(t)$  за відповідний період часу  $t = T$  і є основним показником безвідмовності, бувають випадки, коли воно перестає бути наочним і вимагає додаткових показників.

## *Середня наробітка до відмови*

*Середньою наробіткою до відмови* ( $T_{сер}$ ) називається математичне очікування наробітки об'єкта до першої відмови.

Значення  $T_{сер}$  обчислюють за рівнянням:

$$T_{сер} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt$$

Таким чином, середня наробітка до відмови дорівнює площі, яка утворена кривою імовірності безвідмовної роботи  $P(t)$  та осями координат. Статистична оцінка  $T_{сер}$  для невідновлюваних виробів визначається за формулою:

$$T_{сер} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^n t_i$$

де  $N_0$  — загальна кількість однакових дослідних роботоздатних об'єктів при  $t=0$  (в початковий період випробувань);

$t_i$  — наробітка до відмови  $i$ -го об'єкта.

Точність визначення  $T_{сер}$  залежить від кількості об'єктів, які випробовують на надійність. Інший спосіб точного визначення  $T_{сер}$  виконують через визначення закону розподілу.

Зазначимо, що середня наробітка до відмови може визначатися не тільки в годинах, але й у циклах, кілометрах пробігу та ін.

## *Інтенсивність відмов*

*Інтенсивність відмов* — це умовна щільність імовірності виникнення відмови невідновлюваного об'єкта, яка обчислюється за умови, що до визначеного моменту часу відмови не було.

Обчислюється  $\lambda(t)$  за визначенням:

$$P(t)\lambda(t)\Delta t = f(t)\Delta t,$$

де  $P(t)$  — імовірність безвідмовної роботи за час  $t$ ;

$f(t)$  — щільність напрацювання до відмови.

Звідси:  $\lambda(t) = f(t)/P(t)$ . Інтенсивність відмов ще називають небезпечністю відмов, щільністю потоку відмов.

Статистична оцінка інтенсивності відмов обчислюється за рівнянням:

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{сер}i} \cdot \Delta t_i},$$

де  $n(\Delta t_i)$  — кількість відмов однакових об'єктів на інтервалі  $\Delta t_i$ ;

$N_{\text{сер}i}$  — кількість робоздатних об'єктів в інтервалі  $\Delta t_i$ .

Якщо інтервал  $\Delta t_i$  зменшується до нульового значення ( $\Delta t_i \rightarrow 0$ ), то

$$N_{\text{сер}i} = N_0 - n(t) - \frac{n(\Delta t_i)}{2},$$

де  $N_0$  — загальна кількість об'єктів, які випробовуються;

$\Delta t_i$  — інтервал, який продовжує початковий час  $t$ ;

$n(\Delta t_i)$  — кількість відмов об'єктів на інтервалі  $\Delta t_i$ .

Розглянемо залежність інтенсивності відмов трибомеханічних систем від часу роботи системи. Якщо побудувати графік залежності інтенсивності відмов від часу, то одержимо криву, показану на рис. 59.

На цій кривій можна виділити три періоди: I — ранні відмови II — випадкові відмови і III — відмови внаслідок зносу. Період I характеризується зменшенням інтенсивності відмов із часом, наприклад внаслідок ефективного припрацювання. Період постійної інтенсивності відмов II є режимом нормальної роботи. У цьому режимі відмова виникає через статистично незалежні

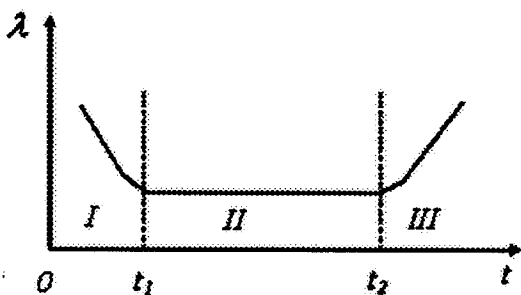


Рис. 59. Залежність інтенсивності відмов від часу.

чинники. Період III характеризується підвищенням інтенсивності відмов із часом. У цьому режимі відмова може бути результатом явищ старіння, зношування, корозії і под. Інтенсивність більшості обумовлених трибологічними процесами відмов зростає з часом. Таким чином, період III відноситься до нормального виду відмов механічних систем внаслідок зношування елементів трибоспряження.

Отже, можна сказати, що більшу частину часу робота об'єктів характеризується постійною інтенсивністю відмов:

$$\lambda(t) = \text{const}$$

Ми розглянули простіший стаціонарний потік, який не залежить від часу. Якщо  $\lambda(t) \neq \text{const}$ , то потік відмов уже не буде найпростішим, і характеристика надійності буде описуватися іншими залежностями.

### **Параметр потоку відмов**

Розглянемо період експлуатації відновлюваних об'єктів  $T = t$ , протягом якого, як правило, виникають відмови, і, відповідно,  $P(t) \rightarrow 0$ . Це характерно для таких відмов, які легко усуваються і

не призводять до яких-небудь значних наслідків, наприклад, заміна ріжучого інструменту при роботі верстата.

У цьому разі характеристикою безвідмовності може слугувати ведуча функція  $\Omega(t)$  — *середня кількість відмов* (математичне очікування числа відмов) за час  $t$ . Експлуатація багатьох ремонтонаних виробів описується так. У початковий момент часу виріб починає роботу і працює без відмови. Після відмови відбувається відновлення об'єкта і об'єкт знову працює до відмови і т.д. Моменти відмов без урахування часу відновлення утворюють потік відмов.

*Параметр потоку відмов* ( $\omega(t)$ ) представляє собою щільність імовірності виникнення відмови відновлюваного об'єкта,  $\omega(t)$  характеризує середню кількість відмов, що відбуваються у малому інтервалі часу і пов'язаний з ведучою функцією співвідношенням:

$$\Omega(t) = \int_0^t \omega(t) dt$$

Параметр потоку відмов ремонтонаних виробів за статистичними даними визначається за формулою:

$$\omega(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1},$$

де  $n(t_1)$  і  $n(t_2)$  — кількість відмов об'єкта, зафіксованих відповідно протягом періодів  $t_1$  та  $t_2$ .

Якщо відновлюваний об'єкт за умов відсутності відновлення характеризується  $\lambda = const$ , то відновлюючи об'єкт, ми створюємо умови  $\omega(t) = const$ ,  $\omega = \lambda$ :

$$\lambda = \omega = 1/T_{сер.}$$

Ця властивість широко використовується в розрахунках надійності ремонтованих виробів.

## 9.2. Показники для оцінки довговічності

Показники довговічності оцінюють втрату роботоздатності об'єкта за весь період його експлуатації.

### ***Середній термін служби (математичне очікування терміну служби)***

Для відновлюваного об'єкта середній термін служби ( $T$ ) є середньою календарною тривалістю експлуатації об'єкта від її початку або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Значення  $T$  визначається граничнодопустимою величиною вихідного параметра  $X = X_{max}$  і деякими випадковими процесами втрати роботоздатності, наприклад, зносом виробу, його корозією та ін. Термін служби (напрацювання) до відмови  $t = T$  є величиною випадковою і характеризується деяким законом розподілу, наприклад щільністю імовірності  $f(t)$  і числовими характеристиками— математичним очікуванням  $M(T)$ , дисперсією  $D=\sigma^2$  та ін.

### ***Середній ресурс (математичне очікування ресурсу)***

***Середній ресурс*** є середнім напрацюванням об'єкта від початку експлуатації або його відновлення після ремонту до настання граничного стану. При експлуатації об'єктів важливо так підібрати їх функціональні характеристики, стратегію технічного обслуговування і ремонту, режими та умови роботи, щоб термін служби і термін ресурсу співпадали.

Оскільки середній і капітальний ремонти дають змогу частково або повністю відновити ресурс, то відлік напрацювання при визначенні ресурсу відновлюють після закінчення такого ремонту, розрізняючи у зв'язку з цим доремонтний, міжремонтний,

післяремонтний і повний (до списання) ресурс. Повний ресурс визначають від початку експлуатації об'єкта до його переходу в граничний стан, що відповідає остаточному припиненню експлуатації.

Використовується також такий показник довговічності, як гама-процентний ресурс, що представляє напрацювання, протягом якого об'єкт не досягає граничного стану із заданою імовірністю процентів.

Гама-процентний ресурс має велике практичне значення та визначається експериментально. Як показник оцінки довговічності сприяє скороченню часу випробувань (спостережень), оскільки випробування проводять до вичерпування ресурсу порівняно невеликої кількості машин (10–20%). Для галузі машинобудування значення  $\gamma = 80\%$ , тобто у 80% машин ресурс при випробуванні або спостереженні повинен перевищувати встановлену величину  $t_{\gamma 80}$ .

Для нормального закону розподілу терміну служби до відмови гама-процентний ресурс обчислюють за рівнянням:  $P(t_\gamma) = \gamma/100$ , для експоненціального —

$$t_\gamma = t_0 \left( - \ln \frac{\gamma}{100} \right) = T_{\text{сер}} \left( - \ln \frac{\gamma}{100} \right).$$

Слід застерегти про досить поширену помилку, коли вважають, що виріб, як правило, працює до відмови. Це стосується досить обмеженої кількості деталей і вузлів, які несуттєво впливають на роботоздатність машини. Типовим для виробів машинобудування є випадок, коли термін служби або ресурс регламентовані і деталь, яка ремонтується або замінюється, має ще потенційну роботоздатність, бо не досягла граничного стану в експлуатаційний період.

Якщо довговічність простого елемента характеризується одним показником  $T$ , то зовсім інший випадок для складного виробу або машини, які нараховують десятки або сотні тисяч елементів з різними термінами служби.



Навіть одна деталь має, як правило, не один, а декілька термінів служби у відповідності до тих причин, які зумовлюють відмову, і тих вихідних параметрів, за якими оцінюють якість деталі. Наприклад, вал машини може вийти з ладу в результаті зносу шийки, змінання шліців, деформації тіла валу і його втомного руйнування. Відповідно і методи відновлення втраченої роботоздатності будуть різні: шліфування шийки валу, відновлення шліців, правка валу, його заміна при поломці.

Довговічність складного виробу повинна оцінюватися з урахуванням термінів служби (напрацювання) окремих його елементів.

### 9.3. Основні показники ремонтпридатності

При кількісному визначенні цієї характеристики, яка властива тільки відновлюваному об'єкту, час відновлення є випадковою величиною, яка залежить від цілого ряду чинників: характеру встановленої відмови, пристосованості об'єкта до швидкого виявлення відмови, кваліфікації обслуговуючого персоналу, наявності технічних засобів, швидкості заміни елемента, який відмовив у об'єкті та ін. Час відновлення — це час, що витрачається на виявлення, пошук, установлення причин появи відмови та усунення наслідків відмови.

#### *Середній час відновлення*

*Середній час відновлення* — це математичне очікування часу відновлення роботоздатного стану об'єкта після настання відмови.

$$T_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i,$$

де  $n$  — кількість відновлень, яка відповідає кількості відмов;

$\tau_i$  — час, витрачений на відновлення (виявлення, пошук причини і усунення відмови), у год.

### **Інтенсивність відновлення**

**Інтенсивність відновлення** ( $\mu(t)$ ) — це відношення умовної щільності імовірності відновлення роботоздатного стану об'єкта, визначеної для даного моменту часу за умови, що до цього моменту відновлення не було завершено, до тривалості цього інтервалу.

Статистична оцінка  $\mu(t)$  знаходиться як:

$$\mu(t) = \frac{n_B(\Delta t)}{N_{H_{сер}} \cdot \Delta t},$$

де  $n_B(\Delta t)$  — кількість відновлень однакових об'єктів за інтервал;  $N_{H_{сер}}$  — середня кількість об'єктів, що знаходяться в невідновленому стані на інтервалі  $\Delta t$ .

В окремому випадку, коли інтенсивність відновлення постійна, тобто  $\mu(t) = const$ , імовірність відновлення за заданий час  $t$  підкоряється експоненціальному закону і визначається за формулою:

$$P_B(t) = 1 - e^{-\mu t}.$$

Використовуючи властивості цього розподілу, запишемо важливі залежності, які часто використовуються при аналізі відновлюваних систем:

$$T_B = 1/\mu \text{ та } \mu = 1/T_B.$$

#### 9.4. Комплексні показники надійності

##### *Коефіцієнт технічного використання і коефіцієнт готовності*

Процес функціонування відновлюваного об'єкта можна представити як послідовність інтервалів роботоздатності ( $t_i$ ) і відновлення (простою ( $\tau_i$ )), які чергуються під час експлуатації об'єкта (рис. 60).

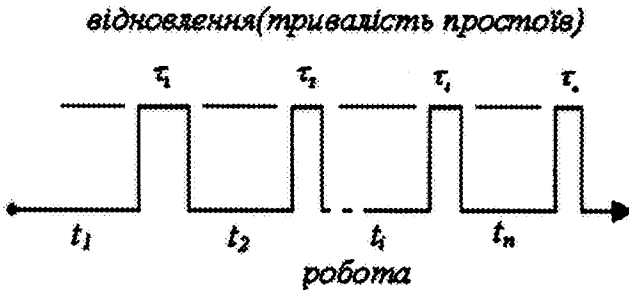


Рис. 60. Графік функціонування відновлюваного об'єкта.

**Коефіцієнт технічного використання ( $K_{ТВ}$ )** дорівнює відношенню математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в роботоздатному стані за деякий період експлуатації до математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в роботоздатному стані і простоїв, зумовлених технічним обслуговуванням і ремонтом за той же період експлуатації:

$$K_{ТВ} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i + \sum_{j=1}^k \tau_j}$$

де  $t_i$  — час збереження робоздатності в  $i$ -му циклі функціонування об'єкта;

$\tau_i$  — час відновлення (ремонт) після  $i$ -ї відмови об'єкта;

$\tau_j$  — тривалість виконання  $j$ -ї профілактики, що вимагає виведення об'єкта з працюючого стану (використання за призначенням);

$n$  — кількість робочих циклів за даний період експлуатації;

$m$  — кількість відмов (відновлень) за даний період;

$k$  — кількість профілактик, які передбачають зупинення експлуатації об'єкту в даний період.

Коефіцієнт технічного використання є безрозмірною величиною ( $0 < K_{ТВ} < 1$ ). Він чисельно дорівнює імовірності того, що в даний, довільно взятий момент часу, об'єкт працює, а не ремонтується.  $K_{ТВ}$  характеризує частку часу знаходження об'єкта в робоздатному стані щодо загальної (календарної) тривалості експлуатації.

Сумарний час вимушеного простою об'єкта включає терміни на пошук і усунення відмови, на відрегулювання функціональних властивостей об'єкта після усунення відмови, на простій через відсутність запасних елементів та терміни для проведення профілактичних робіт.

**Коефіцієнт готовності ( $K_G$ )** — це імовірність того, що об'єкт знаходиться робоздатному стані в довільний момент часу, окрім запланованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається. Цей показник одночасно оцінює властивості робоздатності і ремонтпридатності об'єкта.

Для одного ремонтovanого об'єкту коефіцієнт готовності визначається:

$$K_G = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n \tau_i}$$

З цього видно, що коефіцієнт готовності об'єкта може бути підвищений за рахунок збільшення напрацювання на відмову ( $t_i$ ) і зменшення середнього часу відновлення ( $\tau_i$ ). Для визначення  $K_G$  необхідний достатньо тривалий календарний термін функціонування об'єкта.

Коефіцієнт готовності є зручною характеристикою для об'єктів, які призначені для тривалого функціонування, а вирішують поставлене завдання протягом короткого проміжку часу (знаходяться в режимі "очікування"), наприклад, релейний захист, контактна мережа (особливо при відносно малих розмірах руху), складна контрольна апаратура та ін.

$K_{ТВ}$  відрізняється від  $K_G$  тим, що при його визначенні враховується весь час вимушених простоїв, тоді як при визначенні  $K_G$  час простою, пов'язаний з проведенням профілактичних робіт, не враховується.

### ***Коефіцієнт оперативної готовності***

Коефіцієнт оперативної готовності ( $K_{OG}$ ) визначається як імовірність того, що об'єкт характеризується робоздатним станом у довільний момент часу (окрім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається) і, починаючи з цього моменту, працюватиме безвідмовно протягом заданого інтервалу часу.

Із зазначеного виходить, що

$$K_{OG} = K_G \cdot P(t_p)$$

де  $K_G$  — коефіцієнт готовності;

$P(t_p)$  — імовірність безвідмовної роботи об'єкта протягом часу ( $t_p$ ), необхідного для безвідмовного використання за призначенням.

## 10. КЛАСИФІКАЦІЯ ВІДМОВ

### 10.1. Аналіз закономірностей, які зумовлюють зміни в матеріалах

Зміна початкових властивостей та стану матеріалів, з яких виготовлений виріб, є причиною втрати його роботоздатності, оскільки ці зміни можуть призвести до пошкодження виробу та виникнення відмови. Чим глибше вивчені закономірності процесів зміни властивостей і стану матеріалів, тим достовірніше можливо прогнозувати стан виробу в даних умовах експлуатації та забезпечити стабільність показників надійності в межах, які вимагаються за нормативно-технічною документацією.

Знання фізичної закономірності процесу пошкодження виробу змінює можливості в оцінці протікання процесу порівняно з тим, коли цей процес оцінюється тільки на основі статистичних даних.

Наприклад, на зносостійкість металу суттєво впливають такі чинники, як його структура, хімічний склад та вид термообробки. Для сплавів позитивний вплив на підвищення зносостійкості здійснюють дрібнозерниста структура, наявність твердих структурних включень, що сприймають навантаження, наявність включень, які відіграють роль твердого змащувального матеріалу. Часто структура матеріалу здійснює такий вплив на процес зношування, що механічні характеристики матеріалу вже недостатні для оцінки інтенсивності процесу. Так, досліджування зношування чавуну для спрямовуючих ковзання верстатів, для гільз циліндрів ДВЗ показали, що твердість за Бринелем не визначає однозначно швидкості зношування. Необхідно враховувати також мікротвердість перліту, відстань між включеннями графіту, їх розміри та інші характеристики мікроструктури.

В основу втрати роботоздатності триботехнічною системою завжди покладені фізичні закономірності, але за умов багатofакторного

впливу параметрів при експлуатації ці залежності мають імовірнісний характер.

Нехай швидкість деякого процесу пошкодження металу є функція ряду входних параметрів  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  та часу  $t$  (залежність одержана на основі фізико-хімічних законів):

$$\gamma = dU/dt = \varphi(Z_1, Z_2, \dots, Z_n; t).$$

Параметри  $Z_i$  характеризують умови експлуатації, стан матеріалу та інші фактори, що впливають на протікання процесу пошкодження матеріалу. Однак, при наявності тільки функціональної залежності, яка достатньо достовірно описує даний процес, неможливо уявити як буде реалізовуватись процес пошкодження так які саме аргументи ( $Z_i$ ) є випадковими величинами (рис. 61).

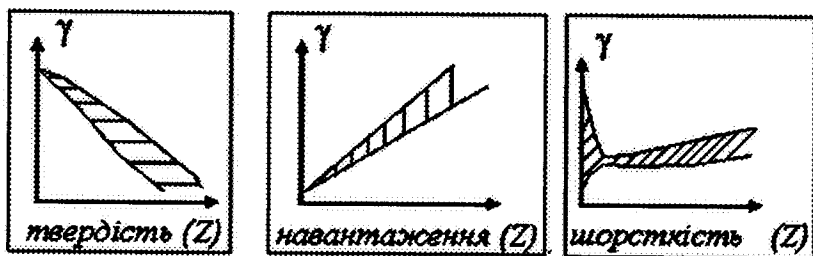


Рис. 61. Схеми залежності швидкості зношування від твердості матеріалу, навантаження та шорсткості контактних поверхонь.

При роботі триботехнічних систем відбуваються безперервні зміни і коливання навантажень, швидкостей, температур, крім того, окремі деталі виготовляються з різними допусками на технологічні параметри.

Функціональна залежність лише з відомим ступенем наближення відображає фізичну сутність процесу, але дозволяє прогнозувати можливість протікання процесу в різних ситуаціях.

Оскільки головним питанням є оцінка зміни властивостей та стану матеріалів у функції часу, необхідно виявити які фізичні

закономірності можуть використовуватися та як проявляється фактор часу при оцінці робоздатності виробу (рис. 62).

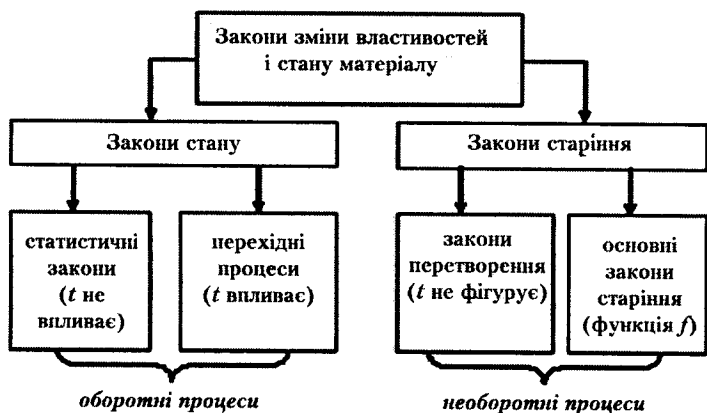


Рис. 62. Класифікація закономірностей, які оцінюють зміну властивостей і стану матеріалу.

**Закони стану** — це закономірності, які описують взаємозв'язки оборотних процесів, коли після припинення дії зовнішніх чинників матеріал відновлює початкові характеристики.

**Статистичні закони** — у функціональну залежність між вхідними та вихідними параметрами фактор часу не входить.

Наприклад, згідно із законами Гука та теплового розширення твердих тіл, деформація ( $\Delta l$ ) матеріалу визначається за формулою:

$$\Delta l = Pl/EF + \alpha Q,$$

де  $P$  — навантаження;

$l$  — довжина;

$E$  — модуль пружності;

$F$  — площа поперечного перетину;

$\alpha$  — коефіцієнт лінійного розширення;

$Q$  — температура.



При знятті зовнішніх впливів (навантаження, температури) деталь прийме вихідне положення ( $\Delta l = 0$ ). За нормативними документами деформація елемента не повинна перевищувати допустимого значення  $\Delta l < \Delta l_{\max}$ .

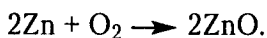
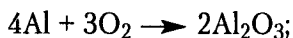
Хоча дані закони і не включають фактор часу, але можуть бути використані для розрахунку надійності, якщо відомі зміни характеристик виробу при експлуатації. Так, при зношуванні контактуючих пар поступово підвищується тепловиділення та збільшується навантаження в окремих ділянках, тобто  $Q \sim Q(t)$  і  $P \sim P(t)$ , відповідно буде змінюватися і деформація  $\Delta l \sim (t)$ .

**Перехідні процеси** — включають фактор часу, але не враховують змін, що відбуваються при експлуатації, так як відносяться до швидкоплинних процесів або процесів середньої швидкості. Наприклад, процеси коливальних пружних систем, теплопередача при нагріванні.

**Закони старіння** — розкривають фізичну сутність необоротних змін, що відбуваються у матеріалі.

**Закони перетворення** — час безпосередньо не фігурує, тому що в одержаних залежностях домінує зв'язок з іншими чинниками які у свою чергу залежать від часу.

Наприклад, термодинамічна інтенсивність окислення технічно чистих металів киснем зменшується в ряду: Al, Cr, Zn, Co, Ni, Cu, Pt, Ag. При хімічній корозії металів та сплавів, яка виникає при контакті з сухими газами та деякими мастильними матеріалами та інтенсифікується при підвищенні температури, проходять окислювальні реакції типу:



Для оцінки можливості виникнення хімічної корозії при окисленні металів користуються законами хімічної термодинаміки. Оскільки при окисно-відновлювальних корозійних реакціях

відбувається робота хімічного процесу, то чинником, який би характеризував інтенсивність процесу, може бути ізобарно-ізо-термічний потенціал  $G$  (функція Гіббса). Корозійний процес можливий за умов  $\Delta G_{298} < 0$ , а його інтенсивність характеризується абсолютним значенням  $\Delta G$ . За розрахунком  $\Delta G$  можливо визначати термодинамічну інтенсивність окислення та спорідненість металів до кисню.

**Зако́ни старіння** — оцінюють ступінь пошкодження матеріалу у функції часу. Ці закони є основою для розв'язання задач щодо надійності. Вони дозволяють прогнозувати протікання процесу старіння, оцінювати можливості його реалізації та виявляти найбільш суттєві чинники, що впливають на інтенсивність процесу. Типовим прикладом таких залежностей є закони зносу матеріалів, які на основі розкриття фізичної сутності взаємодії контактних поверхонь пропонують методи для розрахунку інтенсивності зношування у функції часу.

Оцінка швидкості протікання процесу пошкодження деталей з часом  $\gamma = dU/dt$  є необхідним етапом при встановленні ступеня по-

шкодження як функції часу 
$$U(t) = \int_0^t \gamma(t) dt$$

## 10.2. Поступові (зносні), раптові та складні відмови

**Поступові відмови** виникають унаслідок протікання процесів старіння, зносу контактуючих пар, що призводять до змін початкових параметрів виробу. Поява відмови залежить від швидкості процесу пошкодження:  $\gamma = dU/dt$ , де  $U$  — ступінь пошкодження;  $T_B$  — початок виникнення цього процесу (рис. 63).

Для поступової відмови  $T_B = 0$ , тобто при експлуатації об'єкта процес пошкодження починається відразу, навіть якщо на початку він практично не проявляється. В цьому разі швидкість процесу є функцією від часу  $\gamma(t)$ .

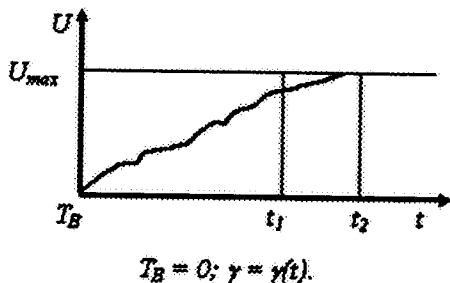


Рис. 63. Схема виникнення поступової відмови.

Основним критерієм поступової відмови є те, що імовірність її виникнення  $F(t)$  протягом заданого проміжку часу від  $t_1$  до  $t_2$  залежить від тривалості попередньої роботи виробу  $t_1$ . Чим більше експлуатувався виріб, тим вище імовірність виникнення відмови:  $F_2(t_2) > F_1(t_1)$  при  $t_2 > t_1$ .

До цієї категорії належить більшість відмов автомобіля, які зумовлені процесами зношування, корозії, втомленості та повзучості матеріалів.

**Раптові відмови** виникають в результаті поєднання несприятливих факторів і випадкових зовнішніх впливів, що призводять до перевищення можливостей виробу до їх сприйняття. Відмова виникає через деякий проміжок часу  $T_B$ , який є випадковою величиною і підпорядковується деякому закону розподілу  $f(T_B)$ , який не залежить від стану виробу. Процес протікає швидко  $\gamma \rightarrow \infty$ , тому функція  $f(T_B)$  визначає імовірність безвідмовної роботи (рис. 64). Основним критерієм раптової відмови є незалежність імовірності його виникнення  $F(t)$  протягом заданого проміжку часу від  $t_1$  до  $t_2$  від тривалості попередньої роботи виробу  $t_1$ .

До раптових відмов належать теплові тріщини, які виникають внаслідок припинення подачі мастильного матеріалу до контактуючих поверхонь, поломки деталі внаслідок перевищення експлуатаційних можливостей машини (температурних, кінематичних, навантажувальних факторів).

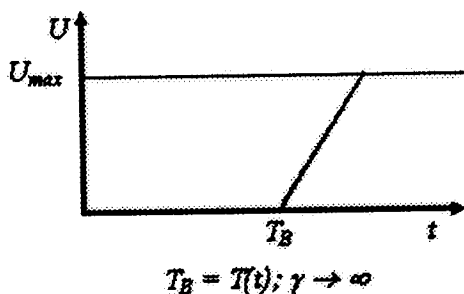


Рис. 64. Схема виникнення раптової відмови.

Відмова при цьому відбувається раптово, без попередніх ознак руйнувань.

Поділ на поступові та раптові відмови визначається природою їх виникнення, а не тим, встановлена чи ні причина відмови. Наприклад, причиною відмови автомобільної покришки може бути як її знос, так і прокол. Імовірність виникнення відмови покришки при тривалій експлуатації внаслідок зношування в багато разів більша, ніж для нової (поступова відмова). Імовірність виникнення відмови внаслідок проколу не пов'язана з тривалістю роботи покришки до даної події, вона однакова як для нових покришок, так і для тих, які експлуатуються, і залежить від стану доріг.

Раптовість відмови при експлуатації машини ще не означає, що відмова відноситься до раптової. Критерієм виникнення відмови є наявність або відсутність взаємозв'язку  $F(t)$  від часу попередньої роботи виробу.

Виникнення задиру контактуючих пар може призвести до втрати роботоздатності трибомеханічної системи внаслідок двох причин (рис. 65):

1) пошкодження поверхні може відбутися внаслідок попадання абразивної частки з зовнішнього середовища (**раптова відмова**);

2) пошкодження поверхні може відбутися при експлуатації виробу та обумовлено лінійним зносом поверхні до ділянки, де розташований дефект при виготовленні деталі (*поступова відмова*).

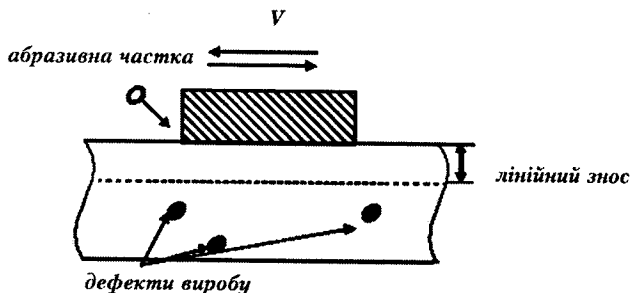


Рис. 65. Утворення поступової та раптової відмови об'єкта.

Зазначені відмови можуть виявлятися так само, як раптові, однак методи підвищення надійності системи будуть різні. В першому випадку підвищення безвідмовності пов'язане з поліпшенням методів експлуатації та захистом поверхонь тертя від забруднення (наприклад, створення додаткової системи фільтрації повітря). У другому випадку слід покращити технологічні умови виготовлення деталі, які зведуть до мінімуму імовірність утворення тріщини у виробі.

**Складна відмова** виникає за умов, коли час виникнення відмови — випадкова величина, що не залежить від стану виробу, а швидкість втрати робоздатності виробу залежить від його контактної витривалості (рис. 66).

Наприклад, перевищення навантаження на деталь (випадкова подія) може призвести до виникнення втомної тріщини внаслідок концентрації напруг. Але система буде продовжувати працювати до того часу, поки тріщина не досягне максимальних розмірів під час експлуатації виробу.

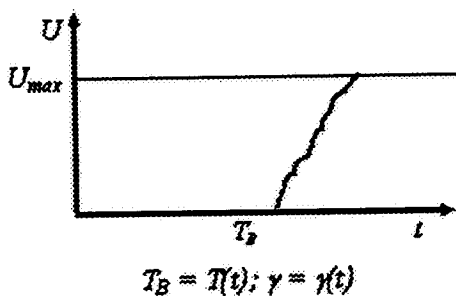


Рис. 66. Схема виникнення складної відмови.

### 10.3. Відмови функціонування та параметричні відмови

В основу класифікації покладено наслідки, які спостерігаються при реалізації відмови.

**Відмови функціонування** призводять до того, що механізм не може виконувати своїх функцій. Наприклад, у результаті відмови фільтр не очищує масло, редуктор не обертається, двигун внутрішнього згоряння не запускається і т.д. Часто такі відмови зумовлені зломом або заклинюванням окремих елементів виробу.

**Параметричні відмови** призводять до відхилення параметрів (характеристик) виробу за встановлені межі. Такі відмови як порушення точності обробки при виготовленні деталі, зниження ККД передачі, зниження максимальної швидкості руху автомобіля нижче норми не обмежують можливостей подальшого функціонування виробу, однак він стає нероботоздатним відповідно вимогам за технічними нормами.

Для сучасних машин при розширенні діапазону температурних та навантажувально-кінематичних експлуатаційних факторів найбільш характерні параметричні відмови. В складних машинах та системах параметричні відмови елементів можуть привести до відмови функціонування. Наприклад, в багатоланковому механізмі в результаті зносу кінематичних пар при експлуатації можливий випадок, коли поява задирів призведе до того, що відома ланка не буде переміщуватися.

Слід зазначити, що відмови функціонування та параметричні відмови можуть бути як поступовими так і раптовими. Наприклад, раптова відмова вимірювального приладу внаслідок дії зовнішніх факторів може бути:

- параметричною — втрата точності вимірювальних характеристик внаслідок перегріву приладу;
- функціонування — втрата роботоздатності приладу внаслідок заклинювання механізмів при роботі у запиленій атмосфері.

#### 10.4. Фактичні та потенційні відмови

В інструкціях щодо надійності різних машин при їх експлуатації, як правило, вказується, що відновлення роботоздатності окремих деталей чи вузлів згідно з правилами технічного обслуговування та ремонту, не є відмовою. Лише та втрата роботоздатності виробу, яка призводить до незапланованого ремонту, кваліфікується як відмова. Такий підхід неправильно трактує надійність машини, оскільки не враховуються потенційні відмови.

На основі статистичних даних про **фактичні відмови** можливо визначити критерій імовірності появи відмови внаслідок підвищення ступеня втрати роботоздатності виробу. Критерієм появи відмови є ступінь та інтенсивність руйнування деталі. За цими параметрами можливо встановити терміни найбільшої імовірності появи відмови виробом. Ці відмови класифікуються як **потенційні**. Поєднанням таких методів та підходів як організація систем ремонту та технічного обслуговування, вибір обґрунтованої системи управління якістю та надійністю при виробництві деталей, виконання правил експлуатації виробу, можливо попередити появу потенційної відмови.

#### 10.5. Допустимі та недопустимі відмови

**Допустимі відмови** зумовлені процесами старіння, які призводять до поступового погіршення вихідних параметрів

виробу. Також до допустимих відмов слід віднести раптові відмови, які пов'язані з небезпечним впливом зовнішніх факторів, якщо наслідки знаходяться в межах норм ТУ на експлуатацію. Інколи свідомо конструктор допускає імовірність виникнення відмови щоб конструкція була дешевша, але такі відмови не повинні призводити до катастрофічних наслідків.

**Недопустимі відмови** пов'язані з порушенням:

— умов виробництва (в конструкторській документації задані номінальні значення і показники якості готового виробу). Задача технолога полягає в оцінці якості процесу виготовлення згідно встановленим вимогам, при цьому не розглядається технічний стан самого виробу (наприклад, при загартуванні деталі порушення технологічного процесу призводить до одержання матеріалу меншої твердості  $H_0$ , що обумовлює збільшення швидкості зношування  $\gamma_0$  металу при експлуатації (рис. 67);

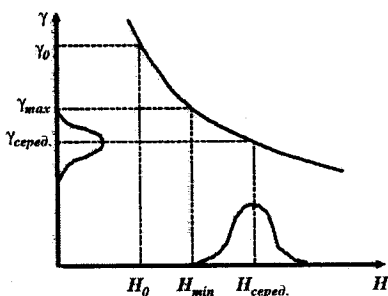


Рис. 67. Залежність швидкості зношування від твердості металу.

— порушення правил та умов експлуатації ремонту (перевищення режимів роботи машини, помилки людей при керуванні машиною, причини, які не відносяться до нормативних за нормами ТУ).



## 10.6. Вплив трибологічних процесів на відмови механічних систем

Розглядаючи причини відмови механічних систем, Коллакот виділив такі головні чинники:

- а) порушення правил експлуатації;
- б) втома;
- в) надмірна деформація;
- г) зношування;
- д) корозія;
- е) забруднення;
- ж) дефекти конструкції, виробничі дефекти і дефекти збірки.

Цей перелік показує, що є ряд причин відмови механічного устаткування, що не відносяться до трибологічних процесів. Це видно також з табл. 10, 11, де наведені характеристики відмов типових трибомеханічних систем, а саме підшипників кочення, підшипників ковзання і механічних зчеплень.

Табл. 10. Причини відмов підшипників кочення та ковзання

Причина відмови	Кількість відмов, %	
	Підшипники кочення	Підшипники ковзання
Виробничі дефекти	14,4	10,7
Дефекти конструкції, похибки розрахунків	13,8	9,1
Дефекти матеріалів деталей	1,9	3,6
Експлуатаційні похибки та неякісне обслуговування	37,4	39,1
Зношування	28,5	30,5
Зовнішні причини	4,0	7,0

У табл. 10 містяться результати досліджень причин відмов 1400 підшипників кочення і 530 підшипників ковзання. Видно, що 30% функціональних відмов цих трибомеханічних систем обумовлено процесами зношування.

Табл. 11. Типи пошкоджень механічних зчеплень

Типи пошкоджень	Кількість випадків, %
Злам внаслідок перенавантаження	60
Задир, захоплювання	18
Механічні та корозійні ушкодження поверхні	15
Тріщина	5
Деформація	2

Наведені приклади свідчать про те, що окрім трибологічних причин відмов є причини, що не стосуються трибології, які можуть призвести до відмови механічного устаткування.

## 11. ОСНОВНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ

Знання закономірностей зміни вихідних параметрів у часі (з урахуванням їх стохастичної природи) необхідне для побудови моделі, яка оцінює можливість виникнення відмови.

При протіканні процесу зміни вихідного параметра можливість виникнення відмови пов'язана із ступенем віддаленості параметра від його граничного стану. Оцінка цієї ситуації призводить до трьох основних випадків (рис. 68).

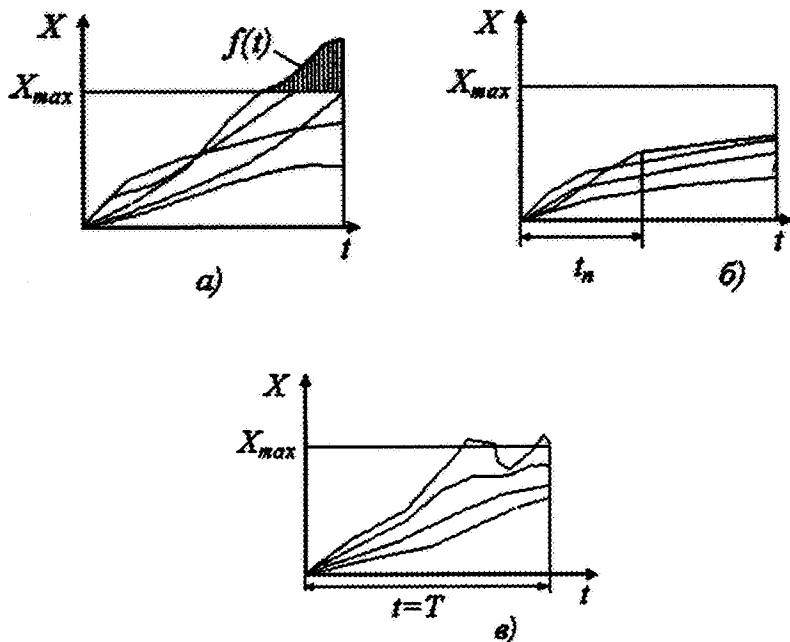


Рис. 68. Ступінь віддалення реалізації процесу наближення вихідного параметра  $X$  до граничного стану  $X_{max}$ .

Якщо за даний проміжок часу  $t = T$  окремі реалізації процесу зміни вихідного параметра в часі  $X(t)$  досягнуть граничного стану, то є імовірність виникнення відмови (рис. 68, *a*). Ця імовірність характеризується законом розподілу  $f(t = T)$ , який на даному проміжку  $0 < t < T$  почав своє формування. Така схема характерна для систем, що характеризуються певним ступенем безвідмовної роботи. Для високонадійних систем характерна схема, коли значення параметрів  $X$  значно нижче за допустимі значення  $X_{\max}$  (рис. 68, *б*). Це можливо, коли при зміні параметрів після періоду припрацювання відбулася їх стабілізація, і процес  $X(t)$  став стаціонарним, або коли швидкість зміни параметрів незначна, і забезпечується умова  $X \ll X_{\max}$ . У цьому випадку виріб має запас надійності, і відмова практично не виникне.

Як проміжний випадок між двома розглянутими може бути такий, при якому процес зміни параметрів стаціонарний; параметри, як правило, знаходяться в межах  $X < X_{\max}$ , проте окремі параметри внаслідок наближення до граничного значення можуть виходити за допустимі значення. Такі відмови виявляються як так звані "збої", коли при подальшій роботі виробу параметр знову набуває допустимого значення. Якщо ж вихід за допустимі межі зумовлений відмовою функціонування, то необхідні спеціальні заходи (ремонт, регулювання) для відновлення втраченої роботоzдатності. Прикладом збоїв можуть слугувати відмови транспортних систем (лотків) автоматичних ліній верстатів, що оброблюють підшипникові кільця, якщо відбувається застрявання кілець в лотку. Ця відмова виникає внаслідок деформації стінок лотка, засмічення лотка стружкою і його забруднення, виходу розміру заготовки кільця за допустимі межі та ін. Кількість відмов за одиницю часу може бути значною, оскільки її усунення пов'язане лише з додатковим проштовхуванням кільця по лотку.

Моделі, побудова яких дозволить розкрити механізм формування відмов і дасть можливість оцінити надійність виробу ще на стадії проектування, повинні в першу чергу враховувати ступінь віддаленості виробу від граничного стану. Якщо виникнення

відмов можливе і допустиме (рис. 68, *a* і *в*), то модель відмови повинна дати можливість визначити закон розподілу часу безвідмовної роботи, знання якого дозволить вирішити всі основні питання за оцінкою надійності. Такі моделі щодо поступових (рис. 68, *a*) і раптових (рис. 68, *в*) відмов є, як правило, основним змістом розробок за оцінкою надійності. Якщо ж при роботі виробу не повинно допускатися відмов, то характеристикою надійності є запас надійності  $K_n$  і його збереження в часі.

Якщо модель відмови охоплює всі стадії її формування, то вона придатна як для оцінки запасу надійності виробу, так і для знаходження закону розподілу термінів служби (напрацювання) до відмови. Проте часто прагнуть безпосередньо підібрати такий закон, який відображав би статистичні закономірності явищ, що відбуваються.

У теорії надійності застосовуються різні закони розподілу термінів служби (напрацювання) до відмови. Підставою для використання того або іншого закону розподілу і оцінки його параметрів є експериментальні дані, одержані при випробуванні виробів або зразків, відомості про аналогічні об'єкти, експлуатаційні спостереження або теоретичні передумови.

При цьому повинні застосовуватися методи перевірки статистичних гіпотез про правомірність застосування даного закону розподілу.

Нормальний закон у ряді випадків рекомендують застосовувати при зносі й інших поступових відмовах. Проте часто спостерігаються асиметричні закони розподілу. У цих випадках можуть підійти логарифмічно-нормальний розподіл, закон Вейбула, гама — розподіл, розподіл Релея. Вони часто застосовуються, наприклад, при оцінці результатів випробувань на втомну міцність.

При дії на об'єкт зовнішніх чинників, що призводять до відмов незалежно від його стану і тривалості попередньої роботи, тобто коли виникають раптові відмови, застосовують експоненціальний розподіл.

### 11.1. Нормальний розподіл (розподіл Гауса)

Нормальний закон розподілу характеризується щільністю імовірності виду:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x - M(X)^2}{2\sigma_x^2}},$$

де  $M(X)$ ,  $\sigma_x$  — відповідно математичне очікування і середнє квадратичне відхилення випадкової величини  $x$ .

Нормальний закон — це двохпараметричний закон, для запису якого потрібно знати  $M(X)$  і  $\sigma_x$ .

Інтенсивність відмов визначається за формулою:

$$\lambda(t) = f(t)/P(t).$$

На рис. 69 зображені криві  $\lambda(t)$ ,  $f(t)$  і  $P(t)$  для випадку  $\sigma_x \ll M(X)$ , характерного для формування поступових відмов трибомеханічних систем.

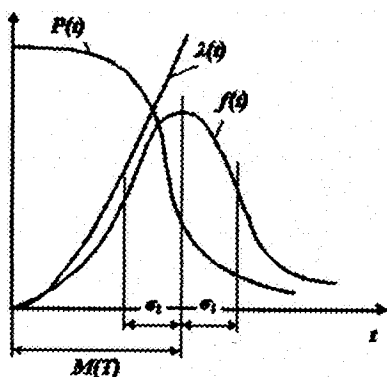


Рис. 69. Криві нормального закону розподілу термінів служби на відмову.



Процес зміни параметра  $X$  із швидкістю  $\gamma_x$  також є випадковим і залежить від зміни пошкоджень окремих елементів виробу.

В результаті всіх цих явищ відбувається формування закону розподілу  $f(X; t)$ , який визначає імовірність виходу параметра  $X$  за межі  $X_{\max}$ , тобто імовірність відмови  $F(t) = 1 - P(t)$ . Слід зазначити, що загалом значення  $X_{\max}$  також може мати розсіювання, якщо воно оцінює діапазон вимог споживача до граничних значень показників машини.

Якщо випадкові аргументи  $a$  і  $\gamma$  розподілені за нормальним законом, то й параметр  $X$  для кожного значення  $t = T$  буде розподілений за тим же законом з параметрами:

математичне очікування:

$$M(X_{\text{сер}}) = a_0 + \gamma_{\text{сер}} \cdot T,$$

середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_a^2 + T^2 \sigma_\gamma^2},$$

де  $a_0$  — математичне очікування і  $\sigma_a$  — середнє квадратичне відхилення випадкового параметра  $a$ .

Імовірність безвідмовної роботи:

$$P(T) = 0,5 + \Phi \left[ \frac{X_{\max} - a_0 - \gamma_{\text{сер}} T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\gamma^2 T^2}} \right],$$

де  $\Phi$  — нормована функція Лапласа,  $0 < \Phi < 0,5$ .

Дана схема в загальному вигляді описує процес виникнення відмови і при окремих значеннях вхідних параметрів може відображати ті або інші випадки, характерні для певних умов роботи і конструктивних особливостей виробу. Якщо процес зміни параметра починається відразу ( $T_0 = 0$ ), то одержуємо типову схему виникнення поступової параметричної відмови. Якщо при досягненні  $X_{\max}$  буде різке зростання  $X(t)$ , то, як правило, виникне відмова функціонування. Якщо в процесі формування відмови основну роль відіграє виникнення (зародження) процесу, тобто



функція  $f(T_0)$ , а потім процес протікає з великою інтенсивністю  $X(t) > \infty$ , то одержимо модель раптової відмови.

## 11.2. Розподіл Вейбулла

Розподіл Вейбулла достатньо близько підходить для ряду механічних об'єктів (наприклад, шарикопідшипників), він застосовується при обробці експериментальних даних, одержаних при прискорених випробуваннях об'єктів у форсованому режимі.

Згідно з цим розподілом, щільність імовірності моменту відмови становить:

$$f(t) = \beta \cdot \delta \cdot t^{\delta-1} \cdot e^{-(\beta t^\delta)},$$

де  $\delta$  — параметр форми (визначається підбором в результаті обробки експериментальних даних,  $\delta > 0$ );  $\beta$  — параметр масштабу:

$$\beta = 1/T.$$

Інтенсивність відмов визначається за формулою:

$$\lambda(t) = \beta \cdot \delta \cdot t^{\delta-1}.$$

Імовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = e^{-\beta t^\delta},$$

а середнє напрацювання до відмови:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\beta t^\delta} dt$$

Відзначимо, що при параметрі  $\delta = 1$  розподіл Вейбулла переходить в експоненціальний, при  $\delta > 1$  він може бути близький до нормального, а при  $\delta = 2$  переходить в розподіл Релея (рис. 71).

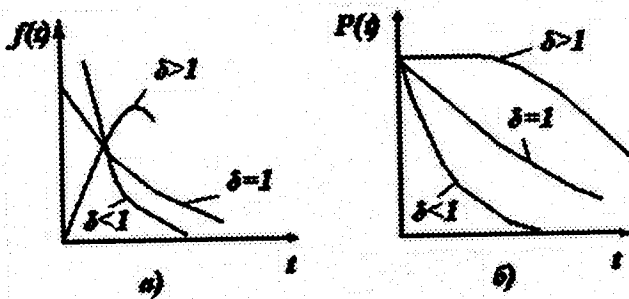


Рис. 71. Зміна щільності імовірності та імовірності безвідмовної роботи залежно від параметра  $\delta$ .

### 11.3. Експоненціальний розподіл

Цей розподіл однопараметричний, тобто для запису розрахункового виразу достатньо одного параметра  $\lambda = const$ . Для цього закону справджується і зворотне ствердження: якщо інтенсивність відмов постійна, то імовірність безвідмовної роботи як функція часу підкоряється експоненціальному закону:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{T_{ср}}}$$

Середній час безвідмовної роботи при експоненціальному законі розподілу інтервалу безвідмовної роботи виражається формулою:

$$T_{ср} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

Зазначимо, що імовірність безвідмовної роботи на інтервалі, що перевищує середній час  $T_{сер}$ , при експоненціальному розподілі буде меншою 0,368.

Цей вид відмови властивий багатьом типам електронних елементів. Можливий такий вид відмов і в деталях машин, наприклад крихке руйнування. На рис. 72 наведена функція щільності розподілу відмов регулятора дизельного двигуна, що також має вид експоненціального розподілу.

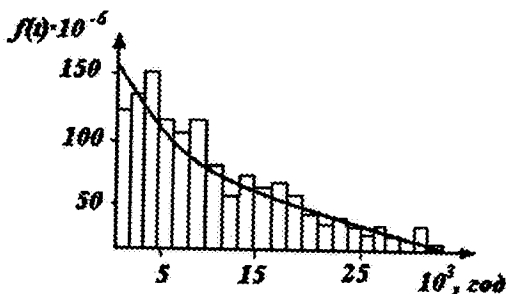


Рис. 72. Функція щільності розподілу відмов  $f(t)$  регуляторів дизельного двигуна.

#### 11.4. Розподіл Релея

Щільність імовірності за законом Релея розраховується за формулою:

$$f(t) = \frac{t}{\delta_*^2} e^{-\left(\frac{t^2}{2\delta_*^2}\right)}$$

де  $\delta_*$  — параметр розподілу.

Інтенсивність відмов дорівнює:

$$\lambda(t) = (1/\delta_*^2) \cdot t.$$

Характерною ознакою розподілу Релея є пряма лінія графіка  $\lambda(t)$ , яка починається з початку координат (рис. 73).

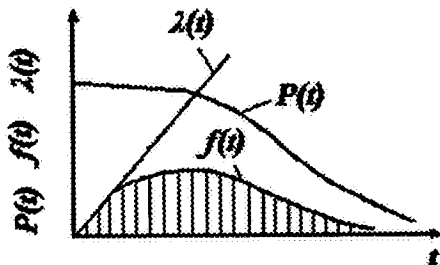


Рис. 73. Імовірність безвідмовної роботи ( $P(t)$ ), щільність розподілу ( $f(t)$ ) та інтенсивність відмов ( $\lambda(t)$ ) за законом розподілу Релея.

Імовірність безвідмовної роботи об'єкта в цьому випадку визначається за формулою:

$$P(t) = e^{\left(\frac{-t^2}{2\delta^2}\right)},$$

а середнє напрацювання до відмови:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \delta.$$

### 11.5. Критерії згоди

Результати статистичної обробки випробувань істотно залежать від апріорних (теоретичних) розподілів інтервалів безвідмовної роботи і відновлень. Ці результати можуть призвести до свідомо помилкових висновків, якщо модель не відображає реальні процеси виникнення відмов і механізми відновлення. Тому для рішення

основних завдань апостеріорного (на основі досвіду) аналізу надійності доцільно спочатку перевірити за допомогою статистичного критерію згоди на відповідність вибраного апріорного розподілу емпіричному розподілу, побудованому на підставі даних проведених випробувань.

Початковими даними (випадковими величинами), які піддаються обробці, є час напрацювання на відмову, час напрацювання на відновлення і кількість відмов однотипних елементів. Після того, як такий матеріал зібраний, його обробка дає змогу встановити закони розподілу показників надійності: імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, середній час напрацювання на відмову та ін. Знання законів розподілу дає можливість визначити всі інші кількісні показники надійності. Таким чином, основне завдання статистичної обробки полягає у визначенні одного із законів розподілу початкових випадкових величин.

Припустимо, що даний статистичний розподіл вирівнюється за допомогою деякої теоретичної кривої  $f(x)$  (рис. 74). Як би добре не була підібрана теоретична крива, між нею і статистичним розподілом неминучі деякі розбіжності. Природно виникає питання: чи пояснюються ці розбіжності тільки випадковими обставинами, пов'язаними з обмеженою кількістю спостережень, чи вони є істотними, зумовленими тим, що підібрана нами крива погано вирівнює даний статистичний розподіл? Для відповіді на таке питання існують так звані "критерії згоди".

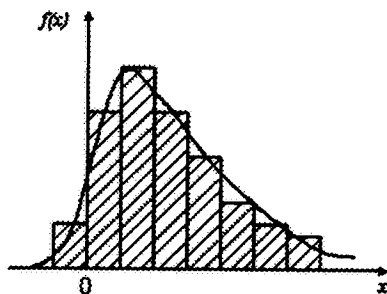


Рис. 74. Статистична і теоретична щільність розподілу.

Ідея застосування критеріїв згоди полягає в наступному.

На підставі даного статистичного матеріалу нам належить перевірити гіпотезу  $H$ , яка полягає в тому, що випадкова величина  $X$  підпорядковується деякому певному закону розподілу. Цей закон може бути заданий в тій або іншій формі: наприклад, у вигляді функції розподілу  $F(x)$ , у вигляді щільності розподілу  $f(x)$  чи у вигляді сукупності імовірностей  $p_i$ , де  $p_i$  — імовірність того, що величина  $X$  потрапить у межі  $i$ -го розряду.

Один із найбільш часто вживаних критеріїв згоди — так званий "критерій  $\chi^2$ " Пірсона.

Припустимо, що проведено  $n$  незалежних дослідів, у кожному з яких випадкова величина  $X$  прийняла певне значення. Результати дослідів зведені в  $k$  розрядів і оформлені у вигляді статистичного ряду:

$I_i$	$x_1; x_2$	$x_2; x_3$	...	$x_k; x_{k+1}$
$p_i^*$	$p_1^*$	$p_2^*$	...	$p_k^*$

Необхідно перевірити, чи узгоджуються експериментальні дані з гіпотезою про те, що випадкова величина  $X$  має даний закон розподілу (заданий функцією розподілу  $F(x)$  або щільністю  $f(x)$ ). Назвемо цей закон розподілу "теоретичним".

Знаючи теоретичний закон розподілу, можливо знайти теоретичні імовірності попадання випадкової величини в кожний із розрядів:

$$p_1, p_2, \dots, p_k.$$

Перевіряючи узгодженість теоретичного і статистичного розподілів, виходитимемо з розбіжностей між теоретичною імовірністю  $p_i$  і спостережуваними частотами  $p_i^*$ .

Міра розбіжності позначається  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(p_i^* - p_i)^2}{p_i}$$

Розподіл  $\chi^2$  залежить від параметра  $r$ , який називається числом "ступеня свободи" розподілу. Число "ступеня свободи"  $r$  дорівнює числу розрядів  $k$  мінус число незалежних умов ("зв'язків", накладених на частоти  $p'_i$ ).

Для розподілу  $\chi^2$  складені спеціальні таблиці. Користуючись цими таблицями, можна для кожного значення  $\chi^2$  і числа ступеня свободи  $r$  знайти імовірність  $p$  того, що величина, розподілена згідно із законом  $\chi^2$ , перевищить табличне значення.

Схема застосування критерію  $\chi^2$  для оцінки узгодженості теоретичного і статистичного розподілів зводиться до наступного:

1) Визначається міра розбіжності  $\chi^2$ .

2) Визначається число ступеня свободи  $r$  як число розрядів  $k$  мінус число накладених зв'язків  $s$ :

$$r = k - s.$$

3) За  $r$  і  $\chi^2$  за допомогою таблиць визначається імовірність того, що величина, яка має розподіл  $\chi^2$  з  $r$  ступенем свободи, перевищить дане значення  $\chi^2$ . Якщо ця імовірність незначна, гіпотеза відкидається як неправдоподібна. Якщо ця імовірність відносно велика, гіпотезу можна визнати такою, що не суперечить експериментальним даним.

Окрім критерію  $\chi^2$ , для оцінки ступеня узгодженості теоретичного і статистичного розподілів на практиці застосовується ще ряд інших критеріїв.

Як міру розбіжності між теоретичним і статистичним розподілами А.Н. Колмогоров розглядає максимальне значення модуля різниці між статистичною функцією розподілу  $F^*(x)$  і відповідною теоретичною функцією розподілу:

$$D = \max |F^*(x) - F(x)|.$$

Підставою для вибору величини  $D$  як міри розбіжності є простота її обчислення. Водночас вона має достатньо простий закон

розподілу. А.Н. Колмогоров довів, що, яка б не була функція розподілу  $F(x)$  безперервної випадкової величини  $X$ , при необмеженому зростанні числа незалежних спостережень  $n$  імовірність нерівності

$$D\sqrt{n} \geq \lambda$$

прагне до такого граничного значення:

$$P(\lambda) = 1 - \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k e^{-2k^2\lambda^2}$$

Значення імовірності  $P(\lambda)$  наведені в таблиці 12.

Табл. 12. Імовірність  $P(\lambda)$  при визначенні критерію А.Н. Колмогорова

$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$
0,0	1,000	0,7	0,711	1,4	0,040
0,1	1,000	0,8	0,544	1,5	0,022
0,2	1,000	0,9	0,393	1,6	0,012
0,3	1,000	1,0	0,270	1,7	0,006
0,4	0,997	1,1	0,178	1,8	0,003
0,5	0,964	1,2	0,112	1,9	0,002
0,6	0,864	1,3	0,068	2,0	0,001

Схема застосування критерію А.Н. Колмогорова є такою: будуються статистична функція розподілу  $F^*(x)$  і передбачувана теоретична функція розподілу  $F(x)$  та визначається максимум  $D$  модуля різниці між ними (рис. 75).



Далі визначається величина

$$\lambda = D\sqrt{n}$$

і за таблицею 12 знаходимо імовірність  $P(\lambda)$ . Це є імовірність того, що (якщо величина  $X$  дійсно розподілена за законом  $F(x)$ ) за рахунок виключно випадкових причин максимальна розбіжність між  $F^*(x)$  і  $F(x)$  буде не меншою, ніж фактично встановлена. Якщо імовірність  $P(\lambda)$  незначна, гіпотезу слід відкинути як неправдоподібну; при порівняно великих  $P(\lambda)$  її можна вважати сумісною з експериментальними даними.

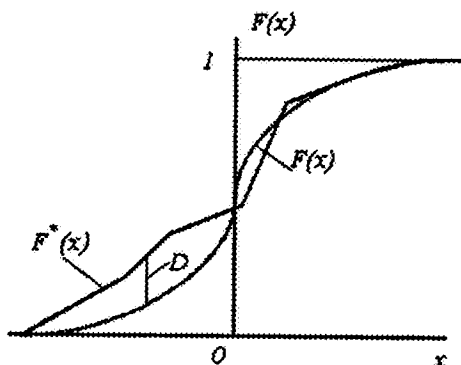


Рис. 75. Схема визначення різниці між статистичною і теоретичною функціями розподілу випадкової величини.

Слід зазначити, що за допомогою розглянутих критеріїв згоди можна тільки в деяких випадках спростувати вибрану гіпотезу  $H$  і відкинути її як таку, що не узгоджується з експериментальними даними; якщо ж імовірність  $p$  велика, то цей факт сам по собі у жодному випадку не може вважатися доказом справедливості гіпотези  $H$ , а вказує тільки на те, що гіпотеза не суперечить даним, одержаним в ході експерименту.

## 12. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

*Планування експерименту* — вибір плану експерименту, що задовольняє заданим вимогам, сукупність дій, направлених на розробку стратегії проведення досліджень (від отримання апріорної інформації до отримання роботоздатної математичної моделі або визначення оптимальних умов). Це цілеспрямоване управління експериментом, яке реалізується в умовах неповного знання механізму явища, що вивчається.

Найважливішим завданням методів обробки одержаної в ході експерименту інформації є завдання побудови математичної моделі явища, що вивчається, процесу, об'єкта. Можна одержати математичну модель, що характеризується точною апроксимацією, якщо цілеспрямовано застосовується "*активний*" експеримент. Проведення "активних" експериментів зумовлено використанням математичних методів планування, тобто активним втручанням у процес і можливістю вибору способу дії на систему. Об'єкт дослідження, на якому можливо проводити активний експеримент, називається керованим.

Якщо виявляється, що заздалегідь не можна вибрати способи впливу на стан системи, то проводиться "*пасивний*" експеримент. Наприклад, такими експериментами є результати спостережень за автомобілями і окремими їх агрегатами в процесі експлуатації.

Звичайно розглядається наступна схема планування експерименту. Нехай властивість ( $Y$ ) об'єкта, яка цікавить нас, залежить від декількох ( $n$ ) незалежних змінних ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ), і ми хочемо з'ясувати характер цієї залежності —  $Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , про яку ми маємо лише загальне уявлення. Величина  $Y$  — називається "відгук" (*параметр оптимізації*), а сама залежність  $Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$  — "функція відгуку".

Незалежні змінні  $X_1, X_2, \dots, X_n$  — інакше *чинники*, також повинні мати кількісну оцінку. Якщо використовуються якісні чинники,

то кожному їх рівню повинно бути привласнено яке-небудь число. Важливо вибрати в якості чинників лише незалежні змінні, тобто тільки ті, зміна яких не призведе до зміни інших чинників. Чинники повинні бути однозначними. Для побудови ефективної математичної моделі доцільно провести попередній аналіз значимості чинників (ступеню впливу на функцію), їх ранжирування і виключити малозначні чинники.

Діапазони зміни чинників задають ділянку визначення  $Y$ . Якщо прийняти, що кожному чиннику відповідає координатна вісь, то одержаний простір називається факторним простором. При  $n = 2$  ділянка визначення  $Y$  являє собою прямокутник, при  $n = 3$  — куб, при  $n > 3$  — гіперкуб.

При виборі діапазонів зміни чинників потрібно враховувати їх сумісність. Для кожного з чинників указують граничні значення:

$$X_{imin} < X_i < X_{imax}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Регресійний аналіз функції відгуку призначений для одержання її математичної моделі у вигляді рівняння регресії:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n; B_1, B_2, \dots, B_m) + e,$$

де  $B_1, B_2, \dots, B_m$  — деякі коефіцієнти;  
 $e$  — похибка.

Якщо наперед невідомий аналітичний вираз функції відгуку, то можна розглядати не саму функцію, а її розкладання, наприклад, у ступеневий ряд у вигляді полінома:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + \dots + B_nX_n + B_{12}X_1X_2 + \dots + B_{nn-1}X_nX_{n-1} + B_{11}X_1^2 + \dots + B_{nn}X_n^2 + \dots$$

Розкладання в ступеневий ряд функції можливе в тому разі, якщо сама функція є безперервною і гладкою. На практиці звичайно обмежуються числом членів ступеневого ряду і апроксимують функцію поліномом деякого ступеня.

Чинники можуть мати різні розмірності (°С, мкм, Вт, об/хв) і різко відрізнятися кількісно. У теорії планування експерименту використовують кодування чинників. Цей підхід ґрунтується на виборі нового масштабу для кодованих чинників, причому такого, щоб мінімальне значення кодованих чинників відповідало "-1", а максимальне значення "+1". Кодування проводиться з використанням співвідношення

$$x_i = (X_i - X_{i0})/\Delta X_i,$$

де  $X_{i0}$  — натуральне значення чинника на основному рівні;

$\Delta X_i$  — натуральне значення інтервалу варіювання чинника.

Якщо чинник змінюється дискретно, наприклад він є якісним, то кожному рівню цього кодованого чинника привласнюються числа в діапазоні від +1 до -1. Так, при двох рівнях це +1 і -1, при трьох рівнях +1, 0 -1 і т.д.

Функція відгуку може бути виражена через кодовані чинники  $Y=f(x_1, \dots, x_n)$  і записана в поліноміальному вигляді:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{n-1}x_{n-1}x_n + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{nn}x_n^2 + \dots$$

Очевидно, що  $B_i \neq b_i$ , але

$$Y = F(X_1, \dots, X_i, \dots, X_n) = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n).$$

Для полінома, записаного в кодованих значеннях, ступінь впливу чинників або їх поєднань на функцію відгуку визначається величиною їх коефіцієнта  $b_i$ . Для полінома в іменованих чинниках величина коефіцієнта  $B_i$  ще не відображає однозначно ступінь впливу цього чинника або їх поєднань на функцію відгуку.

Стратегія застосування планів полягає у принципі поступового планування — поступового ускладнення моделі. Починають із простої моделі, знаходяться для неї коефіцієнти, визначається її

точність. Якщо точність не задовольняє, то планування і модель поступово ускладнюються.

Найбільшого поширення набули повнофакторні плани і плани, які є їх частиною. **Повнофакторними** називаються плани, в яких містяться всі можливі комбінації поєднань рівнів і чинників, що враховуються, а досліди, проведені згідно з цими планами, називаються повним факторним експериментом (ПФЕ).

Число дослідів у повному факторному експерименті визначають залежно від числа рівнів і кількості чинників за формулою:

$$N = p^n,$$

де  $p$  — число рівнів;

$n$  — кількість чинників.

Плани багатфакторних експериментів залежно від співвідношення між числом дослідів  $N$  і числом визначуваних невідомих параметрів  $m$  (коефіцієнтів) рівняння регресії поділяють на ненасичені, якщо  $f = n - m > 0$ , насичені плани при  $f = n - m = 0$  і наднасичені плани, якщо  $f < 0$ , де  $f$  — число ступеня свободи.

Матриці планування повних факторних експериментів характеризуються загальними властивостями, які визначають якість моделі:

— **симетричність** відносно центру експерименту:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} = 0,$$

тобто сума елементів будь-якого стовпчика матриці планування дорівнює нулю.

— **нормування**:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = N,$$

тобто сума квадратів елементів будь-якого стовпчика дорівнює числу дослідів.

— **ортогональність**:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} = 0, \quad i \neq j$$

тобто сума добутоків будь-яких двох стовпчиків дорівнює нулю.

— **рототабельність**, тобто здатність математичної моделі, одержаної в результаті повного і дробового факторного експерименту, передбачати значення параметру оптимізації з однаковою точністю на рівних відстанях від центру експерименту, незалежно від напрямку.

### 12.1. Плани повного факторного експерименту $2^n$ (плани ПФЕ $2^n$ )

Плани ПФЕ  $2^n$  є простими планами першого порядку. Основа 2 означає, що прийнято два рівні варіювання, на яких фіксуються чинники,  $n$  — кількість чинників.

Для плану ПФЕ  $2^2$  число чинників рівне двом ( $n=2$ ) і число рівнів фіксування чинників також 2. Значення кодованих чинників вибираються у вигляді +1 і -1. Повна кількість можливих поєднань значень  $n$  чинників (число дослідів, а отже, і число рядків плану)  $N=2^2=4$ . Складається план, у якому число стовпців чинників і їх поєднань дорівнює числу членів рівняння. Так, для рівняння

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 - m + 1 = 6$$

план ПФЕ  $2^2$  представлений в табл. 12.

Табл. 12. Матриця планування експерименту  $2^2$

$i$	0	1	2	3	4	5	
$U$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3 = x_1 x_2$	$x_4 = x_1^2$	$x_5 = x_2^2$	$Y$
1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	$Y_1$
2	+1	+1	-1	-1	+1	+1	$Y_2$
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1	$Y_3$
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$Y_4$
$\sum_{i=1}^n x_{ij}$	4	0	0	0	4	4	

У першу колонку ( $i=0$ ) у всі чотири рядки заносяться +1. У другу колонку ( $i=1$ ) заносяться одиниці зі змінними послідовно знаками (починаємо з -1). В цьому разі сума елементу колонки дорівнює нулю. Третю колонку заповнюємо одиницями із знаками, які чергуються через 2 елементи. Сума елементів також дорівнює нулю. Геометричне відображення плану ПФЕ  $2^2$  з позначкою номерів точок плану у факторному просторі представлено на рис. 76. Точки плану розташовуються у вершинах квадрата.

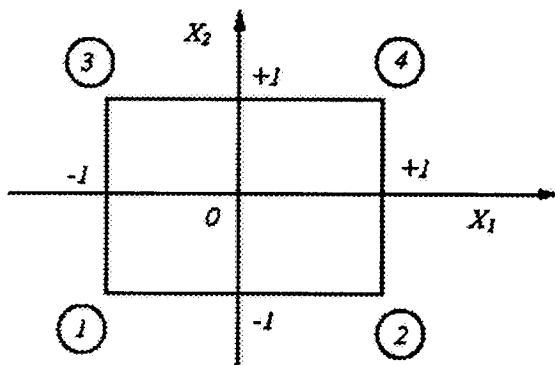


Рис. 76. Геометричне відображення плану ПФЕ  $2^2$  у факторному просторі.

Елементи колонок, що відповідають добуткам чинників, обчислюють шляхом перемножування елементів попередніх колонок. Таке правило є гарантією, що ми не пропустили жодного можливого поєднання чинників у дослідах, і водночас не буде повторень однакових поєднань. Останні дві колонки чинників, які відповідають їх квадратам, складаються тільки з +1. Колонки, обведені потовщеною рамкою, утворюють план експерименту. Колонка  $x_1x_2$ , що не обведена потовщеною рамкою, при проведенні дослідів має допоміжний характер.

Особливості плану ПФЕ  $2^2$ :

1. Різних колонок у таблиці вийшло лише чотири. Колонки, що відповідають квадратам чинників ( $i = 4, 5$ ), аналогічні першій ( $i = 0$ ) — це загальний результат для плану ПФЕ  $2^n$ , який не дозволяє визначити окремо коефіцієнти при квадратах чинників. Тому плани ПФЕ  $2^n$  називають планами першого порядку. Для визначення коефіцієнтів при квадратах чинників використовують плани другого порядку.

2. Кількість колонок дорівнює числу різних поєднань чинників, тобто числу рядків плану — числу дослідів  $N$ . Це теж загальний результат для цих планів, тобто за допомогою планів ПФЕ  $2^n$  можливо визначити всі коефіцієнти лінійного полінома зі всіма можливими поєднаннями чинників, включаючи коефіцієнти  $b_{12\dots n}$ , що відображають максимальну взаємодію чинників виду  $x_1x_2\dots x_n$ .

3. У плані ПФЕ  $2^2$  сума квадратів елементів будь-якої колонки:

$$\sum_{U=1}^N x_{iU}^2 = 4 = N$$

Тому для планів ПФЕ  $2^n$ :

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^N x_{iU} Y_U}{N}$$



Для плану ПФЕ  $2^3$  число чинників  $n = 3$ . Виконується  $N = 2^3 = 8$  дослідів. Рівняння може містити до восьми членів

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

Таким чином формується план із восьми рядків і восьми колонок. У четвертій колонці ( $i=3$ ) записуються одиниці із знаками, які чергуються через чотири елементи (табл. 13). План складається аналогічно плану ПФЕ  $2^2$ .

Табл. 13. Матриця повного факторного експерименту  $2^3$

$i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$U$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$Y$
1	1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	$Y_1$
2	1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	$Y_2$
3	1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	$Y_3$
4	1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	$Y_4$
5	1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$Y_5$
6	1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	$Y_6$
7	1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	$Y_7$
8	1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$Y_8$
$\sum_{i=1}^8 x_{ij}$	8	0	0	0	0	0	0	0	

Колонки, обведені потовщеною рамкою, утворюють план експерименту. Колонки, не обведені потовщеною рамкою, при проведенні дослідів мають допоміжний характер.

## 12.2. Плани дробового факторного експерименту (плани ДФЕ)

При багатфакторному експерименті, особливо коли число чинників більше шести ( $n > 6$ ), кількість дослідів, які необхідно

провести згідно з планами ПФЕ  $2^n$  ( $N = 2^n$ ), стає надмірним. Якщо нам не потрібне визначення всіх коефіцієнтів неповного квадратичного полінома, то переходять до **дробового факторного експерименту (ДФЕ)** — частини повного факторного експерименту. Так, наприклад, якщо потрібно визначити лише коефіцієнти при самих чинниках:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n,$$

то план ПФЕ  $2^n$  дає надлишкову інформацію. Так при  $n = 6$  в цьому випадку потрібно визначити  $n+1 = 7$  коефіцієнтів, тоді як за планом ПФЕ необхідно провести  $N = 2^6 = 64$  досліди.

Хоча зазначена надлишкова інформація і дає змогу точніше визначити коефіцієнти, але частіше використовують плани ДФЕ  $2^{n-k}$ , де  $k$  — показник дробової частки плану ПФЕ. При  $k = 1$  кількість дослідів у плані ДФЕ у два рази менша, ніж у плані ПФЕ, тому такі плани називають напівреплікою плану ПФЕ. Так, при  $k = 1$  для плану ДФЕ  $2^{6-1} N = 2^{6-1} = 32$ . При  $k = 2$  для плану ДФЕ  $2^{6-2} N = 2^{6-2} = 16$ , і такий план називають чвертьреплікою; при  $k=3$  для плану ДФЕ  $2^{6-3} N = 2^{6-3} = 8$ . При виборі дробової плану  $k$  необхідно враховувати, що кількість дослідів повинна бути більшою за число членів рівняння. У даному випадку величина  $k$  повинна бути такою, що б задовольнялася умова

$$n+1 < 2^{n-k}.$$

Матриця плану ДФЕ визначається так само, як і для плану ПФЕ, але з меншим числом чинників. Чинники, що залишилися, варіюються не довільно, а таким чином, щоб зберігалася ортогональність плану. Це забезпечується за умови, якщо чинники, що залишилися, варіюються за обраним генеруючим співвідношенням, наприклад, як добуток яких-небудь чинників з першої групи. Але це призводить до того, що в матриці існуватимуть

однакові колонки. Отже, ми не зможемо знайти в чистому вигляді всі коефіцієнти неповного квадратичного полінома, а лише визначимо сумісну величину коефіцієнтів для однакових колонок.

Розглянемо побудову **плану ДФЕ**  $2^{3-1}$ . Тут  $n = 3, k = 1, N = 2^{3-1} = 4$ . Перші два чинники варіюємо як і раніше для плану ПФЕ  $2^2$ , а для третього чинника вибираємо генеруюче співвідношення у вигляді  $x_3 = x_1 + x_2$ .

Для неповного квадратичного полінома:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

кількість стовпців плану складає вісім (табл. 14).

Табл. 14. Напіврепліка дробового факторного експерименту  $2^{3-1}$

$i$	0	1	2	3	4	5	6	7
$U$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

План є ортогональним, але для нього характерна наявність чотирьох пар однакових колонок. Тому можна визначити тільки чотири коефіцієнти, що відображають сумісні впливи двох однакових колонок:

$$b_0 + b_{123} = \frac{\sum_{U=1}^N x_{0U} Y_U}{N}.$$

Сумарні значення коефіцієнтів  $b_1 + b_{23}$ ;  $b_2 + b_{13}$ ;  $b_3 + b_{12}$  визначаються аналогічно. Це є наслідком того, що ми намагаємося визна-

чити повну кількість коефіцієнтів — 8 за недостатньою кількістю дослідів — 4. Проте, якщо наперед відомо, що деякі з членів рівняння дорівнюють нулю або є апіорна інформація про величини деяких коефіцієнтів, то одержані коефіцієнти можуть вилучатися. Так, якщо  $b_{123} = 0$ , то

$$b_0 = \frac{\sum_{v=1}^N x_{0v} Y_v}{N}.$$

Якщо можна допустити, що коефіцієнти з їх змішаної оцінки зіставляються, то для розглянутого плану

$$b_0 = b_{123} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{v=1}^N x_{0v} Y_v}{N}.$$

Характерна ознака планів ДФЕ полягає і в тому, що якщо побудований на його основі неповний поліном не задовольняє вимогам за точністю, то плани ДФЕ легко добудовуються до планів ПФЕ, без втрати інформації попередніх дослідів, з формуванням точнішого полінома.

### 12.3. Статистична значимість коефіцієнтів регресії та адекватність моделі

Після обчислення коефіцієнтів рівняння регресії оцінюють їх значимість і перевіряють адекватність моделі дослідним даним. Кожен експеримент містить елемент невизначеності внаслідок того, що існує неоднорідність і обмеженість експериментальних даних. Проведення паралельних спостережень у будь-якому досліді не дає однакових результатів, оскільки завжди має місце помилка досліді (помилка відтворюваності). Помилка досліді оцінюється по паралельних дослідіах. Тому досліді проводяться з декількома

повтореннями спостережень, при цьому прагнуть по можливості забезпечити однакові умови. За наслідками паралельних спостережень для кожного досліду розраховують середнє арифметичне значення:

$$\bar{Y}_u = \frac{Y_{u1} + Y_{u2} + \dots + Y_{un}}{n} = \frac{\sum_{q=1}^n Y_{uq}}{n}$$

і оцінку дисперсії

$$S^2 = \frac{\sum_{q=1}^n (Y_{uq} - \bar{Y}_u)^2}{n-1},$$

де  $Y_{uq}$  — результат в  $q$ -му паралельному спостереженні в  $u$ -му досліді;

$n$  — число паралельних спостережень в одному досліді.

Для перевірки гіпотези однорідності дисперсій використовують **критерій Кохрена  $G$** , якщо число паралельних спостережень для всіх дослідів однакове ( $n_1 = n_2 = \dots = n_N$ ):

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2},$$

де  $S_{u \max}^2$  — найбільше значення оцінки дисперсії для  $u$ -го досліді.

Значення  $G$ -критерію для рівнів значимості  $\alpha$  і різних  $N$  і  $f = n-1$  приведені в математичних довідниках. Якщо розрахункові значення критерію менше табличного, то гіпотеза про однорідність дисперсії приймається.

Значимість коефіцієнтів регресії можливо перевірити за допомогою *t-критерію* (*критерію Стьюдента*):

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{\{b_j\}}}$$

де  $S_{\{b_j\}}$  — квадратична похибка коефіцієнта регресії.

Для лінійних моделей дисперсію коефіцієнтів регресії визначають за формулами:

$$S_{\{b_j\}}^2 = \frac{S^2\{Y\}}{Nn} \quad \text{і} \quad S_{\{b_j\}} = \sqrt{S^2\{b_j\}}$$

Обчислене значення  $t_j$  — критерію порівнюють з табличним  $t_{a,f}$ . При  $t_j > t_{a,f}$  коефіцієнт рівняння регресії  $b_j$  значимий. Число ступенів свободи  $f = N(n-1)$ . Всі значимі коефіцієнти  $b_j$  залишають у рівнянні регресії і перевіряють його придатність (адекватність).

Для перевірки гіпотези про адекватність вибраної моделі використовують *F-критерій* (*критерій Фішера*):

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{\{Y\}}^2}$$

де  $S_{ad}^2$  — дисперсія неадекватності;

$S_{\{Y\}}^2$  — дисперсія відтворюваності.

Дисперсія неадекватності, яка характеризує відхилення значень параметра оптимізації щодо розрахункових значень при однаковому повторенні  $n$  разів спостережень в усіх точках плану при повнофакторному експерименті або регулярних дробових реплік:

$$S_{ad}^2 = \frac{n}{N - (k + 1)} \sum (\bar{Y}_u - \bar{\bar{Y}}_u)^2$$

де  $(k + 1)$  — число оцінок коефіцієнтів рівняння регресії;

$\bar{\bar{Y}}_u$  — розрахункове значення параметра оптимізації в  $u$ -ій точці.

Дисперсію відтворюваності, залежно від розподілу числа повторних (паралельних) спостережень у дослідях, визначають за формулою:

$$S_{\{Y\}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{q=1}^n (Y_{uq} - \bar{Y}_u)^2}{N(n-1)}$$

де  $u = 1, 2, \dots, N$ ;

$q = 1, 2, \dots, n$ .

Розрахункове значення  $F$ -критерію порівнюють із табличним значенням для рівня значимості  $\alpha$  і числа ступенів свободи  $f_{ad} = N - (k + 1)$  — для чисельника і  $f = N(n - 1)$  — для знаменника. Гіпотеза про адекватність моделі не відкидається, якщо виконується нерівність  $F > F_{\alpha}(f_{ad}, f)$ . Якщо лінійна модель виявляється неадекватною, то в неї вводять ефекти взаємодії і знов оцінюють її. Якщо в цьому випадку модель буде неадекватною, то переходять до моделей другого і вищих порядків. Для нової прийнятої моделі вибирають план проведення експерименту. Після його реалізації проводять математичну обробку результатів спостережень і перевірку адекватності моделі.

### 13. НАДІЙНІСТЬ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Більшість виробів машинобудування є складними системами, які складаються з окремих вузлів, деталей, агрегатів, систем управління та ін. **Складна система** — це об'єкт, призначений для виконання заданих функцій, який може бути розчленований на елементи, кожний із яких також виконує певні функції і знаходиться у взаємодії з іншими елементами системи.

Надійність об'єкта як системи, що складається з ряду елементів, можна визначити також за даними про надійність кожної з її складової частини або елемента. Теоретично будь-яку машину можна умовно розділити на скільки завгодно велике число елементів, розуміючи під елементом вузол, агрегат, деталь або частину деталі. **Елемент** — це складова частина складної системи, яка може характеризуватися самостійними вхідними і вихідними параметрами.

Згідно з теорією систем, структура системи характеризується елементами або деталями, їх характерними властивостями та взаємозв'язками. Проста структура трибомеханічної системи складається з двох твердих тіл, які обмінюються механічними входами і виходами через поверхню розділу в зоні їх контакту (табл. 15).

Табл. 15. Елементи триботехнічних систем

Трибо-технічна система	Елементи системи			
	Трибоелемент 1	Трибоелемент 2	Проміжне середовище	Оточуюче середовище
Підшипник ковзання	Вал	Втулка	Масило	Повітря
Дискове гальмо	Диск	Накладка	Забруднення	Повітря



Трибо-технічна система	Елементи системи			
	Трибоелемент 1	Трибоелемент 2	Проміжне середовище	Оточуюче середовище
Черв'ячна передача	Черв'як	Зубчасте колесо	Редукторне масло	Повітря
Залізничний транспорт	Колесо	Рейка	Забруднення	Повітря
Поршневий вузол	Поршневе кільце	Циліндр	Моторне масло	Рідина

Можна представити функцію різних триботехнічних систем в перетворенні входів, наприклад, руху, механічної енергії і матеріалів, у виходи, які використовуються для технічних цілей (табл. 16).

Функціональні взаємозв'язки між входами і виходами супроводжуються втратами механічної енергії і матеріалів, які визначаються як втрати на тертя і знос.

Табл. 16. Технічні функції механічних систем

Умови, необхідні для виконання технічної функції		Головна технічна функція системи	Приклади
Вхід	Вихід		
Рух + робота	Рух	Передача руху	Зчеплення
		Припинення руху	Гальма
	Робота	Передача потужності (механічної, гідравлічної, пневматичної)	Зубчасті передачі
		Інформація	Створення інформації

Умови, необхідні для виконання технічної функції		Головна технічна функція системи	Приклади
Вхід	Вихід		
Рух + матеріали	Матеріали	Перенесення	Колесо – рейка, трубопровід

У зв'язку з тим, що функціонування складної системи пов'язане з виконанням різноманітних завдань в неоднакових умовах експлуатації, буває важко визначити, чи обумовлена зміна вихідних параметрів машини відмовою. В одних умовах роботи ці зміни не впливають на роботоздатність виробу, в інших може відбутися зниження продуктивності, точності, швидкості та інших показників, які характеризують ефективність роботи машини. Машина може, як правило, функціонувати і при виникненні параметричних відмов.

Вихід будь-якого з параметрів за встановлені межі буде параметричною відмовою, а оцінка наслідків даної відмови визначає допустиме значення імовірності безвідмовної роботи.

### 13.1. Способи резервування об'єктів

Більшість систем спроектована таким чином, що при відмові будь-якого з елементів система відмовляє. При аналізі надійності такої системи припускаємо, що відмова будь-якого з елементів носить випадковий і незалежний характер і не обумовлює зміни характеристик (не порушує роботоздатності) решти елементів. З погляду теорії надійності в системі, де відмова будь-якого з елементів приводить до відмови системи, елементи включені *по основній схемі або послідовно*. У понятті відмови закладений фізичний аналог електричної схеми з послідовним включенням елементів, коли відмова будь-якого з елементів пов'язана з розривом ланцюга.

Наприклад, більшість приводів машин і механізми передач підкоряються цій умові. Так, якщо в приводі машини вийде з ладу будь-яка шестерня, підшипник, муфта, важіль управління, електродвигун, масляний насос і т. п., то весь привід перестане функціонувати.

Припустимо, що система складається з  $n$  послідовно включених елементів. З теорії імовірності відомо, що якщо визначена імовірність появи декількох незалежних випадкових подій, то збіг цих подій визначається як добуток імовірностей їх появ. Працездатний стан будь-якого з  $n$  елементів системи оцінюється як імовірність безвідмовної роботи елементу. Система буде знаходитись в роботоздатному стані тільки за умови одночасного роботоздатного стану всіх елементів. Таким чином, роботоздатність системи оцінюється як добуток імовірності безвідмовної роботи елементів:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t)$$

де  $P_i(t)$  – імовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елементу.

Структурна схема з трьох послідовних елементів представлена на рис. 77.

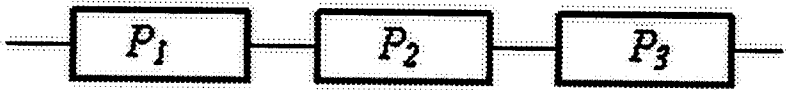


Рис. 77. Схема послідовного з'єднання елементів.

Це може бути, наприклад, ведучий міст трактора, в якому елемент 1 – головна передача, елемент 2 – піввісь і елемент 3 – бортові редуктори. Якщо імовірність безвідмовної роботи кожного елемента відповідно складає  $P_1 = 0,95$ ,  $P_2 = 0,96$ ,  $P_3 = 0,94$ , то

імовірність безвідмовної роботи системи при незалежних відмовах становить:

$$P_c = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = 0,95 \cdot 0,96 \cdot 0,94 = 0,857.$$

Таким чином, складні системи, які складаються з елементів високої надійності, можуть характеризуватися низькою надійністю за рахунок наявності великого числа елементів.

Система, як і елемент, може знаходитися в одному з двох не-сумісних станів — відмови або робоздатності:

$$P(t) + F(t) = 1,$$

$$F(t) = 1 - P(t)$$

де  $F(t)$  — імовірність відмови системи, що визначається за формулою:

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t)$$

Якщо причина виходу з ладу деталей машини або вузла пов'язана тільки з раптовими відмовами, які підпорядковуються експоненціальному закону, то

$$P_1 = e^{-\lambda_1 t}, P_2 = e^{-\lambda_2 t}, \dots, \text{отже}$$

$$P(t) = e^{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t},$$

де  $\sum_{i=1}^n \lambda_i$  — інтенсивність відмов системи, яка підпорядковується експоненціальному закону з інтенсивністю відмов:

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i = const$$

Якщо  $\lambda_0 = const$ , то середнє напрацювання до відмови системи:

$$T_{сер} = 1/\lambda_0.$$

В експлуатації систем широко представлений спосіб підвищення їх надійності за рахунок уведення до схеми системи додаткових (резервних) елементів, які можуть працювати паралельно з основними елементами або підключатися на місце елемента, який відмовив. Таким чином, **резервованою системою** називається така система, в якій відмова настає тільки після відмови будь-якого основного елемента і всіх резервних в аналізованого елементу.

При **загальному резервуванні** основний об'єкт (система) резервується в цілому, а при **роздільному** – резервуються окремі частини (елементи) системи (рис. 78).

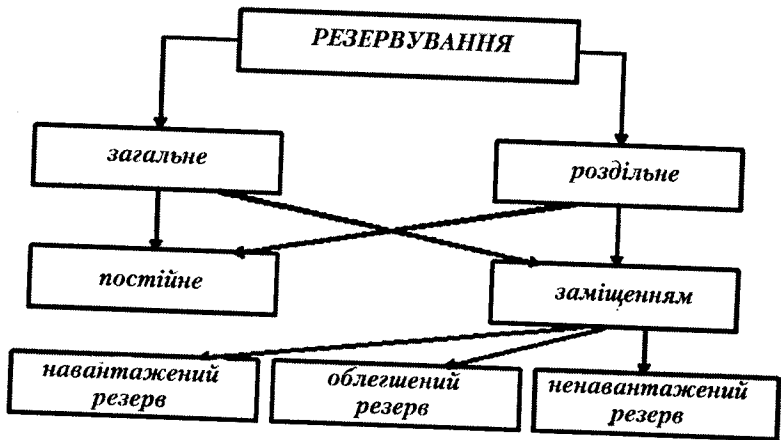


Рис. 78. Способи резервування систем.

За способом включення елементів резервування поділяється на постійне і резервування заміщенням (рис. 79).

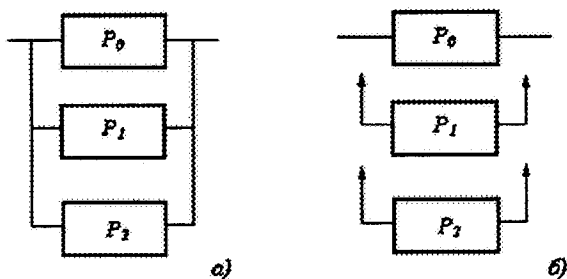


Рис. 79. Структурні схеми системи при резервуванні. а) – постійне; б) – заміщенням (ненавантажений резерв).

При **постійному резервуванні** резервні об'єкти підключені до навантаження постійно протягом всього часу роботи і знаходяться в однакових з основними об'єктами умовах. Постійне резервування називають паралельним з'єднанням елементів. У разі незалежності відмов імовірність безвідмовної роботи системи з паралельно резервованими елементами становить:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^m F_i = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i),$$

де  $F_i$  і  $P_i$  – відповідно імовірності появи відмови і безвідмовної роботи  $i$ -го елемента за час  $t = T$ .

$m$  – кількість елементів у системі.

Резервування може значно підвищити надійність системи. Наприклад, якщо імовірність безвідмовної роботи кожного елемента  $P = 0,95$ , а  $m = 4$ , то  $P(t) = 1 - (0,05)^3 = 0,999$ . Таким чином, стає можливим створення надійних систем з ненадійних елементів.

**При резервуванні заміщенням** резервні елементи включаються в роботу тільки при відмові основного. В цьому випадку для виявлення відмови необхідний спеціальний прилад, а для включення резерву – відповідний пристрій. При резервуванні заміщенням

середнє напрацювання до відмови системи, що складається з одного основного (працюючого) і однотипних резервних елементів, визначається за формулою:

$$T_{сер} = (1+m) \cdot T_{ел},$$

де  $T_{ел}$  — середнє напрацювання до відмови елементу.

Існує також **облегшений резерв**, коли резервні елементи до моменту включення знаходяться в полегшеному режимі роботи і ймовірність їх відмови в цей період незначна.

На практиці часто застосовують **змішані системи резервування** із загальним резервуванням окремих ланцюгів і роздільним резервуванням найбільш відповідальних і менш надійних елементів.

### 13.2. Застосування резервування в механічних системах

Специфіка структур механічних систем полягає в тому, що метод резервування об'єктів порівняно рідко застосовується в чистому вигляді. Можна навести приклади резервування для машин, до яких пред'являються високі вимоги надійності. Наприклад, для підвищення надійності ходової частини вантажних автомобілів застосовуються подвійні задні колеса (навантажений резерв), запасне колесо (ненавантажений резерв), окрім основного є ручне гальмо (ненавантажений резерв). У технологічних автоматизованих комплексах застосовується установка дублюючих агрегатів і устаткування або створюються паралельні технологічні потоки (одночасне рішення завдань продуктивності і надійності).

Приклади конструкцій підшипникових вузлів з резервуванням показані на рис. 80. У разі ненавантаженого резервування (підшипник ковзання — резервний) при відмові шарикового підшипника система продовжуватиме роботу на підшипнику ковзання (рис. 80,а). При цьому слід використовувати систему контролю, яка б виявляла включення в роботу підшипника ковзання.

У підшипниковому вузлі з постійним резервуванням навантаження може сприйматися одним кільцем у разі відмови іншого кільця (рис. 80,б). В цьому випадку слід проводити перевірки стану кільця при технічному обслуговуванні і ремонті машини.

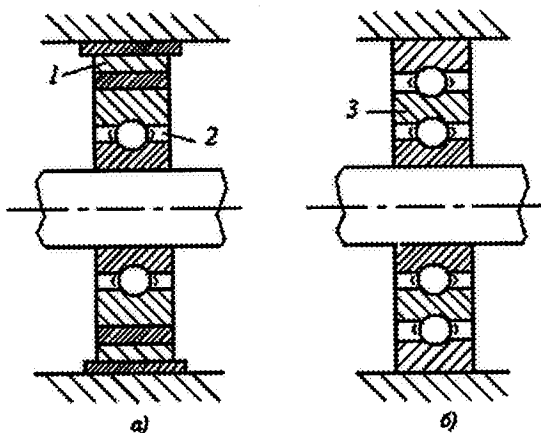


Рис. 80. Конструкції підшипникових вузлів з резервуванням: а) — ненавантажене резервування; б) — постійне резервування; 1 — підшипник ковзання; 2 — підшипник кочення; 3 — вільне проміжне кільце.

Для механічних систем і виробів більш характерним способом підвищення надійності є застосування принципу надлишковості, який є більш загальним, ніж резервування.

Створення розширеного діапазону міцності, зносостійкості, жорсткості, вібростійкості, теплостійкості та ін. призводить до того, що підвищується запас надійності, оскільки існуючий експлуатаційний стан об'єктів віддаляється від граничних значень функціональних параметрів.

При створенні надійних систем принцип надлишковості виявляється в тому, що ресурс виробу встановлюється набагато нижче за середній термін служби до відмови. Недовикористання потенційної довговічності виробу гарантує його безвідмовну роботу.



## Список використаних джерел

1. **Ахматов А.С.** Молекулярная физика граничного трения. — М.: ГИФМА, 1963. — 472 с.
2. **Богданович П.Н., Прушак В.Я.** Трение и износ в машинах. — Мн.: Выш.шк.,1999. — 374 с.
3. **Венцель С.В.** Применение смазочных масел в двигателях внутренне го сгорания. — М.: Химия, 1979. — 238 с.
4. **Дмитриченко Н.Ф.** Эластогидродинамика: теория и практика. — Львів: Львівська політехніка, 2000. — 224 с.
5. **Дмитриченко Н.Ф., Мнацаканов Р.Г.** Смазочные процессы в условиях нестационарного трения. — Житомир:ЖИТИ, 2002. — 308 с.
6. **Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н.** Трение и износ в экстремальных условиях. — М.: Машиностроение, 1986. — 224 с.
7. **Кламанн Д.** Смазки и родственные продукты. — М.: Химия, 1988. — 487 с.
8. **Когаев В.П., Дроздов Ю.Н.** Прочность и износостойкость деталей машин — М.: Высш. шк., 1991. — 319 с.
9. **Костецкий Б.И.** Износостойкость деталей машин. — К.: Техника, 1950. — 168 с.
10. **Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И.** Механо-химические процессы при граничном трении. — М.: Наука, 1972. — 173 с.
11. **Крагельский И.В., Михин Н.М.** Узлы трения машин. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
12. **Кулиев А.М.** Химия и технология присадок к маслам и топливам. — Л.: Химия, 1985. — 312 с.

13. **Мур Д.** Основы и применения трибоники. — М.: Мир, 1978. — 485 с.
14. **Повышение износостойкости на основе избирательного переноса** /Под ред. Д.Н. Гаркунова. — М.: Машиностроение, 1977. — 215 с.
15. **Проников А.С.** Надежность машин. — М.: Машиностроение, 1978. — 592 с.
16. **Ребиндер П.А.** Влияние активных смазочно-охлаждающих жидкостей на качества поверхности при обработке металлов. — М.: Ан СССР, 1946. — 31с.
17. **Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.** Структура и износостойкость металла. — М.: Машиностроение, 1982. — 280 с.
18. **Справочник по триботехнике: В 3т./** Под общ. ред. Хебты М., Чичинадзе А.В. — М.: Машиностроение, 1990.
19. **Старосельский А.А., Гаркунов Д.Н.** Долговечность трущихся деталей машин. — М.: Машиностроение, 1967. — 391 с.
20. **Трение, изнашивание и смазка: справочник.** В 2 кн./ Под ред Крагельского И.В., Алисина В.В. — М.:Машиностроение, 1978. — Кн.1. — 400 с.
21. **Триботехнология: Словарь-справочник** / С.Н. Соловев, Л.П. Клименко и др. Под общ. ред. С.Н. Соловьева. — Николаев: НГТУ им. П.Могилы, 2003. — 384 с.
22. **Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В.** Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Пер. с нем. — М.: Мир, 1977. — 547с.
23. **ЩигOLEв Б.М.** Математическая обработка наблюдений. — М.: Наука. — 1969. — 344 с.

## ЗМІСТ

1. ВЛАСТИВОСТІ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	9
1.1. Класифікація та експлуатаційні властивості мастильних матеріалів .....	9
1.2. Компоненти змащувальних масел .....	11
1.2.1. Базові масла і вплив фракційного складу на їх фізико-хімічні і триботехнічні показники .....	12
1.2.2. Функціональні присадки .....	14
1.2.3. Антифрикційні добавки .....	19
1.3. Основні характеристики твердих змащувальних матеріалів .....	20
1.4. Мастила .....	28
2. МЕТАЛ ТА ЙОГО ПОВЕРХНЯ .....	31
2.1. Деформація металів .....	31
2.2. Структура поверхневих шарів .....	34
2.3. Геометричні характеристики поверхонь деталей машин .....	35
3. ВИДИ ТЕРТЯ ТА ТЕОРІЇ ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ ТВЕРДИХ ТІЛ .....	39
3.1. Основні терміни та визначення .....	39
3.2. Адгезійна, молекулярна та молекулярно-механічна теорії зовнішнього тертя .....	42
3.3. Класифікація розриву фрикційних зв'язків .....	44
4. ВИДИ МАЩЕННЯ В ТРИБОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ .....	48
4.1. Діаграма Герсі — Штрібека .....	48
4.2. Тертя без змащувального матеріалу .....	50
4.3. Гідродинамічний режим мащення .....	51

4.4. Реологічні властивості мастильних середовищ .....	55
4.5. Еластогідродинамічний (контактно-гідродинамічний) режим мащення .....	59
4.6. Змішаний і граничний режими мащення .....	65
4.6.1. Механізми формування граничних змащувальних шарів .....	67
4.6.2. Структурні зміни поверхневих шарів металу при терті .....	73
<b>5. ЗНОШУВАННЯ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ .....</b>	<b>76</b>
5.1. Основні поняття та закономірності зношування .....	76
5.1.1. Стадії зносу триботехнічних пар.....	77
5.1.2. Класифікація видів зношування контактних поверхонь .....	80
5.2. Абразивне зношування .....	81
5.3. Втомне зношування .....	85
5.4. Молекулярно-механічне (адгезійне) зношування .....	88
5.5. Окисне зношування .....	93
5.6. Корозійно-механічне зношування .....	96
5.7. Фретинг-корозія.....	100
5.8. Механізми зношування при диспергуванні та пластичній деформації .....	102
5.9. Зношування при вибіркового перенесенні .....	103
<b>6. ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ .....</b>	<b>106</b>
6.1. Вибір технологічного процесу .....	106
6.2. Формування оптимальної топографії поверхні .....	107
6.3. Обробка деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД) .....	109
6.4. Нанесення захисного покриття .....	110
6.5. Опромінення потоками енергії високої густини .....	111
6.6. Термічна обробка робочих поверхонь деталей .....	112
6.7. Хіміко-термічна обробка поверхонь .....	114

6.8. Гальванічні покриття поверхонь деталей .....	115
6.9. Електроіскрове та електродугове зміцнення поверхонь ....	116
6.10. Експлуатаційні методи .....	116
6.10.1. Обкатування машин та механізмів .....	117
6.10.2. Змащування вузлів тертя .....	118
6.10.3. Вибір режиму роботи і умов експлуатації.....	120
7. ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ВУЗЛА ТЕРТЯ .....	121
7.1. Правила сполучення матеріалів .....	124
7.2. Розташування матеріалів за твердістю у парах тертя .....	126
7.3. Заміна у вузлах машин тертя ковзання на тертя кочення .....	128
8. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ .....	129
8.1. Характеристики складових надійності та технічного стану об'єкта .....	129
8.2. Економічний аспект надійності .....	132
8.3. Числові характеристики випадкових величин .....	134
9. ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ .....	142
9.1. Критерії оцінки безвідмовності системи.....	142
9.2. Показники для оцінки довговічності .....	150
9.3. Основні показники ремонтпридатності .....	152
9.4. Комплексні показники надійності.....	154
10. КЛАСИФІКАЦІЯ ВІДМОВ .....	157
10.1. Аналіз закономірностей, які зумовлюють зміни в матеріалах .....	157
10.2. Поступові (зносні), раптові та складні відмови .....	161
10.3. Відмови функціонування та параметричні відмови .....	165
10.4. Фактичні та потенційні відмови .....	166
10.5. Допустимі та недопустимі відмови.....	166

10.6. Вплив трибологічних процесів на відмови механічних систем .....	168
11. ОСНОВНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ .....	170
11.1. Нормальний розподіл (розподіл Гауса) .....	173
11.2. Розподіл Вейбулла .....	176
11.3. Експоненціальний розподіл .....	177
11.4. Розподіл Релея .....	178
11.5. Критерії згоди .....	179
12. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	185
12.1. Плани повного факторного експерименту $2^n$ (плани ПФЕ $2^n$ ).....	189
12.2. Плани дробового факторного експеримент (плани ДФЕ) .....	192
12.3. Статистична значимість коефіцієнтів регресії та адекватність моделі .....	195
13. НАДІЙНІСТЬ СКЛАДНИХ СИСТЕМ .....	199
13.1. Способи резервування об'єктів .....	201
13.2. Застосування резервування в механічних системах.....	206
Список використаних джерел.....	208

Наукове видання

Дмитриченко Микола Федорович,  
Мнацаканов Рудольф Георгійович,  
Мікосянчик Оксана Олександрівна

## ТРИБОТЕХНІКА ТА ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ МАШИН

*Навчальний посібник*

Формат 60x84/16. Гарнітура PeterburgС. Ум. друк. арк. 9. обл.  
вид. арк. 8,5. ум. фарбо-відбитків 8. Папір офсетний. Друк  
офсетний. Підписано до друку 05.12.06. Зам. № 1363. Т.200.

**Науково-видавничий центр «Інформавтодор»**

Свідоцтво до внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготівників  
і розповсюджувачів видавничої продукції  
Серія ДК 2480 від 3.05.2006 р.

01042, м. Київ, вул. Патриса Лумумби, 15  
Тел. (044) 451-72-24