

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ Й НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА  
АКАДЕМІЯ

**«ТРИБОТЕХНІЧНІ ПРОЦЕСИ В БАЗОВИХ ВУЗЛАХ  
АВТОМАТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ»**

*Конспект лекцій*

**Підготовка:** магістр за освітньо-науковою програмою

**Галузь знань** 13 «Механічна інженерія»  
(шифр і назва напрямку підготовки)

**Спеціальність** 131 «Прикладна механіка»  
(шифр і назва спеціальності)

**Спеціалізація** Комп'ютерне моделювання і проектування процесів і машин

Затверджене на засіданні кафедри **КМШМ** Протокол  
№ від « » \_\_\_\_\_ 2019 р.

КРАМАТОРСЬК 2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ Й НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА  
АКАДЕМІЯ

**«ТРИБОТЕХНІЧНІ ПРОЦЕСИ В БАЗОВИХ ВУЗЛАХ  
АВТОМАТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ»**

*Конспект лекцій*

Затверджене на засіданні кафедри **КМШМ** Протокол  
№ від « » \_\_\_\_\_ 2019 р.

КРАМАТОРСЬК 2019

# ЗМІСТ

## 1 ТРИБОТЕХНІКА І ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ МАШИН

### 1.1 Вступ, основні положення

### 1.2 Основні терміни й визначення

#### 1.2.1 Розділи триботехники

#### 1.2.2 Терміни

## 2 ПРОБЛЕМИ, ПОВ'ЯЗАНІ З ТРИБОТЕХНІКОЮ

## 3 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОВЕРХНЮ ДЕТАЛІ

### I ІІ ГЕОМЕТРІЮ

#### 3.1 Параметри шорсткості

#### 3.2 Залишкові напруження, структурні й фазові перетворення

## 4 ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

## 5 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

#### 5.1 Поверхнева енергія

#### 5.2 Адсорбція й хемосорбція

#### 5.3 Адсорбційний ефект зниження міцності (ефект Ребиндера)

## 6 КОНТАКТ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ

## 7 ТЕРТЯ КОВЗАННЯ (ШВИДКІСТЬ ТІЛА В РІЗНИХ ТОЧАХ ТОРКАННЯ)

## 8 ТЕРТЯ КОЧЕННЯ

## 9 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ ПАРИ ТЕРТЯ

### 9.1 Основні визначення

### 9.2 Механізм зношування металевих поверхонь

## 10 ВИДИ ЗНОШУВАННЯ

### 10.1 Класифікація

### 10.2 Утомлювальне зношування металевих поверхонь

### 10.3 Водневе зношування

#### 10.3.1 Область прояву водневого зношування

#### 10.3.2 Види водневого зношування

#### 10.3.3 Методи попередження й зменшення водневого зношування

### 10.4 Абразивне зношування

#### 10.4.1 Загальні відомості

#### 10.4.2 Зношування поверхонь деталей твердими абразивними частками

#### 10.4.3 Абразивне зношування при ударі

#### 10.4.4 Зношування від абразивних часток у зазорі пари тертя

## АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Металеві антифрикційні матеріали

НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ

Самозмащувальні матеріали

**Матеріали, що містять фторопласти.**

**Матеріали з дисульфідом молібдену й інших твердих змащень.**

## **Графіт і графітові матеріали.**

Про ротапринтний метод використання змащення

Матеріали для вузлів тертя, що працюють при високих температурах

**ЗНОСОСТІЙКІ МАТЕРІАЛИ**

**КОНСТРУКТИВНІ СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ**

**ТЕХНОЛОГІЧНІ СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ**

**ЗМАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Види змащення

Механізм мастильної дії при граничному змащенні

Рідкі мастильні матеріали

Присадки до мастильних матеріалів

Пластичні мастильні матеріали

Тверді мастильні матеріали

**ЛАБОРАТОРНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА ТЕРТЯ і ЗНОШУВАННЯ**

1 Класифікація

2. Испитові машини тертя

# 1 ТРИБОТЕХНІКА І ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ МАШИН

## 1.1 Вступ, основні положення

Триботехніка – наука про тертя, зношування, змащення. Курс триботехніки дає уявлення про природу й закономірності зовнішнього тертя й зношування шорсткуватих поверхонь, сучасні теорії тертя, зокрема молекулярно- механічну теорію, методи визначення коефіцієнтів тертя, розрахунку й прогнозуванні інтенсивності зношування; види, природу й механізми абразивного зношування, значення змащень і присадок при терті і зношуванні, методики підбору матеріалів для деталей що труться, методи підвищення зносостійкості, тертя й зношування в особливих умовах (в агресивних середовищах, вакуумі, при низьких і високих температурах), методи і устаткування, що застосовуються для досліджень тертя й зношування, напрямки розвитку.

Великий внесок у розвиток триботехніки внесли такі вчені: С.Б.Айнбіндер, Б.В.Дерягин, В.А.Білий, Д.Н.Браун, Д.Н.Гаркунов; А.Ю.Ішлінській, И.В.Крагельский, Н.М.Міхін, М.А.Левитин; К.Іпрамов; П.А.Ребиндер, М.Н.Хрущов; А.В.Чичинадзе, Ф.П.Боуден, Д.Тейбор.

Погляди вчених із приводу тертя відрізняються. Так, представники англійської школи (Ф.П.Боуден) вважають головним у терті адгезійну взаємодію двох тіл, утворення містків зварювання. Руйнування цих містків зумовлює силу тертя й зношування. Вони вважають, що об'ємне деформування поверхневих шарів відіграє незначну роль, для металів воно завжди пластичне, при цьому коефіцієнт тертя є величиною постійної, його значення визначається відношенням опору на зріз до твердості менш міцної складової пари тертя

Багато хто з інших (у т.ч. вітчизняних) учених природу тертя пояснюють трохи інакше: в нормальних умовах тертя утворення містків зварювання між двома тілами може бути усунене змащенням, плівками окислів, головну роль грає об'ємне деформування мікронерівностей, що безупинно утворюються під навантаженням

Зношування настає в результаті їхній втомлювального руйнування через багаторазову їхню деформацію, нерівності деформуються як пружно, так і пластично. У цих умовах коефіцієнт тертя для даної пари варіюється (мінється) залежно від тиску, розміру поверхні, температури; таким чином,  $f$  – комплексна характеристика, яка залежить від властивостей тіл, геометричних обрисів  $\square$ н.  $\square$   $\square$  геометричні і так далі.

Обидві точки зору існують у реальних процесах.

Значний внесок у вивчення тертя в XV столітті вніс Леонардо да Вінчі. Він обґрунтує неможливість створення вічного двигуна, однією з причин вважає тертя. Він уперше ввів поняття коефіцієнта тертя, показав, що сила тертя залежить від матеріалу тертьових поверхонь, якості їхньої обробки, винайшов роликочий і кульковий підшипники.

В 1699 р. француз Амонтон уперше сформулював знаменитий і застосований зараз закон залежності тертя від величини навантаження, нормальної до поверхні тертя (рис.1):

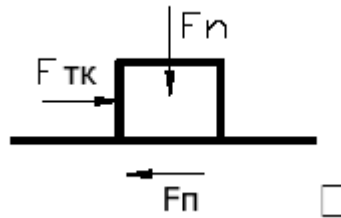


Рисунок 1 –

Амонтон-тертя - це підйом одного тіла по поверхні іншого.

Л. Ейлер (1750 р.) перший пояснив, чому опір при переході від стану спокою до стану руху завжди більше (тертя спокою й тертя руху).

Творцем науки про тертя вважається Шарль Кулон (1781р.). У праці «Теорія простих машин» він охопив основні аспекти тертя: опір ковзанню, коченню, стягуванню, узагальнив закон Амонтона й показав, що частина тертя слабо залежить від навантаження (або не залежить), тобто

де  $A$  - частина тертя, що залежить від «зчепленості» поверхонь тертя.

Кулон показав, що тертя залежить від багатьох факторів (навантаження, швидкість, матеріали, шорсткість, змащення, температура). Досліджуючи тертя катання, Кулон вивів формулу опору перекочуванню  $F_k$ :

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя кочення, має розмірність довжини;

$r$  - радіус перекочування тіла;

$F_n$  - його вага, Н.

Ця формула використовується й зараз, хоча її багаторазово намагалися спростувати.

Б. Томпсон (1798р.) показав, що механічна енергія при терті зникає, а перетворюється на тепло.

У середині XIX століття вперше були висловлені припущення про  $\mu$  н.  $\mu$  геом природу тертя (адгезія - зчеплення, злипання поверхонь тіл, притиснутих друг до друга).

Працями багатьох учених була розроблена концепція молекулярно-механічної природи тертя, у якій процес тертя представляється як результат двох взаємозалежних процесів: деформації контактуючих  $\mu$  н.  $\mu$  геометричні і молекулярної взаємодії матеріалів на плямах фактичного контакту. По цій теорії коефіцієнт тертя (сумарний)

де  $F_m$  - молекулярна (н.н. геом) складова сили тертя;  
 $F_d$  - механічна (деформаційна) складова сили тертя;  
 $f_m$  - молекулярна (н.н. геом) складова коефіцієнта тертя;  
 $f_d$  - механічна (деформаційна) складова коефіцієнта тертя

Триботехніку ділять на 4 розділи:

- 1 Основи зносостійкості при терті.
- 2 Конструктивні методи підвищення довговічності й надійності машин.
- 3 Технологічні способи підвищення довговічності деталей тертя.
- 4 Питання експлуатації машин, пов'язані із забезпеченням зносостійкості; основи надійності машин.

## 1.2 Основні терміни й визначення

### 1.2.1 Розділи триботехники

Трибоніка – від грецького «трибос» – тертя. Триботехніка (ширше – наука про контактну взаємодію твердих тіл при їхньому відносному русі) охоплює комплекс питань тертя, зношування, змащення.

Трибохимія - вивчає взаємодія контактуючих поверхонь із хімічно активним середовищем: проблеми корозії при терті, хімічні основи виборчого переносу матеріалів, вплив на поверхню деталей хімічно активних речовин, що виділяються при терті зі змащення й тертьових поверхонь.

Трибофізика – вивчає фізичні явища взаємодії контактуючих поверхонь при їхньому взаємному переміщенні.

Трибомеханіка – вивчає механікові взаємодії контактуючих поверхонь при терті, закони розсіювання енергії, імпульсу, механічна подоба, коливання при терті, реверсивне тертя, рівняння гідродинаміки тощо .

Терміни по триботехніке стандартизовані ГОСТ 23.002-78 – по тертю, зношуванню й змащенням.

### 1.2.2 Терміни

Зовнішнє тертя – явище опору відносному переміщенню, що виникає між двома тілами в зонах зіткнення поверхонь по дотичних до них, що супроводжується н.н. геом енергії (розсіюванням).

Зношування – процес руйнування й відділення матеріалу з поверхні твердого тіла й (або) накопичення його залишкової деформації при терті, що проявляється в поступовій зміні розмірів і (або) форми тіла.

Знос – результат зношування, обумовлений у встановлених одиницях.

Знос може виражатися в одиницях довжини, обсягу, маси й інших.

Зносостійкість – властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя, оцінюване величиною, зворотною швидкості зношування або інтенсивності зносу.

Швидкість зношування - дорівнює інтенсивності зносу мінус відношення зносостійкості до інтервалу часу.

Масильний матеріал – матеріал, що вводиться на поверхні тертя для зменшення сили тертя й (або) інтенсивності зношування.

Змащення - дія масильного матеріалу, у результаті якого між двома поверхнями зменшуються сила тертя й (або) інтенсивність зношування.

Змазування – підведення масильного матеріалу до поверхні тертя.

Тертя спокою – тертя двох тіл при  $\square$ н.  $\square$   $\square$  геометричні  $\square$  до переходу до відносного руху.

Тертя руху – тертя двох тіл, що перебувають у відносному русі.

Тертя без масильного матеріалу – тертя двох тіл при відсутності на поверхні тертя уведеного масильного матеріалу будь-якого виду.

Тертя з масильним матеріалом – тертя двох тіл при наявності на поверхні тертя уведеного масильного матеріалу будь-якого виду.

Тертя ковзання – тертя руху двох твердих тіл, при якому швидкості тіл у крапках торкання різні по величині й напрямку або по величині й напрямку.

Тертя кочення – тертя руху двох твердих тіл, при якому їхньої швидкості в крапках торкання однакові по величині й напрямку.

Сила тертя – сила опору при відносному переміщенні одного тіла по поверхні іншого під дією зовнішньої сили, спрямованої по дотичній до загальної границі між цими тілами.

Найбільша сила тертя спокою – сила тертя спокою, будь-яке перевищення якої веде до виникнення руху.

Попередній зсув - відносне  $\square$ н.  $\square$   $\square$  геометричні двох твердих тіл при терті в межах переходу від стану спокою до відносного руху.

Швидкість ковзання - різниця швидкостей тіл у крапках торкання при ковзанні.

Поверхня тертя – поверхня тіла, що участвують у терті.

Коефіцієнт тертя – відношення сили тертя двох тіл до нормальної сили, що притискає ці тіла друг до друга.

Коефіцієнт зчеплення - відношення найбільшої сили тертя спокою двох тіл до нормального щодо поверхонь тертя сили, що притискає тіла друг до друга.

В 1979 році виданий словник- довідник по тертю, зношуванню й змащенню деталей машин, що містить більше 1200 термінів.

## ПРОБЛЕМИ, ПОВ'ЯЗАНІ З ТРИБОТЕХНИКОЮ

Підвищене зношування деталей у зчленуваннях в одних випадках порушує  $\square$ н.  $\square$   $\square$   $\square$ оність робочого простору машини (наприклад, у поршневих машинах), в інші порушує нормальний режим змащення, у треті приводить до втрати кінематичної точності механізму.



У результаті зношування знижується потужність двигуна, збільшується витрата пально-мастильних матеріалів, падає продуктивність компресорів; виникає можливість витоку отрутних і вибухонебезпечних продуктів через сальники й ущільнення; знижуються тягові якості транспортних машин, погіршується керування літаками й автомобілями (знижується безпека руху); зменшується продуктивність; знижується точність і якість обробки виробів на металорізальних верстатах і т.д.

Зношування інструмента й робочих органів машин, крім зниження продуктивності, підвищує витрата енергії. Наприклад, зі зношуванням і затупленням зубів ковша екскаватора зменшується перетин зрізується стружки, що, ґрунту, збільшується опір різанню останнього, потрібен більший шлях для заповнення ковша.

Зношування й uszkodження поверхонь знижують опір утоми деталей і можуть служити причиною їхнього руйнування навіть при незначних концентраторах напруг і досить низьких номінальних напругах. Підвищене зношування порушує нормальна взаємодія деталей у вузлах, може викликати значні додаткові навантаження, удари в сполученнях і вібрації, стати причиною раптових руйнувань. З підвищеним зношуванням нерідко зв'язаний □ оно ша-ром □ мий шум машин.

Заїдання або заклинювання деталей може привести до аварійної ситуації.

Так, заїдання лопатки ротора масляного насоса може викликати його заклинювання, припинення подачі масла до підшипників і аварію машини. У багатоланкових механізмах навіть невелике зношування окремих елементів може підсумуватися на веденій ланці й порушувати нормальне функціонування механізму.

Зношування циліндропоршневої групи двигуна збільшує засмічення повітря газами, що відробили: 100 зношених автомобілів забруднюють повітря газами, що відробили, як 125 нових автомобілів.

Примітно, що маса механізму або машини в міру їхнього зношування зменшується незнано.

Термін служби машин - календарна тривалість експлуатації виробу до руйнування або іншого граничного стану. Граничний стан може встановлюватися по змінах параметрів, умовам безпеки, економічним показникам, по необхідності першого капітального ремонту й т.п. Вихід з ладу деталей і робочих органів машин при нормальних умовах експлуатації є наслідком фізичного зношування різних видів: усталостних руйнувань, повзучості матеріалів, механічного зношування, корозії, ерозії, кавітації, старіння матеріалу й □ н..

Особливо велике зношування деталей і робочих органів машин- знарядь, які експлуатуються в абразивному й агресивному середовищах, і деталей транспортних машин, що працюють в умовах бруду й пилу.

Більшість машин (85...90%) виходить з ладу через зношування деталей. Витрати на ремонт і технічне обслуговування машини в кілька разів перевищують її вартість: для автомобілів в 6 разів, для літаків до 5 разів, для верстатів до 8 разів.

Більші матеріальні втрати народне господарство терпить від підвищеного тертя у вузлах машин. Відомо, що більше половини палива, споживаного автомобілями, тепловозами й іншими видами транспорту, витрачається на подолання опору, створеного тертям у рухливих зчленуваннях. У текстильному виробництві на подолання опору тертю зачіпається близько 80 % споживаної енергії. Низькі КПД багатьох машин обумовлені головним чином більшими втратами на тертя. Так, КПД глобоїдного редуктора, установлюваного в ліфтах, металорізальному встаткуванні, шахтних підйомниках і ін., у приробленому стані становить тільки 0,65...0,70, а в такій розповсюдженій парі, як гвинт- гайка, усього лише 0,25.

### 3 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОВЕРХНЮ ДЕТАЛІ І ЇЇ ГЕОМЕТРІЮ

#### 3.1 Параметри шорсткості

Усяке тіло має відхилення від ідеальної геометричної форми.

Похибки обробленої поверхні бувають трьох видів:

- 1) плоско шаромі і інші відхилення;
- 2) хвилястість поверхні;
- 3) шорсткість поверхні.

Шорсткість поверхні визначають по її профілі, що утвориться в перетині цієї поверхні площиною, перпендикулярної до номінальної поверхні (ін. 21).

Відповідно до ДСТУ шорсткість поверхні, незалежно від матеріалу й способу виготовлення, оцінюють кількісно одним або декількома параметрами з наступного переліку:

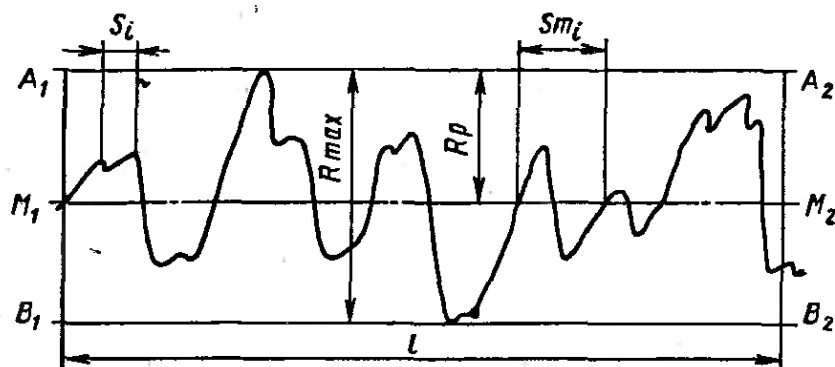


Рисунок – Схема до визначення параметрів шорсткості поверхні

$R_a$  – середнє арифметичне відношення профілю – кращий параметр

$$\bar{R}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

$R_z$  - висота нерівностей профілю на 10 точок

$$R_z = \frac{1}{5} \left[ \sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right]$$

$R_{max}$  – найбільша висота нерівностей (відстань між лініями виступів і западин);  
 $S_m$  – середній крок нерівностей;  
 $S$  – середній крок місцевих виступів;  
 $t_p$  – відносна опорна довжина профілю;  
 $r$  – значення рівня перерізу профілю;  
 $l$  – базова довжина;  
 $n$  – число обраних точок;  
 $y_i$  – відстань між будь-якою точкою профілю й середньою лінією профілю.

### Залишкові напруження, структурні й фазові перетворення

Залишковими називають напруження, що існують у тілі при відсутності зовнішніх силових навантажень на нього. Наявність цих напружень обумовлено нерівномірністю температури по об'єму тіла, утворенням під час нагрівання або охолодження нових структур з іншою щільністю, наявністю включень та ін.. Залишкові напруження утворюють рівноважну структуру. Залежно від обсягу, що охоплюється цією системою, розрізняють власні напруження трьох родів:

напруження першого роду врівноважуються у великих обсягах; порівнянних з розмірами деталі;

напруження другого роду (мікро напруження) урівноважуються в межах одного або декількох кристалічних зерен;

напруження третього роду – субмікроскопічні перекручування кристалічних ґрат. Напруження другого й третього родів не мають орієнтування щодо осей деталі.

Пластична деформація викликає зменшення щільності металу або, що те ж саме, збільшення його питомого обсягу. Пластично деформований при різанні шар не може вільно збільшуватися в обсязі (цьому перешкоджають недеформовані металеві вироби), тому в зовнішньому шарі з'являються напруження стиску, а в іншій частині – напруження розтягання.

Це міркування припускає, що шар, який деформується, не перебуває навіть частково в стані повзучості. Залежно від температури метал може бути в пружному й пластичному станах. У стані повзучості металу сили пружності не проявляються, і деформація протікає без прагнення матеріалу до відновлення форми. За температуру  $t_p$  переходу із пружного стану металу в пластичний можна прийняти  $450^{\circ}\text{C}$  для вуглецевих сталей і  $550^{\circ}\text{C}$  для легованих.

Середня температура поверхневого шару сталі при шліфуванні становить  $300 \dots 400^{\circ}\text{C}$ , у самої поверхні  $800 \dots 850^{\circ}\text{C}$ . Температури того ж порядку розвиваються при швидкісному точінні. Нагрівання поверхневого шару металу при обробці спричиняє утворення в ньому температурних напружень.

Припустимо, що в процесі обробки циліндричної деталі шар 1 перебуває в стані повзучості. У цьому шарі внутрішні напруження відсутні, а якщо до того існували залишкові напруження, то вони знімаються. У шарі 2 з температурою нижче  $t_p$ , але вище нормальної  $t_n$ , виникають напруження стиску, а в шарі 3 – розтягання. Напруження ці тимчасові. Як тільки зовнішній шар остудиться до температури  $t_p$ , він стане пружним. Зустрічаючи опір скороченню, він виявляється розтягнутим в окружному напрямку. У шарі 2 стискаючі напруження зростають. При подальшому охолодженні до повного вирівнювання температури по глибині металу напруження розтягання в шарі 1 зростають, а в шарах 2 і 3 устанолюється система напруг, що врівноважують, стиску. По характері залишкові температурні напруження, як і ті, що обумовлені пластичною деформацією, є напруженнями першого роду.

Однак через неоднакове тепловиділення на суміжних ділянках оброблюваної поверхні й різного ступеня пластичної деформації виникають також залишкові напруження другого роду.

Місцеві фазові й структурні перетворення поверхневого шару деталі, що шліфується, відомі за назвою шліфувальних припалень. Вони утворюються внаслідок інтенсивного (майже миттєвого) тепловиділення на невеликій ділянці поверхневого шару.

При різанні металів протікають два протидіючих один одному процеси: зміцнення в результаті дії сил різання, які тим вище, чим більше тиск різання, і знеміцнення – зняття наклепу за рахунок температури різання, що підвищується. Ступінь наклепу й товщина наклепаного шару за інших рівних умов залежать від режиму різання.

### ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

Якість поверхні деталей характеризується мікро- і макрогеометрією поверхні, хвилястістю, структурою, зміцненням і залишковими  $\sigma$  шаром  $\sigma$ . Глибина поверхневого шару і якість поверхні залежать від основного матеріалу, виду обробки, основних параметрів  $\sigma$  онструмента, режиму обробки й роду мастильно-охолодної рідини.

Поверхневий шар неоднорідний за будовою (рис.3)

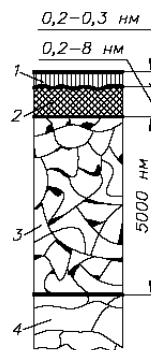


Рисунок 3 – Структура поверхневого шару шліфованої деталі з вуглецевої сталі.

Граничний шар 1 складається з адсорбованої плівки газів, вологи й мастильно-охолодної рідини, яку можна видалити лише нагріванням деталі у вакуумі. Шар 2 – дефо-

рмований, сильно роздроблений метал з перекрученими ґратами кристалів і зі знеуглецьованими під дією високих температур при шліфуванні ділянками; у ньому перебувають окисли й нітриди, порожнечі, надриви й тріщини. Шар 3 складається із зерен, сильно деформованих під дією тиску (шліфувального кола) і тангенціальних сил при шліфуванні; у ньому міститься структурно-вільний цементит, що утворився під дією високих температур. Шар 4 – метал з вихідною структурою. При більш тонкій обробці (абразивними брусками, стрічками й т.д.) шар 1 не змінюється по товщині, а шари 2 і 3 зменшуються відповідно до меншого тиску й температурою поверхні при обробці.

Наклеп металу під виступами нерівностей звичайно більше, ніж під западинами. Поверхневий шар залежно від зазначених вище обставин має товщину при точінні 0,25... 2,0 мм, при шліфуванні 12...75 мкм, при тонкому шліфуванні 2...25 мкм, при поліруванні 2 мкм.

Варто мати на увазі, що шліфувальні припали можуть досягати глибини 5 мм.

Поверхневий шар може перебувати в напруженому стані. Залишкові напруження в ньому при механічній обробці можуть досягати 560...1000 Мпа й бути як стискаючими, так і розтягувальними.

Система дефектів – слабких місць поверхні деталі – є основою, на якій, починаючи з найменших деформацій, розвиваються □оно шаром□ □и.

Внаслідок наявності дефектів на поверхні природно очікувати, що руйнування поверхні при терті буде відбуватися саме в цих місцях, тобто процес зношування буде носити виборчий характер. У міру зношування поверхні слабкі місця будуть виникати знову.

## ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

### Поверхнева енергія

Поверхневий шар металу має велику активність. Це обумовлено тим, що усередині твердого тіла кожний атом кристала оточений іншими атомами й пов'язаний з ними міцно в усіх напрямках, а в атомів, розташованих на поверхні, із зовнішньої сторони немає сусідів у вигляді таких же атомів. У зв'язку із цим у поверхневому шарі у атомів твердого тіла залишаються вільні зв'язки, наявність яких створює поблизу поверхні атомне (□оно шаромне) □оно шаром□. Щоб при такому несиметричному силовому полі атом кристала перебував у рівновазі, необхідне інше, ніж усередині кристала, розташування атомів самого верхнього шару.

Поверхневі атоми внаслідок вільних зв'язків мають більшу енергію, ніж атоми усередині твердого тіла. Надлишок енергії, віднесеної до одиниці поверхні, називають питомою поверхневою енергією або просто поверхневою енергією. Повна енергія кристала складається із внутрішньої й поверхневої енергії. Остання пропорційна поверхні розділення фаз, тому особливо зростає при диспергуванні твердих □оно. Вона багато в чому визначає □онотивості високодисперсних систем – колоїдів.

При зіткненні двох тіл поверхнева енергія зникає й може виділитися у вигляді теплоти або витратитися на підстроювання в кристалічних ґратах одного кристала до іншого.

### Адсорбція й хемосорбція

У результаті взаємодії ненасичених силових полів твердого тіла із силовими полями молекул газу, що рухаються до твердої поверхні, або взаємодії рідини, що стикається, із твердим тілом, поверхня останнього покривається плівкою речовин, газів, що втримуються в навколишній середовищі, пару води, , і парів інших рідин, що звичайно перебувають у повітрі, а також речовин, розчинених у рідинах і дотичних з поверхнею твердого тіла. Явища утворення на поверхні твердого тіла найтонших плівок газів, парів або розчинених речовин, або поглинання цих речовин поверхнею тіла називають адсорбцією

При хімічній адсорбції (хемосорбції) полярні кінці молекул, зв'язуючись із поверхнею тіла, утворюють у ній моношар, подібний з хімічною сполукою. Рухливість молекул у результаті цього значно зменшується. Так, є підстави вважати, що адсорбція жирних кислот на металевих поверхнях при нормальній температурі носить в основному фізичний характер, а при підвищеній температурі – хімічний.

Рідини з молекулами великої довжини, що містять у розчині поверхнево-активні речовини, утворюють над моношаром полярних молекул граничний шар, у якому молекули розташовані не безладно, як в обсязі рідини, а правильно орієнтовані. Граничні шари перебувають в особливому агрегатному стані, маючи квазикристалічну структуру, що дає підставу говорити про особливу фазу рідини – граничну фазу.

### Адсорбційний ефект зниження міцності (ефект Ребиндера)

Найбільшу здатність до адсорбції мають поверхово активні речовини, молекули яких орієнтуються при адсорбції перпендикулярно до поверхні тіла, з яким взаємодіють (органічні кислоти, спирти, смоли, дистильована вода). Ці молекули полярні. Наприклад, якщо помістити металеве тіло поруч із летучою речовиною, (наприклад, валеріановою кислотою), то молекули кислоти, випаровуючись і переміщуючись через повітря, покривають поверхню тіла шаром в 1 молекулу, причому, якщо намочити поверхню, то виходить номолекулярний шар строго орієнтованих молекул поверхово активної речовини.

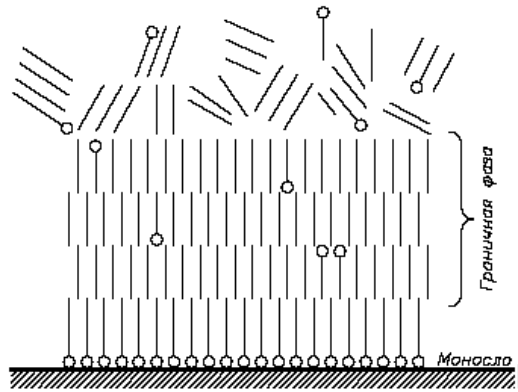


Рисунок - Схема адсорбованого моношару полярних молекул і орієнтація неполярних молекул

П.А. Ребиндером встановлено, що поверхово активне середовище значно знижує опір деформуванню (у холодному стані) і руйнуванню твердих тіл у і "розсовують\_їх"

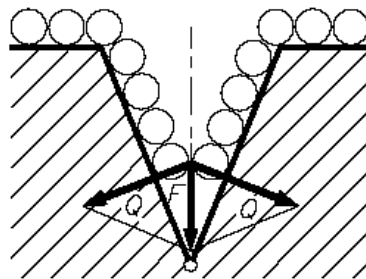


Рисунок - Схема адсорбційно - розсувної дії полярних молекул мастильного матеріалу (F тиск адсорбованого шару; Q – сили, що розклинюють)

Розплавлені легкоплавкі метали є сильними поверхово активними речовинами відносно до більш тугоплавких й різко знижують їхню міцність.

### КОНТАКТ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ

Взаємний контакт деталей відбувається по вершинах і виступам шорсткості, що деформується під дією зовнішнього навантаження.

Деформації виступів ділять на:

- пружні (еластичні тіла - наприклад, гума з дуже гладкою поверхнею);
- пружно пластичні без зміцнення;
- пружно пластичні (пружно пластичний контакт) зі зміцненням.

Схема контакту поверхонь двох тіл показана на мал.7. При цьому розрізняють:

- 1) номінальну площу контакту,  $A_a = a \times b$ ;
- 2) контурну площу контакту,  $A_k = 5...15\%$  від  $A_a$ ;
- 3) фактичну площу контакту,  $A_f = 0,01...0,1\%$  від  $A_a$

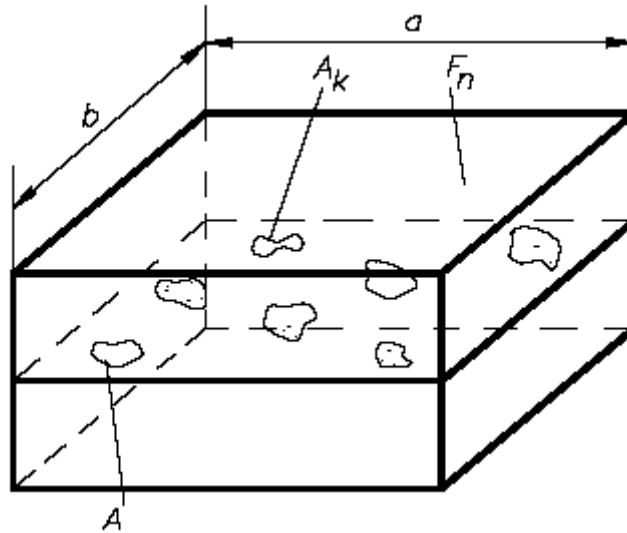


Рисунок Схема контакту поверхонь тіл

Номінальний тиск

$$p_h = p_a = \frac{N}{A_a}$$

Контурний тиск

$$p_k = \frac{N}{A_k}$$

Фактичний тиск

$$p_r = \frac{N}{A_r}$$

Фактична площа контакту  $A_r$  залежить від навантаження за рахунок деформації вершин виступів і міняється після 1-го і наступних навантажень.

$A_r$  - фактичний контакт збільшується при збільшенні навантаження, зменшенні шорсткості, росту радіуса закруглень виступів  $r$  і за рахунок часу дії навантаження.

$A_r$  - фактичний контакт зменшується зі збільшенням границі текучості, висоти нерівності (шорсткості).

При взаємодії двох різних матеріалів - фізичні властивості більше м'якого й геометрія поверхні більше твердого з тіл визначають  $A_r$  (фактичний контакт).

При наявності між поверхнями тертя тонкої плівки міді площа фактичного контакту  $A_r$  збільшується в 10...100 разів, знижуючи зношування.

### ТЕРТЯ КОВЗАННЯ (ШВИДКІСТЬ ТІЛА В РІЗНИХ ТОЧАХ ТОРКАННЯ)

Відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя сила тертя визначається як сума двох складових



$$F_{mp} = F_m + F_q \quad ,$$

де  $F_m$  - молекулярно-адгезійна складова;

$F_q$  - деформаційно-механічна складова.

Коефіцієнт тертя

$$f = \frac{F_{mp}}{N(F_n)} = f_m + f_q \cdot$$

Одна з найбільш використовуваних формул для визначення коефіцієнту тертя

$$f = f_m + f_d = \frac{2,4 \cdot \tau_0 \cdot (1 - \mu^2) \cdot r^{0,5}}{\mu \cdot \nu \cdot (\mu - 1) \cdot k_1 \cdot E \cdot h^{0,5}} + \beta + \frac{0,4 \cdot 2,5 \cdot a_r \cdot h^{0,5}}{k_1 \cdot \mu \cdot (\mu^2 - 1) \cdot r^{0,5}} \quad ,$$

де  $\tau_0$ ,  $\beta$  - фрикційні параметри, що визначають величину коливальних напружень в результаті молекулярної взаємодії (визначаються експериментально);

$a_r$  - коефіцієнт гістерезису при розтяганні- стиску;

$k_1$  - константа інтегрування, що залежить від  $\nu$ ;

$\mu$  - коефіцієнт Пуассона деформируемой поверхні;

$r$  - радіус закруглення вершин нерівностей (приведений).

На коефіцієнт тертя  $f$  впливають (при зростанні):

1 Зовнішнє навантаження  $N(F_n)$ . З ростом  $N$   $f_m$  зменшується,  $f_d$  збільшуються, тобто молекули відштовхуються в різнорідних матеріалів, в однорідних - притягаються.

2 Шорсткість поверхні. Більш тверде тіло впроваджується в більш м'яке:  $f_m$  - зменшується,  $f_d$  - збільшується.

3 Механічні властивості контактуючих тіл. Від властивостей менш твердого тіла залежить модуль пружності  $E$ .

4 Температура контактуючого тіла:  $f_m$  - зменшується,  $f_d$  - збільшується (зварювання).

5 – Швидкість ковзання – впливає неоднозначно

## ТЕРТЯ КОЧЕННЯ

Сила тертя кочення значно менша за силу тертя ковзання. Опір коченню пояснюється деформаційними втратами в лежачому нижче твердому тілі. Тертя при відсутності пластичної деформації обумовлене гістерезисними втратами у твердому тілі. При терті кочення відбувається взаємне прослизання поверхонь, яке можна спостерігати при коченні кульки. Окружність АВ кульки переміщається посередині канавки, а окружність CD торкається її краю. Окружність АВ проходить за один оборот кульки більшу відстань, ніж окружність CD. Ця різниця й спричиняє ковзання поверхонь тертя.

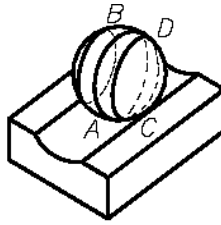


Рисунок Кулька, що котиться по канавці

Сила тертя кочення приблизно в 10 разів менше тертя ковзання - зменшується робота деформації. При твердих поверхнях  $F_{\text{кочення}}$  ще менше.

Сила тертя кочення

$$F_{\text{кач}} = \frac{k \cdot N^n}{D^m} = \frac{F_o \cdot R}{N} \cdot \frac{N^n}{D^m},$$

де  $k$  - константа, що залежить від матеріалу;

$N$  - навантаження;

$D$  - діаметр,  $D = 2R$ ;

$n = 1,7 \dots 1,85$ ;

$m = 1,5 \dots 1,6$  (залежить від змащення).

На силу кочення впливають: в'язкість змащення, розмір кульок (роликів), тертя в сепараторах, шорсткість.

Для підшипників кочення  $f_{\text{коч}} = 0,002 \dots 0,008$ .

Якщо використовувати похилу площину, то такому  $f_{\text{коч}}$  відповідає кут  $0^\circ 7' \dots 0^\circ 27'$  (прилад не вловить кутів).

Момент тертя в підшипниках кочення.

$$T_{mp} = 0,5 \cdot f_r \cdot F_r \cdot d \quad \text{або} \quad T_{mp} = 0,5 \cdot f_a \cdot F_a \cdot d,$$

де  $f_r$ ,  $f_a$  - коефіцієнти тертя від радіальних і осьових навантажень, віднесені до діаметра вала  $d$ ;

$d$  - діаметр вала;

$F_r$ ,  $F_a$  - радіальні й осьові навантаження.

Сила тертя в підшипниках кочення збільшується при технологічних і монтажних погрішностях, високих швидкостях і терті в ущільненнях.

## ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ ПАРИ ТЕРТЯ

### Основні визначення

Пари тертя - два вузли машини, що контактують поверхнями в умовах експлуатації або випробувань (зуби ковша із землею - не пари тертя).

Руйнування поверхонь твердого тіла, що проявляється в зміні його розмірів або форми (маси), називають зношуванням.

Зношування - результат зношування, виражений в одиницях довжини, обсягу, маси.

Інтенсивність зношування - відношення зношування деталі (або випробуваного зразка) до шляху тертя або обсягу виконаної роботи. При визначенні інтенсивності зношування може виявитися більше доцільним відносити зношування до іншого показника, загальному для всіх вузлів і агрегатів даної машини. Так, для автомобілів як такий показник може бути прийняте число кілометрів пробігу, а для тракторів - число гектарів оранки.

Швидкість зношування - відношення зношування деталі до часу, протягом якого відбувалося зношування.

Зносостійкість оцінюють величиною, зворотною інтенсивності або швидкості зношування.

Граничним зношуванням деталі (вузла) називають зношування, при якому подальша експлуатація стає неможливою, внаслідок виходу деталі (вузла) з ладу, неекономічної або неприпустимої, через зниження надійності механізму.

### Механізм зношування металевих поверхонь

У процесі зношування виділяють три явища:

- взаємодія поверхонь тертя;
- зміни, що відбуваються в поверхневому шарі металу;
- руйнування поверхонь.

Ці явища безупинно переплітаються, взаємно впливаючи один на одного.

Взаємодія поверхонь може бути механічним і молекулярним.

Механічна взаємодія виражається у взаємному впровадженні й зачепленні нерівностей поверхонь у сукупності з їхнім зіткненням у випадку ковзання грубих поверхонь. Молекулярна взаємодія проявляється у вигляді адгезії й схоплювання. Адгезія не тільки спричиняється необхідністю додатка дотичної сили для відносного зрушення поверхонь, але й може привести до виривання матеріалу. Схоплювання властиво тільки металевим поверхням і відрізняється від адгезії більше міцними зв'язками.

Молекулярна взаємодія можливо також на ділянках взаємного впровадження поверхонь. Воно обов'язково буде при руйнуванні масляної плівки. Зміни на поверхнях тертя обумовлені пластичною деформацією, підвищенням температури й хімічною дією навколишнього середовища.

Зміни, викликані деформацією, полягають у наступному:

1 Багаторазові пружні деформації через недосконалість структури матеріалу приводять у певних умовах до усталостному викрашуванню поверхностей кочення, а багаторазові пружні деформації мікронерівностей поверхностей ковзання розпушують структуру.

2 Пластичне деформування змінює структуру матеріалу поверхностного шаруючи. Пластичне деформування твердих тіл складається із чотирьох найбільш важливих елементарних процесів: 1) ковзання по кристаллографіческим площинах (ковзання в окремих зернах полікристалічного тіла відбувається звичайно по декількох площинах, число яких зростає з підвищенням напруження); 2) двойникования кристалів;

3) відхилення атомів від правильного розташування в ґратах і їхньому тепловому русі; 4) руйнування структури. Руйнування структури - це заключний етап пластичної деформації.

3 Пластична деформація при температурі нижче температури рекристалізації приводить до наклепу поверхневого шару - його зміцненню. Однак у самої поверхні структура трохи ослаблена, мікротвердість знижена. Мікротвердість досягає максимуму на деякій глибині, далі зменшуючись до вихідної.

4 При сильно відрізняються по твердості структурних складових матеріала й багаторазовому впливі навантаження відбувається спочатку інтенсивне зношування м'якої основи, внаслідок цього підвищується тиск на выступаючі тверді складові, вони вдавлюються в м'яку основу, деякі з них дробляться й переміщуються додатково під дією сил тертя.

Вплив підвищення температури полягає в наступному:

1 Якщо за умовами служби вузла або в результаті тертя температура поверхневих шарів вище температури рекристалізації металу, те поверхневий шар не наклепується, а перебуває в стані підвищеної пластичності, розм'якшення - відбувається вигладжування поверхні за рахунок розтікання всього металу або тільки одного складового сплаву.

2 Висока температура й пластична деформація сприяють дифузійним процесам, у підсумку можливе збагачення поверхні деякими елементами (наприклад, поверхні стали вуглецем).

3 При інтенсивному локальному підвищенні температури (температурному спалаху) і наступному різкому охолодженні поверхні нижележащої холодної масою металу на поверхні можуть утворитися гартівні структури.

4 Пластична деформація, можливі високі температурні градієнти й структурні перетворення, кожне окремо або спільно, викликають напруження в матеріалі, які можуть впливати на його розпушення.

5 При мікроскопічному дослідженні контакту деталей в умовах високих навантажень і температур установлена можливість утворення магми-плазми

Хімічна дія середовища полягає в наступному:

1 У середовищу повітря на оголені при зношуванні чистих металевих поверхнях утворюються окисні плівки, у результаті дії кисню газової фази або втримується в маслі і його перекисах. Окисні плівки охороняють поверхні від схоплювання й пов'язаного з ним глибокого виривання і є важливим чинником не тільки при терті без мастильного матеріалу й граничному змащенню, але й при напіврідинному змащенні.

2 Металеві поверхні, взаємодіючи з хімічно активними присадками в маслі, покриваються плівками хімічних сполук, роль яких аналогічна ролі окисних плівок. Плівки ефективно захищають поверхню від зношування, якщо швидкість їхнього утворення перевищує швидкість зношування.

3 Можливе насичення поверхні вуглецем у результаті розкладання мастильного матеріалу при високій температурі.

4 Агресивні рідини й газові середовища активізують зношування.

Елементарні види руйнування поверхонь тертя наступні:

1 Мікрорізання. При впровадженні на достатню глибину тверда частка абразиву або продукту зношування може зробити мікрорізання матеріалу з утворенням мікростружки. Мікрорізання при терті й зношуванні проявляється рідко, тому що глибина впровадження недостатня при діючих навантаженнях.

2 Шкарябання. Що утворилася або з'явилася на поверхні тертя частка при ковзанні переміщає в сторони й піднімає матеріал, залишаючи подряпину. Остання обривається при виході елемента, що впровадився, із зони фактичного контакту, при роздробленні частки, її упресовуванні або зношуванні за межі області тертя.

3 Відшаровування. Матеріал при пластичному плинні може відтискуватися у бік від поверхні тертя й після вичерпання здатності до подальшого плинну відшаровуватися. У процесі плинну частина матеріалу напливає на окісні плівки й втрачає зв'язок з основною його масою.

4 Викрашування. Це розповсюджений вид ушкодження робочих поверхонь деталей в умовах кочення. Для викрашування характерна довільна форма ямок із рваними краями.

5 Глибинне виривання. Виникає при відносному русі тіл, коли утворився внаслідок їхньої молекулярної взаємодії спай прочнее одного або обох матеріалів. Руйнування відбувається в глибині одного з тел.

6 Перенос матеріалу. Властивий всім видам тертя, крім тертя при Рідинному змащенню, і виявляється при таких технологічних операціях, як різання, клепка й складання болтових з'єднань: метал переноситься із пневматичного молотка на заклепки, із ключа на гайки, з різця на метал.

У порівнянні з тертям без мастильного матеріалу тертя при граничному змащенні може знизити перенос в 20000 разів і більше.

## ВИДИ ЗНОШУВАННЯ

### Класифікація

Розрізняють наступні види зношування:

- 1) Утомлювальне зношування при пружному деформуванні
- 2) водневе зношування;
- 3) абразивне зношування;
- 4) окисне зношування;
- 5) зношування внаслідок пластичної деформації;
- 6) зношування внаслідок диспергування (здрібнювання) ділянок контакту;
- 7) викрашування знову утворених структур;
- 8) корозійне, кавітаційне, ерозійне зношування;

- 9) корозійно- механічне зношування в сполученнях;
- 10) зношування при схоплюванні й заїданні поверхонь;
- 11) зношування при фреттинг- корозії;
- 12) тріщиноподібне на поверхнях тертя;
- 13) вибіркового переносу.

#### Утомлювальне зношування металевих поверхонь

Уперше на утомлювальну природу зношування при терті ковзання вказав Д.В.Конвісаров. Причини втоми поверхневого шару деталей він убачав у повторних або знакозмінних рухах деталей машин. Однократне задирання поверхонь, шкрябання їх різними твердими вістрями не відносяться до процесів зношування в повному змісті цього поняття. Він дійшов висновку, що зношування твердих тіл при терті подібно з руйнуванням їх від втоми. Пляма контакту випробовує багаторазовий вплив (теплове, механічне) інших плям контакту. У результаті в матеріалі утвориться тріщина, і відбувається його руйнування.

Утомлювальна теорія зношування базується на молекулярно-механічній теорії тертя. Зношування - відділення часток матеріалу розміром від часток мікрона до мікрона й більше через багаторазовий вплив навантажень і температури на одиничні нерівності. Накопичуються необоротні зміни, з'являються тріщини й відділяються частки. Зношування - це результат порушення фрикційних зв'язків, воно залежить від відношення глибини впровадження до радіуса одиничної нерівності  $r/h$  і від відношення тангенціальної міцності молекулярного зв'язку  $\tau$  до границі текучості матеріалу основи  $T$ , тобто  $\tau/T$ .

$0,6 \leq \tau/T \leq 1$  ( = фізико-механічна характеристика).

По Н.В.Крагельському, існує 5 видів порушення фрикційного зв'язку

- 1 Пружне відтискування - якщо напруження в контакті менше  $T$  (зношування через утому).
- 2 Пластичне відтискування - коли  $\tau \approx T$  - метал обтікає контртелом (малоцикловий зношування, пластичне деформування).
- 3 Мікрорізання -  $\tau > T$ .
- 4 Адгезійне порушення фрикційного зв'язку - руйнування плівок: не приводить до руйнування, але впливає на величину контактних напружень, коли плівка менш міцна, чим основа (міцність із глибиною росте).
- 5 Когезійний відрив - міцність плівки (фрикц. зв'язку) вище міцності основи (міцність з глибиною падає - глибинне виривання).

#### Водневе зношування

Область прояву водневого зношування

Водневе зношування відкрите 15- 20 років тому Д.Н.Гаркуновим і А.А.Поляковим. Порівнянне з абразивним зношуванням.

Водневе зношування залежить від концентрації водню в поверхневих шарах **тертьових** деталей.

Водневе зношування обумовлене наступними процесами, що відбуваються в зоні тертя:

- інтенсивним виділенням водню при терті в результаті руйнування водородосодержащих матеріалів, що створює джерело безперервного надходження водню в поверхневий шар сталі або чавуну;
- адсорбцією водню на поверхнях тертя;
- дифузією водню в деформируемый шар стали, швидкість якої визначається градієнтами температур і напруг, що створює ефект нагромадження водню в процесі тертя;
- особливим видом руйнування поверхні, пов'язаного з одночасним розвитком великої кількості зародків тріщин по всій зоні деформування. Характерним для руйнування є миттєве утворення мелкодисперсного порошку матеріалу.

Область прояву водневого зношування досить велика. Практично всі поверхні тертя сталевих і чавунних деталей містять підвищена кількість водню й, отже, піддані підвищеному зношуванню. Наявність у повітрі пар води створює сприятливі умови для водневого зношування, не говорячи вже про розкладання в зоні контакту мастильного матеріалу, палива або пластмаси. Водень утвориться при терті, а також може утворюватися при різних технологічних процесах.

#### Види водневого зношування

Є два основних види зношування поверхонь сталевих і чавунних деталей під впливом водню: зношування диспергированим і зношування руйнуванням.

Водневе зношування диспергированим (ВИДИС).

При цьому виді зношування яких-небудь змін у поверхневому шарі деталей внаслідок звичайного зношування при диспергированим не спостерігається.

Водень підсилює (залежно від його кількості в поверхневому шарі) диспергирование сталі або чавуну. На поверхнях тертя немає врывов, задиров, помітного переносу матеріалу з однієї поверхні тертя на іншу; вони можуть мати блиск і дуже дрібні подряпини, які не видні неозброєним оком і розташовані в напрямку руху.

Водневе зношування руйнуванням (ВИРАЗ). Має специфічну особливість: поверхневий шар сталевий або чавунної деталі руйнується миттєво на глибину 1...2 мкм. Це відбувається, коли поверхневий шар накопичує велику кількість водню. Раніше відзначалося, що процес тертя створює умови високої концентрації водню в поверхневих шарах сталі.

Тертя впливає на мастильний матеріал, і водень одержує можливість зайняти більше число адсорбційних центрів на поверхні.

Методи попередження й зменшення водневого зношування

Розглянемо рекомендації зі зниження водневого зношування **тертьових** деталей машин.

При виборі матеріалів для вузлів тертя необхідно враховувати ступінь їх наводороживання й охрупчівання. Введення в сталь хрому, титану, ванадію знижує проникнення в неї водню. Наклеп сталі може збільшувати поглинання водню. Холоднодеформована сталь може поглинути в 1000 разів більше водню, ніж відпалена.

Необхідно, де можливо, виключати з вузлів тертя полімери, здатні до швидкого розкладання й виділення водню. Введення в гальмові матеріали на основі полімерів здрибненого на шматки латунного дроту поліпшує фрикційні характеристики.

Корисно застосовувати для вузлів тертя, якщо є ймовірність водневого зношування, мастильні матеріали, які мало піддані гідрогенізації.

Як присадки до мастильних рідин і фрикційних полімерних матеріалів можуть бути уведений кремній і органічні сполуки (силани), що містять кілька атомів хлору, які легко з'єднуються з воднем, що виділився. Зі зменшенням числа атомів хлору ефективність присадки знижується.

Зневоднювання змащень (вода в маслі розкладається на водень та кисень, водень впроваджується в метал та приводить до руйнування-зношування) виробляється

введенням присадок. Добавка 0,1% ізопропіланінетанола нейтралізує шкідливий вплив 1% води. У парах тертя "сталь-мідний сплав" необхідно виключати з останнього домішки сурми, з'єднання миш'яку, сірки й ін., що сприяють виділенню водню

Корозію у вузлах тертя можна зменшувати шляхом зміни режимів роботи: зниженням температури, швидкості ковзання й тисків. Так, для пари тертя "бронза-сталь" при роботі в гліцерині або в спиртогліцериновій суміші основним фактором наводороживання є температура. При 65...70<sup>0</sup>С наводороживання відбувається в кілька разів інтенсивніше, ніж при температурі 60<sup>0</sup>С.

Проникнення водню можна істотно знизити, якщо із зони наводороживання видалити (при їхній наявності) речовини, що сприяють проникненню водню: сірководень, фосфорводород, з'єднання миш'яку, селену, сурми, телуру.

Щоб уникнути водневого зношування, досить у пластмасу ввести невелику кількість іншої електронегативної пластмаси, наприклад ПТФЕ. У цьому випадку сталеву деталю

Між прокатними валками й прокочується матеріалом, що, або тільки між валками утвориться електричний потенціал, відповідно до умов прокатки в робочому зазорі виділяється підвищена кількість водню, що утвориться за рахунок використання водородосодержащих мастильних матеріалів.

Утруднити проникнення водню в поверхні тертя можна шляхом створення у ФРН, наприклад, запропоноване пристосування для зі зношування валків при холодній прокатці з використанням водневовмістких мастильних матеріалів.



З метою зниження негативної дії водню при створенні нових фрикційних матеріалів для автомобілів у фрикційну пластмасу вводять закис міді або інші добавки, які з'єднувалися з воднем. Зносостійкість фрикційного матеріалу й сполученого контртіла при цьому підвищує т на нього сталі або чавуну.

У процесі технологічних операцій відбувається посилене наводороживание металевих деталей. При цьому водень локалізується в приповерхньому шарі, де концентрація його більш ніж в 20 разів вище, ніж у серцевині деталі.

Методом вакуум-плавлення для ряду послідовних технологічних операцій отримані наступні кількості водню, див3/100г: токарська обробка без застосування мастильно-охолодної рідини - 0,4; те ж із застосуванням мастильно-охолодної рідини - 5,6; загартування - 12,6; відпустка - 6,8; цементация - 15,4; овідпал - 14; загартування - 18,8; обробка холодом - 17,7; відпустка - 17,4; старіння - 15,1.

Розроблено метод видалення технологічного водню шляхом полірування поверхневого шару деталі (остання технологічна обробка). При поліруванні, у міру незначного видалення поверхневого шару деталі, верхні шари металу нагріваються, і деталь піддається своєрідній термічній обробці.

### Абразивне зношування

#### Загальні відомості

Абразивним матеріалом називають матеріал природного або штучного походження, зерна якого мають достатню твердість і володіють здатністю різання (царапанія). Абразивне зношування це руйнування поверхні деталі в результаті його взаємодії з твердими частками при наявності відносної швидкості.

До таких часток відносяться:

- а) нерухомо закріплені тверді зерна, вхідні в контакт по дотичній або під невеликим кутом атаки до поверхні деталі (наприклад, шаржування сторонніми твердими частками м'яких антифрикційних матеріалів);
- б) незакріплені частки, вхідні в контакт з поверхнею деталі (наприклад, насипні вантажі при їх транспортуванні відповідними пристроями, абразивні частки в ґрунті при роботі ґрунтообробних машин і т.д.);
- в) вільні частки в зазорі сполучених деталей;
- г) вільні абразивні частки, що утягуються в потік рідиною або газом.

Абразивне зношування викликають ґрунт, руда, вугілля і порода, зола, пил, що потрапили на поверхню тертя, металева стружка, окисні плівки, закріплені на поверхні тертя або зруйновані, нагар і продукти зношування, в особливості выкрошившиися частини твердих структурних складових.

Зношування поверхонь деталей твердими абразивними частками

Абразивна частка вдавлюється в поверхню деталі, якщо вона має більшу твердість, чим металеве тіло. Частка, що впровадилася, при русі щодо поверхні може прошкрябати риску або зрізати мікроскопічну стружку. При твердості металевої поверхні, що перевищує 60 % твердості абразиву, зносостійкість різко зростає. Таке відношення твердостей можна назвати критичним.

#### Абразивне зношування при ударі

Процес руйнування деталі при ударній взаємодії між деталлю й абразивом називають ударно-абразивним зношуванням. Цьому руйнуванню піддаються деталі бурових доліт, камене- і рудорозмільних агрегатів, породоруйнівальний інструмент пневмо- і гідроударники, деталі гусеничного ходу машин та ін.

Для ударно-абразивного зношування характерне утворення на поверхні тертя лунок у результаті локальної пластичної деформації металу.

#### Зношування від абразивних часток у зазорі пари тертя

Абразивні частки тертя, що потрапили в зазори пар, під дією навантаження можуть, залежно від умов, упресовуватися в поверхні тертя, дробитися на більше дрібні фракції, сковзати або перекочуватися уздовж поверхні зношування, пружно й пластично деформуючи неї.

Найбільший вплив, що зношує, роблять частки кварцу, твердість яких досягає 11...12 Гпа. Ці частки розміром 1...30 мкм можуть довгостроково перебувати в повітрі при його русі.

Повітряні фільтри двигунів автомобілів і інших машин можуть затримувати тільки великі частки пилу; дрібні частки проникають у двигун разом із засмоктуваним у циліндри повітрям. Здатність, що Очищає, фільтрів 98...99 %, тобто 1...2 % пилу, що втримується в повітрі, попадає в циліндри двигуна. При експлуатації автомобілів і тракторів запыленность повітря звичайно становить 0,5...1 г/м<sup>3</sup>, при цьому з кожним кубометром повітря в циліндри засмоктується 5...20 мг пилу.

#### Зношування від абразивних часток у потоці рідин або газу

При допущенні, що середовище неагресивне до поверхні деталі, варто розрізняти два випадки взаємодії абразивних часток з матеріалом.

1 Прямий удар (кут атаки  $\beta = 90^\circ$ ). Залежно від маси часток, швидкості їхнього падіння, властивостей абразиву й фізико-механічних властивостей матеріалу деталі виникають пружна деформація, пластична деформація, велике руйнування, перенаклеп з відділенням матеріалу у вигляді лусочок.

2 Косий удар ( $0 < \beta < 90^\circ$ ). При кутах атаки не більше кута тертя на характер ушкоджень поверхні сильно впливають дотична складова імпульсу й опір матеріалу впливу дотичних сил на поверхню.

У деяких випадках зносостійкість гуми в кілька разів вище, ніж загартованої сталі, в інших випадках (при нульовому куті атаки) зносостійкість гуми нижче, ніж сталі, у зв'язку із фрикційною природою втомлювального ушкодження поверхні.

#### Вплив вологості й агресивності середовища на абразивне зношування

Вологість збільшує інтенсивність абразивного зношування, так само, як і агресивність середовища.

#### Абразивне зношування в корозійно- активних середовищах

Зміст водню в поверхневому шарі загартованої сталі збільшується в процесі тертя в присутності прісної й морської води в 3...3,6 рази, у незагартованої сталі - в 2,4...2,8 рази, а при терті в середовищі соку рослини в 3,8 і 3,2 рази для загартованої й незагартованої сталі відповідно.

#### Вплив дрібних абразивних частинок на зношування

Експериментально встановлено, що якщо розмір часток не перевищує 5 мкм, то вони, маючи більшу розвинену поверхню, абсорбують на собі продукти окислювання масла, що може знизити інтенсивність зношування деталі.

Багато досліджень показують, що частки з розмірами менш 5 мкм зменшують зношування частки, розміром більше 5 мкм - збільшують зношування.

#### Окисне зношування, зношування внаслідок деформації, диспергування і викришування структур, що знову утворюються

#### Окисне зношування

Окисне зношування - це зношування при наявності на поверхнях тертя захисних плівок, що утворилися в результаті взаємодії матеріалу з киснем.

Окисне зношування проявляється в складному сполученні явищ адсорбції кисню на поверхнях тертя, дифузії кисню в поверхневі шари, пластичної деформації з утворенням адсорбованих плівок, плівок твердих розчинів і хімічних сполук матеріалу з киснем з наступним відділенням їх з поверхонь тертя. Дифузії кисню в матеріал сприяє пластична деформація. У свою чергу пластична деформація різко підсилюється при одночасній дифузії. Це приводить до утворення окислів металу й твердих з'єднань кисню, які, перебуваючи в зоні тертя, діють як абразив, збільшуючи силу тертя й викли-

каючи супутнє абразивне зношування. При зношуванні спостерігається руйнування окисних плівок, але в атмосфері повітря йде й переважає зворотний процес - окислювання часток матеріалу поверхонь. У протилежному випадку превалювання швидкості руйнування плівок веде до зношування при заїданні (схоплювання поверхонь).

У першій стадії зношування окислювання відбувається в невеликих обсягах металу, розташованих у площин ковзання при терті. У другій стадії окислювання захоплює більші обсяги поверхневих шарів. Глибина окислювання відповідає глибині пластичної деформації. Окислювання в першій стадії зношування приводить до утворення на поверхні тертьових деталей твердих розчинів кисню. Надалі, при другій стадії зношування, утворюються хімічні сполуки кисню з металом, завдяки чому структура поверхневих шарів змінюється. Процеси дифузії й пластичної деформації взаємно підсилюють один одного. Посилення дифузії пояснюється тим, що при пластичній деформації на поверхнях тертя деталей утворюється велика кількість площин ковзання, що забезпечують проникнення кисню в метал. Посилення ж пластичної деформації відбувається внаслідок наявності" на площинах ковзання величезної кількості атомів, що рухаються, кисню, що збільшують рухливість структури поверхневого шару.

Дослідження показали, що окисне зношування переважає в діапазоні швидкостей ковзання від 0,14 до 2,6 м/сек при питомому тиску до 14 кг/див<sup>2</sup>. Окисне зношування зростає зі збільшенням швидкості, тому що при цьому збільшується число мікропластичних деформацій і дифузія кисню в поверхню металу.

Після окисного зношування поверхні тертя мають порівняно високу чистоту ( 10-й клас чистоти) з матовим або блискучим відтінком, а іноді з легкими кольорами мінливості. Іноді ділянки з матовою й блискучою поверхнею чергуються й мають подряпини внаслідок абразивного зношування. Цей вид зношування наочно проявляється в зубчастих зачепленнях редукторів приводу машин,, цапфах і вкладишах підшипників ковзання.

Для зменшення окисного зношування необхідно підвищувати чистоту обробки тертьових пар і застосовувати матеріали, що мають високу пластичність й стійкість до окислювання

Варто мати на увазі, що наявність окисних плівок не виключає можливості втомлювального руйнування, а лише вносить свою специфіку, тому що в цьому випадку руйнується більше тендітний матеріал. Окисному зношуванню піддаються практично всі елементи машин, однак швидкість цього процесу відносно невисока.

### Зношування внаслідок пластичної деформації

Цей вид зношування (змінання) полягає в зміні розмірів або форми деталі в результаті пластичної деформації, її мікрообсягів. Змінання є характерним видом ушкодження шпонкових пазів і шпонок, шліцевих з'єднань, штифтів і упорів, нарізних сполучень і інших деталей.

Пластична деформація викликається або надмірними допустимими напруженнями, що, або випадковими значними перевантаженнями.

У тихохідних зубчастих передачах з колісьми зі сталі невисокої твердості виникають значні пластичні деформації з утворенням канавок по полюсній лінії в провідних зубів. Під дією високих контактних напружень руйнується масляна плівка, і відбувається плин поверхневих шарів металу в напрямках ковзання. Втім, не виключаються такі плини й при неушкодженій масляній плівці. Підвищенням в'язкості масла можна зменшити сили тертя й інтенсивність пластичної деформації. Взагалі ж рекомендується застосовувати сталі більшої твердості.

#### Зношування внаслідок диспергування

Багато тертьових деталей не мають на робочих поверхнях слідів схоплювання й помітних подряпин.

При цих умовах руйнування поверхневого шару відбувається в результаті диспергування (здрібнювання) окремих ділянок контакту. Інтенсивність цього виду зношування невисока, шорсткість поверхні деталі мала.

Зношуванню внаслідок диспергування піддаються добре шарнірно-болтові з'єднання, що змазуються, валики різних агрегатів і сполучені з ними підшипники, поршневі пальці причіпних шатунів, пари тертя паливної апаратури й ін.

#### Зношування в результаті викришування структур, що знову утворюються

При тяжких умовах роботи на поверхнях тертя відбуваються фізико-хімічні зміни. Вони є результатом пластичного деформування, підвищення температури шарів металу, що прилягають до зони контакту, наступного швидкого охолодження й хімічної дії навколишнього середовища.

Ці фізико-хімічні зміни, що полягають в утворенні нових структур, у свою чергу змінюють взаємодії й характер руйнування поверхні. Ці утворення одержали найменування білого шару.

#### Гидро-і газообразивне зношування

Інтенсивність залежить від кута атаки часток:

$m J a$  ,

де  $a$  - коефіцієнт, що залежить від матеріалу й кута атаки;

$m$  - залежить тільки від матеріалу (для Ст3  $m = 2,3$ ; для сталі 45 задо.

$m = 2,5$ ; для чавуну  $m = 2,8$ ; для базальту  $m = 2,5$ );

$V$  - швидкість.

## ФРЕТТИНГ-КОРОЗІЯ\_

### Особливості фреттинг-корозії\_

Фреттинг-корозія (від англійського слова fret - роз'їдати, підточувати) - корозійно-механічне зношування поверхонь тертя при малих коливальних відносних переміщеннях.

Фреттинг-корозія має наступні відмінності від звичайного зношування поверхонь тертя:

- швидкості відносних переміщень контактуючих поверхонь досить низки (так, при амплітуді ковзання 0,025 мм і частоті коливань 30 Гц середня швидкість ковзання 3 мм/с);
- продуктами зношування є в основному окисли металів;
- ушкодження поверхонь тертя сильно локалізовані на площадках фактичного контакту;
- внаслідок малої амплітуди зсувів видалення продуктів зношування із зони тертя утруднено.

Необхідна умова виникнення фреттинг-корозії - наявність прослизання між сполученими поверхнями. Фреттинг-корозія спостерігається при різних пресових посадках, у шлицевих, шпонкових, болтових і заклепувальних з'єднаннях, у канатах, муфтових з'єднаннях, у контактних поверхнях ресор і пружин, запобіжних клапанах і регуляторах, у кулачкових і шарнірних механізмах і т.д.

Ушкодження від фреттинг-корозії проявляються у вигляді натиров, налипання металу, виривів і раковин, часто заповнених порошкоподібними продуктами зношування. На поверхнях виникають захоплювання, мікрорізання або усталостне руйнування мікрообсягів, що супроводжуються окислюванням і корозією (усталостно-корозійні процеси). Звичайно ведучим є один з перерахованих процесів руйнування поверхні, а інші - супутніми. У результаті фреттинг-корозії в деталі змінюються конструктивні розміри, порушуються зазори, послабляються натяги, виникає заїдання й заклинювання (що особливо небезпечно у випадках, коли контактуючі деталі при роботі повинні час від часу роз'єднуватися, наприклад, у запобіжних клапанах і регуляторах), значно погіршується якість поверхні - підвищується шорсткість, з'являються мікротріщини, значно знижується втомлювальна міцність деталей.

### Фактори, що впливають на розвиток фреттинг-корозії

Амплітуда відносного ковзання. Для початку процесу фреттинг-корозії достатня дуже мала амплітуда відносного переміщення поверхонь ( $8 \cdot 10^{-7}$  мм), при якій частки продуктів зношування починають перекочуватися між поверхнями тертя. Це утрудняє захоплювання поверхонь і знижує інтенсивність зношування. Зі збільшенням амплітуди

інтенсивність зношування зростає. Наприклад, для сталі зношування особливо зростає при амплітуді 0,10...0,15 мм, коли починають істотно проявлятися процеси схоплювання (рис.16)

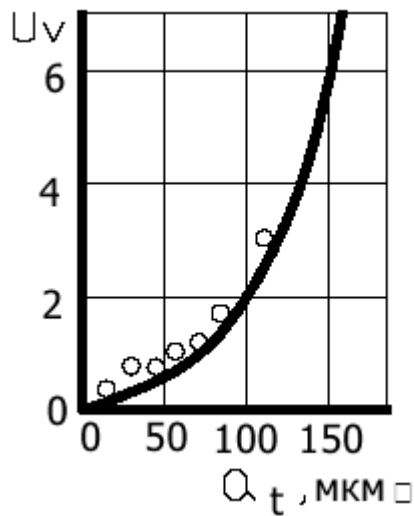
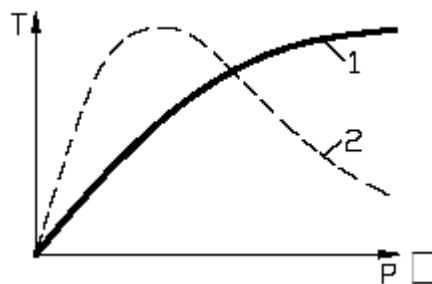


Рисунок 16 –Залежність об'ємного зношування  $U_v$  від 190 Н і числі циклів  $N_{ц} = 106$

Питоме навантаження. Оцінити вплив навантаження на розвиток фреттинг-корозії досить складно, оскільки в процесі роботи сполучення фактичний тиск не залишається постійним, що пов'язане зі зміною вихідного мікрорельєфу поверхонь і утворенням прошарку із продуктів зношування. Залежність інтенсивності зношування при фреттинг-корозії від питомого навантаження зображена на рис.17.



1- висока жорсткість контакту; 2 - мала жорсткість контакту

Рисунок 17 - Характер залежності інтенсивності зношування від питомого тиску при фреттинг- корозії

Звичайно інтенсивність зношування росте зі збільшенням питомого тиску (крива 1). Залежність іншого типу (крива 2) спостерігається при недостатній твердості контакту, коли зі збільшенням навантаження зменшується амплітуда відносного переміщення. Крім того, з підвищенням навантаження відбувається перерозподіл ролі основних процесів, типових для фреттинг-корозии.

При навантаженнях, що відповідають висхідній галузі кривій 2, на поверхнях контакту протікають найбільш типові для фреттинг- корозії втомлювально- корозійні процеси, чому сприяє відносно легень надходження кисню в зону тертя. Зменшення зношування при навантаженнях вище критичних (спадна галузь кривій 2) може бути викликано зниженням інтенсивності втомлювально- корозійних процесів і інтенсифікацією процесів захоплення й взаємного переносу металу. Незважаючи на те, що при цьому загальне зношування зменшується, глибина локальних ушкоджень збільшується. Частота коливань. Звичайно з підвищенням частоти коливань інтенсивність зношування при фреттинг- корозії убуває до певного значення, а потім намічається тенденція до її стабілізації (рис. 18). Пояснюється це зниженням втомлювальної довговічності металів зі зменшенням частоти навантаження.

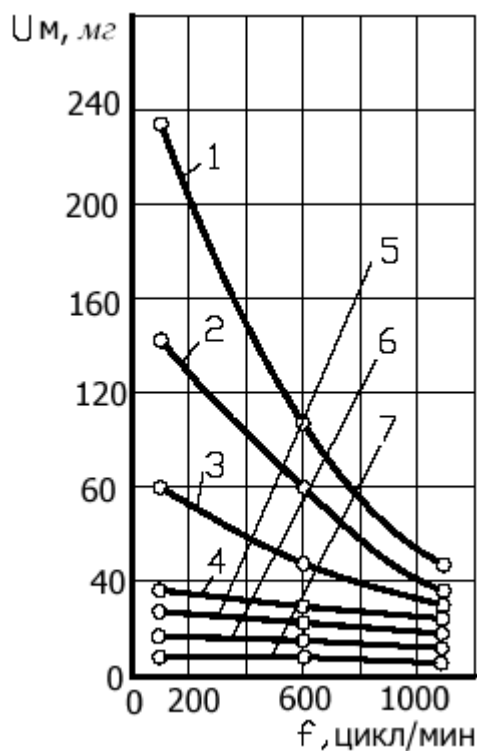


Рисунок 18 – Вплив частоти коливань на зношування сталі 1

*Число циклів навантаження.*

Зі збільшенням числа циклів навантаження (тривалості випробування) зношування при фреттинг- корозії зростає за наступним законом. Спочатку (період прироблення) швидкість зношування велика, а потім вона зменшується (стає близької до постійного, зношування змінюється лінійно). Якщо при фреттинг- корозії продукти зношування дуже тверді (наприклад, для алюмінію і його сплавів), то зношування із самого початку зростає лінійно, що свідчить про чисто абразивне зношування (мікрорізанні).

*Зовнішнє середовище.* Інтенсивність фреттинг- корозії залежить від корозійної активності зовнішнього середовища. У кисневому середовищі всі метали ушкоджуються фреттинг- корозією інтенсивніше, ніж на повітрі. Зношування ж на повітрі більше, ніж у вакуумі,



азоті, водні. У рідких середовищах (воді, розчині NaOH і ін.) зношування в кілька разів менше, ніж на повітрі. Це пояснюється наступними причинами: утворення захисних окисних плівок на поверхнях тертя в рідкому середовищі відбувається з більшою швидкістю; у рідині продукти зношування мають меншу твердість, а також частково вимиваються із зони контакту, що знижує інтенсивність абразивного зношування. Зі збільшенням вологості повітря інтенсивність фреттинг- корозії по тими ж причинам знижується.

*Змащення.* Для зменшення фреттинг- корозії застосовують рідкі, консистентні й тверді мастильні матеріали.

*Температура поверхонь тертя.* При фреттинг- корозії в результаті вібраційної контактної взаємодії в крапках фактичного контакту виникають високі миттєві температури (до 700...800°C), можуть підвищитися й середні значення температур на поверхнях тертя. Ці теплові явища істотно міняють структуру поверхневого шару й активізують процеси схоплювання. Установлено, що зношування сталей при фреттинг- корозії зі збільшенням температури навколишнього середовища від +50°C до +150°C практично не міняється, а з її зменшенням (до мінус 140°C) - зростає.

#### \_ Фреттингостійкість різних матеріалів і методи захисту від корозії

Приведемо деякі фреттингостійке сполучення матеріалів пара тертя:

- чавун по чавуні зі змащенням дисульфідом молібдену;
- чавун по нержавіючій сталі зі змащенням дисульфідом молібдену;
- загартована інструментальна сталь по інструментальній сталі;
- опескоструенная сталь зі свинцевим покриттям по сталі;
- сталь по сталі з нейлоною прокладкою товщиною 1,6 мм;
- свинець по сталі;
- сталь із фосфатним покриттям по сталі;
- срібне покриття по сталі;
- срібне покриття по алюмінії.

Дуже низької фреттингостійкістю володіє алюміній і його сплави в парі тертя практично з будь-яким матеріалом - нікелем, хромом, магнієм, цинком.

Захист від фреттинг- корозії, конструктивно-технологічні методи захисту від фреттинг- корозії:

- збільшення натягу у випадку пресових посадок;
- створення додаткових пристроїв, що демпфують, для гасіння вібрації в з'єднаннях;
- поліпшення системи підведення змащення;
- зниження концентрації напруг;
- підвищення точності виготовлення, зменшення перекручувань геометрической форми поверхонь;
- застосування сферичних посадкових поверхонь замість циліндричних;
- заміна підшипників ковзання підшипниками кочення;

- щільний пригін шпонок;
- зміцнення контактуючих поверхонь (хімічна й хіміко-термічна обробка, пластичне деформування).

Методи захисту від процесів зношування:

- застосування матеріалів і їхніх сполучень, стійких до фреттинг- корозії;
- застосування рідких, пластичних і твердих мастильних матеріалів;
- механічне, термічне й хіміко-термічне зміцнення поверхонь;
- гальванічне покриття поверхонь;
- нанесення на поверхні полімерних плівок і покриттів;
- введення анодних інгібіторів у корозійне середовище для зниження її активності.

## ЕФЕКТ НЕЗНОСНОСТІ, ВИБОРЧИЙ ПЕРЕНОС, ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕФЕКТУ НЕЗНОСНОСТІ

### Загальні відомості

У середині 50- х років при дослідженні вузлів тертя вузлів літака "ІЛ" Гаркуновим і іншими було виявлене явище мимовільного утворення тонкої плівки міді на поверхнях тяжконавантажених деталей у парах " сталь-бронза" при спиртогліцериновому змащенні. Плівка міді товщиною мкм 2...1 у процесі тертя покривала як бронзу, так і сталь. Різко зменшувалося зношування й сила тертя (приблизно в 10 разів); те ж для пари " сталь-бронза" у змащенні ЦИАТИМ 201, у парах " сталь-сталь" домашнього холодильника (компресори) за рахунок розчинення мідних трубок. Іони міді надходять у масляно - фреонну суміш і утворюють на тертьових деталях захисну мідну плівку, що назвали сервовитной (лат. servo- vitae - рятувати життя).

Ця речовина (тонка плівка міді) освічено потоком енергії й існує в процесі тертя. Тертя не знищує плівку, воно неї створює. Це новий клас явищ у неживій природі - процеси, що самоорганізуються.

Самоорганізація в природі відома і - біологічні системи здатні до самовідновлення й працюють десятки років без зношування: зуби тварин (прості пари тертя), суглоби (м'які по твердому) живих організмів (закриті пари тертя, м'які по м'якому).

**Ентропія - безладдя в замкнутій системі.**

У неживій природі в деяких явищах відсутня самоорганізація: дрова горять і перетворюються в попіл - попіл не може перетворитися назад у дрова, цукор на повітрі випарувався - зворотна конденсація неможлива. Але є й інші приклади: з повітря, з пар води утворюються сніжинки правильної форми - кристалічної, це явище більше високої організації, чим пара. Паморозь на склі - малюнки, з розплавів металів - кристали. Це приклади самоорганізації.

Несталий режим:

1 У парі " сталь-сталь" мастильний матеріал окисляється, і кислоти розчиняють поверхні мідних трубок - у змащенні іони міді.

2 Іона міді зі змащення осаджуються на поверхні деталі тільки в зоні тертя, образуя плівку мкм 2...1.1. .

Сталий режим: \_

1 Пари тертя " сталь-сталь" стала "мідь -мідь". Знижується окислювання змащення, припиняється розчинення трубок.

2 Якщо порушується цілісність плівки, режим роботи погіршується, окислювання змащення підсилюється, розчинення міді відновлюється, і заліковуються ушкодження поверхні в зоні тертя. Мідна плівка не руйнується або переноситься з однієї поверхні на іншу, утримуючись електричними силами.

Сервовитная плівка при деформуванні не руйнується, покриваючи при цьому шорсткості. М'яке працює по м'якому; навантаження розподіляється не по виступах, а по плівці - ресурс збільшується.

Механізм утворення сервовитной плівки.

Механізми утворення сервовитной плівки різні.

1 Сервовитная плівка в парі " бронза-сталь" утвориться при змазуванні гліцерином. Гліцерин діє як слабка кислота, розчиняючи елементи бронзи, олова, цинку, заліза, алюмінію. Поверхня бронзи насичується атомами міді - режим виборчого переносу (ИП).

2 При високих тисках режим ИП спостерігається в парі " бронза-сталь" у змащенні ЦИАТИМ 201 і мінеральних маслах у вузлах тертя зворотно-поступального руху (шарніри, повзуни).

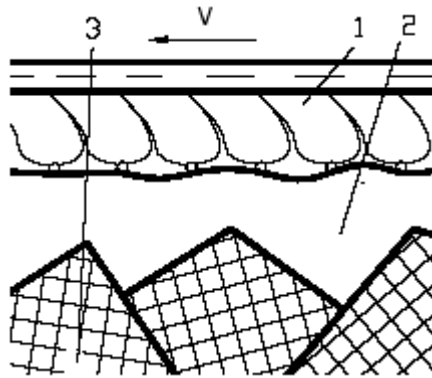
3 У парі " сталь-сталь" ИП може спостерігатися при змащенні з добавками дрібних часток бронзи, міді, свинцю, срібла й ін. На поверхні з'являються плівки цих металів, коефіцієнт тертя зменшується, сталь не зношується.

4 Розроблений ряд порошкових матеріалів, що працюють у режимі ИП. У шихту вводяться мелкодисперсные порошки ВК3, ВК6, ВК8, де зв'язувальною речовиною є мідь - працює в нафті, нафтопродуктах, стічних водах.

5 Сервовитная плівка утвориться при терті политетрафторетилену (ПТФЭ) по сталі в гліцерині (з добавкою закису міді).

6 У ПТФЭ (дуже розповсюджений матеріал підшипників ковзання) додають відрізки мідного дроту (для створення режиму ИП по сталі).

Матеріал сервовитной плівки - мідь перебуває в стані, подібному до розплаву (рис.12).



1 - шар комплексів; 2 - серповитная плівка міді; 3 - сталь

Рисунок 12 - Структура граничного шару, що утвориться при терті мідно-фторопластового композита по сталі

Плівка не здатна до наклепу, має малі зусилля зрушення, пориста, здатна до схоплювання, при терті може переходити з однієї поверхні на іншу без збільшення сил тертя (як сталь по льоду - плівка води - плівка мідь).

Вибірчий перенос в умовах абразивного зношування

Уважалося, що вибірчий перенос може бути реалізований в умовах абразивного зношування - плівка руйнується. Але абразивні елементи менше 3 мкм, навпаки - прискорюють утворення плівки.

З більше 3 мкм зношують серповидную плівку, але все-таки коефіцієнт тертя відносно знижується, а інтенсивність зношування зменшується.

## МАТЕРІАЛИ ТЕРТЬОВИХ ПОВЕРХОНЬ ПАРА ТЕРТЯ

Тертвові деталі виготовляють із матеріалів:

- 1) конструкційних (стали 45, 40ХН);
- 2) фрикційних (ферродо-, металокераміка) - високий коефіцієнт тертя (текстоліт, фібра, чавун, стали 46, 47, марганц. сталь);
- 3) антифрикційних (чавун, бронза, латунь, бабіт); вимоги до антифрикційних матеріалів: достатня статична й динамічна міцність при підвищених температурах утворення граничного шару, низький  $f$ , припрацьовуваність, технологічність, недефіцитність;
- 4) зносостійких (матеріали у вигляді шарів, накладок пластин, диски фрикційних муфт) - загальні вимоги, зносостійкість забезпечується зміцнювальними технологіями (гума, пластмаса).

В одному матеріалі всі ці властивості забезпечити неможливо. Висновок: у парах тертя необхідно підбирати матеріал; урахувати конструкцію, призначення

вузлів тертя, умови експлуатації, вимоги по міцності, терміну служби, надійності, вартості, експлуатаційні витрати.

Приклади. Сплави для колінчатих валів: литі дешевше кованих - із чавунів і графітизованої сталі, углеродистих і легированих сталей.

Марганцовистые стали (Гатфильда) зносостійкі - тримають удари, наклепуються. Але при абразивному зношуванні марганцовиста сталь не має переваг перед звичайними конструкційними сталями (більше дешевими), наклепується повільніше зношування, слабо пручається корозії, непридатна при експлуатації вище 800°C.

Ретинакс (ФК-16Л), фенолформальдегідная смола, каніфоль, азбест + латунний дріт - застосовують при високому навантаженні; при малій - неефективна (підвищення температури підсилює фрикційні властивості).

Антифрикційні матеріали (правило Шарля 1897 р.) - необхідно рівномірно розподілити в пластичній основі тверді зерна при низькому коефіцієнті тертя з антизадирними властивостями.

Перспективні порошкові фрикційні й антифрикційні матеріали.

Порошкові деталі вигідні при партіях 500...10000 виробів, інакше не вигідні.

Підшипники ковзання - із чавунів, застосовуються з іншими валами високої твердості НРС 55, коефіцієнт тертя зростає при  $V < 0,5$  м/с, питома сила  $p$  1,5 МПа - низька.

Сплави з кольорових металів - бронзи, бабіти, сплави срібла, кадмію, алюмінієві сплави.

Бронзи - у вигляді стрічок для втулок і підшипників типу Бр. ОЦСЧ - 4- 17, Бр. АЖН. Сплави алюмінієві - АЛ2, АЛ4, ливарний алюміній з нікелем, сурма.

Сплави на цинковій основі - ЦАМ 9-1,5 або ЦАМ 10-15- 9...12 % алюмінію, 1...5,5 % міді, 0,03...0,06 % магнію.

Пористі порошки зі спеченої бронзи, заліза, графіту: міді 83...85%, олова 9...10 %, свинцю 4...10 %, графіту 1,5...2 %. При спіканні пори заповнюються маслом - втулки підшипників поринають у розігріте масло (50...100 0С). Пористість 25...35 % для більших швидкостей і малих навантажень, 18...25% - звичайні умови, 10...18 % - малі швидкості, високі й середні навантаження.

Пластмаси для підшипників:

а) поліаміди  $P=5$  МПа, змащення маслом;

б) поліетилен, вініпласт, фторопласт-4, коефіцієнт тертя 0,04 без змащення - шорсткість  $Ra= 0,08...0,16$ , але розм'якшується.

Полинозитные матеріали, металлофторопластовые стрічкові антифрикційні матеріали (фірма "Гласье", Англія) - матеріал DV.DX

Композиція политетрафторэтила: свинець, спеченная олов'яна бронза, усе прикріплено до сталевій підложке - працює без змащення, коефіцієнт тертя знижується при росту  $p$ , наприклад  $f = 0,1$  при  $p=3$  МПа;  $f = 0,04$  при  $p=138$  МПа.

## ПРАВИЛА СПОЛУЧЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

1 Сполучити твердий матеріал з м'яким, що має температуру рекристалізації нижче середньої температури поверхні тертя при роботі. При такому сполученні метали добре протистоять заїданню й характеризуються високою надійністю. Гарні результати дають пари " хром-гума" при змазуванні мінеральним маслом і водою й " хром-бронза" при використанні пластичних мастильних матеріалів.

2 Сполучити твердий метал із твердим (сполучення пар з азотированной, хромованої й загартованої сталі). Такі пари тертя мають високу зносостійкість внаслідок малого взаємного впровадження їхніх поверхонь. Нанесення прирабочних покриттів підвищує надійність пар у найнебезпечніший період роботи - під час приробляння. Застосування цих пар обмежується швидкостями ковзання. Висока точність виготовлення й складання, значна твердість конструкції, ретельне приробляння, поліпшення умов змазування значно розширюють область застосування пара тертя із твердих матеріалів.

3 Уникати сполучень м'якого матеріалу з м'яким (мідний сплав по алюмінієвому сплаві), також пара з однойменних матеріалів (незагартована сталь по незагартованій сталі, алюмінієвий сплав по алюмінієвому, хром по хрому, нікель по нікелі, пластмаса по пластмасі), за винятком пар з політетрафторетилену й поліетилену. Подібні пари мають низьку зносостійкість і ненадійні в роботі. При незначних перевантаженнях у парах утворюються вогнища схоплювання, і відбувається глибинне виривання матеріалів із взаємним їхнім налипанням на поверхні тертя.

4 Застосовувати у важкодоступні для змазування конструкціях пористі, порошкові матеріали й антифрикційні сплави.

5 Застосовувати в якості фрикційних і антифрикційних матеріалів пластичні пластмаси. У ряді випадків вони підвищують надійність і термін служби вузла тертя, знижують масу конструкції й витрату дефіцитних кольорових металів, зменшують вібрації й поліпшують акустичні властивості машин.

6 Прагнути шляхом вибору матеріалів пари тертя, мастильних матеріалів і присадок до них створювати при роботі пари умови реалізації режиму виборчого переносу.

7 Ураховувати можливість при експлуатації наводороживання поверхностей тертя, що різко знижує зносостійкість і надійність роботи вузла тертя. Застосовувати матеріали, що важко піддаються наводороживанню.

8 Сталеві деталі вузлів тертя при остаточному доведенні їхньої поверхні піддавати фінішній антифрикційній безабразивній обробці (ФАБО)

## МЕТОДИКА ПІДБОРУ МАТЕРІАЛІВ ПАРА ТЕРТЯ

Триботехніка до теперішнього часу нагромадила великий досвід, дозволяючий сформулювати загальні принципи й методику підбора матеріалів для пар тертя. На малюнку 13 представлена схема вибору матеріалу для тертьових деталей.

Розглянемо докладніше окремі етапи цієї методики.

Аналіз умов експлуатації:

1 Умови навантаження й характеристика навколишнього середовища:

- навантаження й місце її додатка;
- частота обертання (швидкість ковзання);
- режим навантаження (статичний, динамічний і т.д. );
- прискорення;
- атмосферні умови (вологість і т.д. );
- температура;
- вид робітничого середовища і її концентрація;
- електричні впливи;
- можливість влучення сторонніх часток (абразив і т.д.).

2 Геометричні й конструктивні вимоги:

- габарити вузла;
- необхідна точність;
- особливі вимоги до конструкції вузла (взаємодія з іншими вузлами й т.д.).

3 Експлуатаційні вимоги:

- показники надійності;
- термін служби;
- необхідність і можливість контролю за роботою вузла;
- енергоємність;
- коефіцієнт тертя;
- шум;
- демпфірування;
- токсичність;
- іонізуючі випромінювання;
- газовиділення;
- умови зберігання.

4 Економічні й технологічні вимоги:

- обсяг виробництва;
- вартість готового виробу;
- витрати енергії на виробництво;
- продуктивність устаткування;
- маса виробу;
- зовнішній вигляд і обробка;
- інші відомості.

На основі аналізу умов експлуатації складається технічне завдання на проектування вузла тертя (деталі).

## Попередній вибір матеріалів

Спочатку вибирають групу матеріалів (чорні метали, бабіти, бронзи, полімери й т.д.), найбільш підходящу для виготовлення деталей вузла тертя.

Потім з урахуванням довідкових даних роблять попередній відбір матеріалу для кожної з деталей вузла тертя.

## Розрахунково-конструктивна оцінка працездатності вузла тертя

Насамперед, визначають оптимальні габарити вузла тертя і його конструкцію. Важливим елементом геометричного розрахунку є встановлення зазорів у сполученнях. Варто пам'ятати, що підвищені вимоги до точності пов'язані з небезпекою заклинювання при нагріванні. Далі визначають навантажувальну здатність деталі (розраховують на міцність і деформацію), а потім оцінюють фрикційні характеристики сполучення (розраховують коефіцієнти тертя, визначають теплову напруженість). І в останню чергу роблять перевірку вузла тертя на довговічність (розраховують інтенсивність зношування). За результатами розрахунків ведеться конструктивне коректування й доробка вузла тертя.

## Остаточний вибір матеріалу

Відібрані в результаті попередніх оцінок і розрахунків матеріали деталей пари тертя необхідно експериментально досліджувати. Спочатку проводять лабораторну оцінку матеріалів на зразках, що ґрунтується на застосуванні по можливості стандартизованих методик і встаткування, виборі схем взаємодії зразків і режимів тертя, близьких експлуатаційним, відповідно до методів моделювання. Наступний етап - випробування натурних зразків в умовах, що найбільше близько імітують експлуатаційні. На підставі випробувань натурних зразків вирішується питання про проведення дослідно-промислової перевірки.

Опытнопромышленная перевірка служить основним критерієм остаточного вибору матеріалу для деталей вузла тертя.

## ФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

### Вимоги, що висуваються до матеріалів

Швидкий розвиток техніки викликав необхідність застосування особливо форсованих режимів роботи гальмових пристроїв та фрикційних муфт на літаках, екскаваторах, бурильних лебідках, автомобілях і рухливому складі залізниць тощо. Тяжкі умови роботи фрикційних пар висунули підвищені вимоги до їхньої конструкції й особливо до властивостей матеріалів, застосовуваних як пари тертя.



Фрикційні матеріали, що раніше застосовувалися, виявилися непридатними для цих цілей в основному через їхню малу теплостійкість.

Знадобилися принципово нові матеріали, причому внаслідок специфічності вимозі до вузлів тертя стосовно до різних областей техніки ці матеріали стали створюватися спеціалізованими, залежно від призначення машини.

Однією з основних вимог, пропонованих до сучасних фрикційних пар тертя, є їх висока фрикційна теплостійкість, тобто здатність пари тертя зберігати стійке значення коефіцієнта тертя й мати мале зношування в широкому діапазоні температур.

Однак умови роботи сучасних машин досить складні, тому до фрикційних матеріалів пред'являються ще й інші вимоги. Розглянемо деякі з них.

**Достатня величина й стабільність коефіцієнта тертя.** Коефіцієнт тертя фрикційної пари повинен бути не менш 0,2 і не більше 0,5, причому він повинен бути досить стабільним. Наприклад, у процесі гальмування авіаційного колеса допускається зміна коефіцієнта тертя не більше ніж на  $\pm 15\%$ . Процес тертя повинен бути плавним, без стрибків, вібрацій, для чого величина коефіцієнта тертя повинна по можливості зростати зі збільшенням швидкостей або, принаймні, якнайменше падати.

**Припрацьовуваність.** Елементи фрикційної пари повинні припрацьовуватись досить швидко, так щоб, наприклад, при першому гальмуванні гальмовий момент становив не менш 80% і не більше 120% від розрахункової величини. При цьому на поверхні тертя не повинні утворюватися задирки.

**Несхоплювання.** Пари не повинні схоплюватися (зварюватися) як у процесі роботи, так і в інших випадках, наприклад, після гальмування, коли гаряче гальмо залишається загальмованим.

**Корозійна стійкість.** Елементи фрикційної пари повинні мати достатню корозійну стійкість при тривалому перебуванні у вологій атмосфері (до 100%) і температурі (від  $-60^{\circ}$  до  $+150^{\circ}$ ). Фрикційні матеріали не повинні викликати корозію сполучених з ними деталей з маловуглецевих, легованих сталей, алюмінієвих і магнієвих сплавів.

**Вогнебезпечність.** При роботі у муфті або гальмі, а також безпосередньо після роботи фрикційні матеріали й продукти їхнього зношування або розкладання не повинні загорятися полум'ям. Не повинен виділятися також дим і неприємні запахи.

**Механічна міцність на розрив** повинна становити при граничній об'ємній температурі, що розвивається в гальмі чи муфті, не менше 0,15 МПа.

При багаторазових гальмуваннях фрикційні матеріали повинні добре **протистояти тепловому удару**, що виникає при інтенсивному гальмуванні. При цьому не повинне відбуватися сколювання фрикційного матеріалу, радіальних і інших залишкових деформацій деталей, а також розшарування деталей (при багатошаровому їхньому виконанні), утворення тріщин і інших ушкоджень, що порушують роботу гальма чи муфти.

**Зносостійкість.** Зношування елементів пари тертя не повинен перевищувати заданих значень. Найбільше зручно задаватися питомим зношуванням, яке для м'яких режимів роботи не повинне перевищувати  $10^8$ -  $10^7$ , для твердих ( $1000^{\circ}$  і більше) -  $10^5$ .

**Теплофізичні параметри.** Бажано, щоб матеріал мав велику теплопровідність і теплоємність.

**Технологічні вимоги-** Всі фрикційні матеріали повинні задовільно оброблятися на верстатах. Чавуни, металокерамічні й інші подібні матеріали повинні надійно зварюватися й спікатися з каркасом з вуглецевих сталей. Бажано, щоб ці матеріали добре зварювалися також з легуваними й жароміцними сплавами. При розробці фрикційних чавунів і металокерамічних сплавів потрібно прагнути створювати матеріали, здатні витримувати навантаження й надійно працювати без сталевих каркасу.

Часто до фрикційних матеріалів пред'являються додаткові вимоги, пов'язані з маслостійкістю, водостійкістю, безшумністю в роботі, здатністю до приклеювання, стійкістю в арктичних і тропічних умовах.

Розглянемо більш докладно деякі з перерахованих вимог.

**Величина й стабільність коефіцієнта тертя.** Величина коефіцієнта тертя повинна бути достатньою, щоб забезпечити потрібну силу тертя при тисках, що мають місце в існуючих конструктивних схемах приводів гальм та муфт. Звичайний тиск на гальмовий елемент становить для автомобільних гальм 0, 3-0,7 МПа, для літакових 1,5-2,0 МПа ( в окремих випадках він може досягати 3,0-4, 0 МПа. Матеріали, коефіцієнт тертя яких більше 0,2, відносять до фрикційних.

Фрикційний матеріал повинен мати стійке значення коефіцієнта тертя незалежно від тиску й швидкості, тобто повинен бути теплостійким.

Стабільність коефіцієнта тертя враховується показником

$$\alpha_{cm} = \frac{M_{\tau \text{ cp}}}{M_{\tau \text{ max}}}$$

Коливання коефіцієнта тертя в процесі гальмування характеризуються величиною

$$\gamma = \frac{M_{\tau \text{ min}}}{M_{\tau \text{ max}}}$$

Ефективність гальмування

$$\beta_{\text{эф}} = \frac{\alpha_{cm}}{t_{\tau}^2}$$

де  $t$  - час гальмування в сек.

Стійкість коефіцієнта тертя дуже важлива, тому що при зменшенні його зі швидкістю (температурою) не буде забезпечена ефективна робота гальма або муфти. Це - так зване зів'янення гальма, коли при тривалому й повторному гальмуванні гальмо не зупиняє екіпажа.

Існують матеріали, у яких має місце необоротна зміна їхніх властивостей при нагріванні. Якщо після нагрівання значення коефіцієнта тертя в таких матеріалів знижується, то вони не можуть бути використані як фрикційні.

**Припрацьовуваність.** Через неточність виготовлення, жолоблення, шорсткості, хвилястість й т.п. колодки, сектори дисків і інші деталі, виконані із фрикційних матеріалів, при установці не мають точного прилягання до поверхні гальмового барабана або диска й торкання їх відбувається на окремих ділянках, площа яких становить незначну частину від номінальної площі.

У період припрацьовування в місцях фактичного контакту виникають більші температури, у результаті яких викликається швидке локальне зношування. Із часом таке послідовне локальне зношування приводить до того, що поверхня торкання поступово збільшується, приймає характерну для даного режиму роботи шорсткість.

Припрацьовування характеризується двома процесами: зростанням фактичної площі торкання гальмової колодки з барабаном і утворенням на поверхні тертя фрикційного матеріалу робочого шару, що має стійкі фрикційні характеристики, причому цей шар повинен безупинно відновлятися в міру його зношування.

Одним з найважливіших властивостей фрикційних матеріалів є властивість не схоплюватися при терті. Наприклад, деякі фрикційні пластмаси при більших температурах починають горіти й взаємодіяти з чавуном, що приводить до термічного схоплювання поверхонь, а це, у свою чергу, може викликати заклинювання гальма.

Для роботи пластмасових матеріалів при високих температурах у їхній склад вводять металевий дріт.

Останній, розм'якшуючись при термічному розкладанні пластмаси, створює на поверхні проміжний шар, що відокремлює пластмасу від чавуну і є як би напівтвердим змащенням, що виробляється із самого матеріалу. Цей шар, що містить тверді частки продуктів розкладання пластмаси, забезпечує високий коефіцієнт тертя. Внаслідок великої пластичності основи він добре протистоїть передеформуванню.

Матеріалом дроту може бути мідь і її сплави. Дуже важливо, щоб температура розм'якшення металевої добавки була нижче температури декструкції пластмаси. Корисно вводити в пластмасу протизадиркові присадки, наприклад барит ( $BaSO_4$ ), що створює в поверхневому шарі одночасно фрикційні частки й протизадиркову плівку.

Гарні протизадирні властивості має металокераміка КЦ-1В, що дає досить високий і стабільний при зміні температури коефіцієнт тертя. У ній утримується велика кількість міді, графіту й двоокису кремнію як матеріалів, що створюють поверхневий фрикційний шар (вихідна структура - середньопластинчастий перліт- є структурою, що забезпечує гарні фрикційні властивості).

**Зносостійкість.** Гальмова пара повинна мати достатню стійкість проти стирання. Звичайно заміна гальмових накладок зв'язана зі значними труднощами. Крім того, при зношуванні збільшуються зазори, що також порушує роботу гальмової пари. У зв'язку з цим необхідно, щоб матеріал забезпечував досить тривалу роботу. Так, наприклад, автомобільні колодки звичайно поміняють через 30 000- 40 000 км пробігу, коли зношування їх досягає приблизно 4 мм. Колодки нафтобурових лебідок витримують 15-20 спуско- піднімальних операцій. Колодки екскаваторів доводиться міняти після ви-

їмки  $100 \text{ м}^3$  ґрунту. У літакових гальмах при швидкості ковзання 25- 50 м/сек і питомому тиску 1, 5-5,0 МПа зношування не повинне перевищувати 0,3 мм на одне гальмування.

**Стійкість проти теплової втоми.** Багаторазове нагрівання й охолодження обкладок гальмових колодок приводить до виникнення в них температурних напружень . Вони бувають вище напружень від дії механічних навантажень . Це може привести до руйнування матеріалу внаслідок теплової втоми.

## ВИДИ ФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

У наш час застосовуються наступні фрикційні матеріали: металеві; асбокаучукові; асбосмоляні; металокерамічні; органічні (шкіра, корок, войлок та ін.). Всі вони працюють у парі з металами. У високотемпературних вузлах тертя - це чавун Ч1МХ, у менш напружених - чавун СЧ 21- 40 або сталь, на залізничному транспорті - бандажна сталь (В7, В6), у нафтобурових лебідках - марганцовиста сталь.

Для принципової оцінки придатності матеріалу й вибору його найбільш важливими є дві величини: гранична температура (поверхневий і об'ємна) і максимальний питомий тиск, що може витримати матеріал. Перший параметр залежить від режимів гальмування, другий - від конструктивного виконання машини.

Всі фрикційні матеріали пропонується розділяти на наступні групи:

- 1) матеріали для легких умов тертя (короткочасна температура до  $200^\circ \text{C}$ . тривала - до  $120^\circ \text{C}$ ; тиск до 0,8 МПа);
- 2) матеріали для середніх умов тертя (короткочасна температура до  $400^\circ \text{C}$ , тривала - до  $250^\circ \text{C}$ ; тиск до 1,5 МПа);
- 3) матеріали для тяжких умов тертя (короткочасна температура до  $1100^\circ \text{C}$ , тривала - до  $400^\circ \text{C}$ ; тиск до 6,0 МПа).

Металевий фрикційний матеріал - сірий чавун - використовується для залізничних гальмових колодок (ДСТУ 6921-84); працює в парі з бандажною сталлю. Істотним недоліком його є різке падіння коефіцієнта тертя від температури (рис ,а).

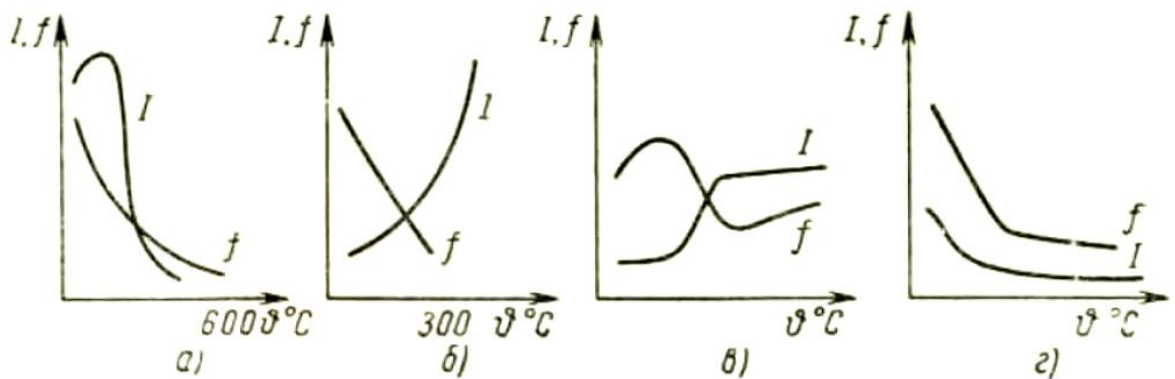


Рисунок Зміна коефіцієнта тертя й величини зношування від температури:

а - чавун- бандажна сталь; б - асбокаучук (6КХ-1) - чавун;

ретинакс - чавун; г - металокераміка на чавунній основі - чавун ЧНМХ

Асбокаучукові й асбосмоляні композиції є найбільш доцільними матеріалами для фрикційних виробів. Вони мають малу теплопровідність, що легко забезпечує створення позитивного перепаду механічних властивостей (розм'якшення тонкого поверхневого шару) внаслідок більших температурних градієнтів, виникаючих при терті. Ці матеріали різко відрізняються по природі міжмолекулярних зв'язків від металів, у результаті чого утворюються неміцні містки схоплювання з металами. При додаванні спеціальних протизадирних присадок вони зовсім не схоплюються. Маючи низький модуль пружності, вони можуть добре протистояти руйнуванню при передеформуванні й забезпечують більші фактичні площі зіткнення тертьових деталей і рівномірний тиск. Ці матеріали добре поглинають і втримують тверді фрикційні частки, що підвищують коефіцієнт тертя пари; при цьому тверді фрикційні частки, легко впроваджуючись у відносно м'яку основу фрикційного матеріалу, не ушкоджують поверхню іншого елемента пари тертя.

Асбокаучукові матеріали застосовуються як накладки в гальмах автомобілів, кільцях зчеплення тракторів, автомобілів і інших машин. Недоліком цих матеріалів є різке падіння коефіцієнта тертя від температури й мала їхня теплостійкість. Вони можуть працювати лише до 300° С, тому що каучукове сполучне розкладається. Істотним недоліком цих матеріалів є їхня низька температура розкладання, при якій вони здатні взаємодіяти із чавуном або сталлю (іншим елементом пари тертя), утворюючи карбіди й пересичені тверді розчини. Поверхневий шар при цьому стає твердим і крихким, що приводить до ушкодження поверхонь і підвищеного зношування. Таким чином, для фрикційних матеріалів надзвичайно важливо, щоб сполучне мало як можна більш високу температуру розкладання. При цьому бажано, щоб при підвищенні температури відбувалися поряд із процесом розкладання також процеси коксотворення. Інтенсивність зношування асбокаучукових матеріалів зі збільшенням температури зростає, причому при температурі порядку 370- 400° С спостерігається катастрофічне зношування фрикційного матеріалу (зразок спалахує й розсипається).

Асбосмоляні матеріали використовуються в авіаційних гальмах, на екскаваторах, нафтобурових лебідках. Вони мають більш високу температуру розкладання сполучного (близько 400°С). Найкращим із цих матеріалів є ретинакс. Він витримує температуру до 1000° С, має досить стійкий коефіцієнт тертя, хоча при температурі близько 400° С останній переходить через мінімум. Коефіцієнт тертя асбосмоляних матеріалів при температурі від 100 до 400° С падає за рахунок виділення на поверхні тертя рідких фракцій - продуктів деструкції смоли. Однак при температурі вище 500° С коефіцієнт тертя ретинакса стабільний і дорівнює 0.27-0,3. Особливістю ретинакса є те, що під впливом високих температур, що розвиваються при гальмуванні, інтенсивно відбувається процес коксування. Внаслідок цього поверхневий шар утвориться не з пухких порошкоподібних продуктів згоряння (як це має місце в асбокаучукових композиціях) і не з рідкої плівки, що змазує, легких фракцій смоли (як це має місце у звичайних матеріалах

зі смоляним сполучним), а з жароміцного ніздрюватого коксового складу, заповненого порошкоподібними й рідкими продуктами згоряння, і деструкції смоли.

Заслуговує на увагу матеріал ескол і матеріал марки БКВ-10.

При розробці металопластмасових композицій необхідно підбирати вхідні до складу композиції металеві сплави так, щоб температура розм'якшення металу відповідала температурі спалаху сполучного. Якщо температура спалаху сполучного нижче температури розм'якшення металу, то метал не зробить сполучної й захисної дії.

З метою полегшення утворення робочого фрикційного шару - третього тіла, - на поверхню тертя гальмових барабанів доцільно наносити пластичні теплопровідні шари. Такі шари сприяють більш рівномірному розподілу тисків, а тим самим зниженню місцевих поверхневих температур, що визначають процеси тертя, зношування, тріщинотворення й приробітки.

Досить перспективними є порошкові металокерамічні матеріали як на мідній, так і на залізній основі. Останні відрізняються високою теплостійкістю, однак їм властивий недолік металевих матеріалів - вони схильні до схоплювання (при низьких температурах) і мають різко виражену падаючу характеристику коефіцієнт тертя - температура. Найбільше поширення одержала металокераміка ФМК-11. Перспективним є застосування пористих металокерамічних матеріалів, просочених різними пластмасами (фенольно-формальдегідною смолою). Інтерес до металокерамічних матеріалів помітно зростає у зв'язку з їхньою високою теплостійкістю.

Органічні фрикційні матеріали знаходять обмежене застосування через їхню низьку теплостійкість і використовуються переважно в малонавантажених вузлах тертя.

## АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Антифрикційні матеріали використовують для зменшення коефіцієнту тертя у парі тертя. Основною властивістю антифрикційної пари тертя є забезпечення позитивного градієнта механічних властивостей по глибині ( 4-й вид порушення фрикційних зв'язків) у сполученні з пружним деформуванням ( 1-й вид порушення), що приводить до мінімальної роботи об'ємного деформування, а при пластичному деформуванні ( 2-й вид порушення) - здатності до багаторазового передеформування, що не приводить до окрихчування матеріалу.

Для досягнення позитивного градієнта механічних властивостей користуються змащеннями. Однак цього ще недостатньо. При витисненні, розриві змащення необхідно забезпечити позитивний градієнт механічних властивостей у самому твердому тілі. Останнє можливо при підборі або такому складі антифрикційного матеріалу, що забезпечує на своїй поверхні при терті утворення захисної плівки (окисла) або плівки перенесеного м'якого металу зі структурних складових, а також при нанесенні на поверхню твердого тіла спеціальних покриттів, менш міцних і більше легкоплавких, ніж

основа, на яку вони наносяться. Для цієї мети придатні тонкі плівки пластмас і інші неметалічні покриття.

При розробці антифрикційних матеріалів широке поширення одержало правило Шарпі, що полягає в тому, що всі сплави, застосовувані в якості антифрикційних, мають один загальний характер: вони складаються із твердих зерен, розподілених серед пластичної маси. Така будова, спостережувана майже по всіх сплавах, визнаних практично найкращими, цілком відповідає тим двом умовам, яким повинні задовольняти сплави для підшипників: тиск передається на тверді зерна, що дають невисокий коефіцієнт тертя й що мають нездатності задирати шейку вала, пластичність же сполучного сплаву дозволяє підшипнику прийняти форму вала й тим знищує можливість появи місцевих надлишків тиску, що представляє головну причину виходу підшипників з ладу.

Металеві антифрикційні матеріали

### **Бабіти.**

В 40-х роках минулого сторіччя Бабітом був запропонований сплав на олов'яній основі, що містить сурму й мідь. Надалі різні підшипникові сплави стали називати бабітами. Найпоширенішими з них є антифрикційні сплави на основі олова й свинцю. Л. М. Бочваром були уведені сплави на свинцевій основі. Їм були закладені основи створення сплавів свинцю з лужними й лужноземельними металами й сплавів на алюмінієвій основі.

Прагнення заощадити олово привело до створення безолов'янистих бабітів. Зокрема, були створені арсеновокадмієві та сурм'янистосвинцеві бабіти.

**Сплави на мідній основі.** Звичайно антифрикційні сплави на мідній основі розділяють на два види:

- 1) сплави міді з оловом-бронзи;
- 2) сплави міді із цинком-латуні.

Широко застосовуються в підшипниках ковзання

**Підшипникові сплави на алюмінієвій основі.** Розрізняють алюмінієві сплави, що містять тугоплавкі (хром, залізо марганець, кремній) і легкоплавкі добавки (олово, сурму, свинець, магній, кадмій).

Ці сплави добре опираються втомлювальному викришуванню, добре відводять тепло й порівняно дешеві. Однак протизадирні властивості їх недостатньо високі.

Алюмінієві антифрикційні сплави, що містять до 20% олова, можуть конкурувати з такими дорогими матеріалами, як безоловяниста бронза.

ієвих вкладишів. Останні застосовуються в автомобільній і тракторній промисловості. Виготовляються вони у вигляді смуг, одержуваних при спільній прокатці алюмінієвого сплаву й стали.

**Антифрикційні чавуни.** Незважаючи на низьку вартість, антифрикційні чавуни не знайшли широкого поширення, тому що в порівнянні з іншими антифрикційними матеріалами стійкість стиранню в них менше.

Застосовуються три типи таких чавунів:

- 1) сірчані із пластинчастим графітом;
- 2) модифікований, утримуючий глобулярний графіт;
- 3) ковкі (мають високу пластичність).

Чим більше вільного графіту в чавунах, тим кращі антифрикційні властивості вони мають. Вільний графіт виконує роль твердого змащення. При збільшенні кількості перліту підвищується зносостійкість чавуну.

## НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ

Все більшу роль як підшипникові матеріали починають грати різні неметалічні матеріали: пластмаси, матеріали, що самозмащуються, пластифікована деревина, металокераміка й гума. Даний напрямок швидко розвивається за рубежом, де ряд спеціалізованих фірм виробляє найрізноманітніші неметалеві підшипникові матеріали.

Застосування полімерних матеріалів у вузлах тертя здійснюється декількома шляхами: покриттям металевої поверхні тонким шаром полімеру з наповнювачем (наприклад, твердим змащенням) або без наповнювача, виготовленням деталі із блоку полімеру; просоченням полімером пористих металевих основ; шляхом переносу тонкої плівки в процесі тертя (метод ротапринта). Для антифрикційних полімерних матеріалів зберігаються, в основному, всі вимоги, пропоновані до гальмових матеріалів на основі полімерного сполучного, за винятком того, що значення коефіцієнта тертя повинні бути можливо малими. Тут також однією з основних вимог є вимога достатньої теплостійкості матеріалу. На жаль, сучасні полімерні матеріали, як правило, працюють до температур 150- 200°C і лише деякі до 300- 350°C. Специфічною особливістю для полімерних матеріалів, що працюють у підшипниках ковзання й ряді подібних вузлів, є вимога малого по величині коефіцієнта лінійного розширення.

Найбільше застосування в наш час знаходять полімерні матеріали на основі фенольно-формальдегідних смол, поліамідів, політетрафторетилену, епоксидних смол та ін. Результати дослідження різних полімерних матеріалів на тертя й зношування, а також дані експлуатації показують, що вантажопідйомність і діапазон робочих температур у нейлону й капрону приблизно ті ж, що й у бабіту, а зносостійкість значно перевершує зносостійкість бронз і бабітів. Пари тертя з капрону застосовуються в підшипниках пресів. Тонкі плівки поліаміду добре охороняють силові зубчасті передачі від зношування. У малонавантажених вузлах застосовують полімерні зубчасті колеса.

Як правило, ненаповнені полімери працюють у вузлах тертя зі змащенням, у зв'язку із чим антифрикційні властивості полімерів слід розглядати в сукупності зі змащенням і дією навколишнього середовища.

Подальше поліпшення антифрикційних властивостей полімерних матеріалів іде по шляху введення в матеріал різних наповнювачів, що поліпшують механічні й теплофізичні властивості матеріалів.



## Самозмащувальні матеріали

Обмеження областей застосування рідких і консистентних змащень послужило причиною дослідження й вишукування матеріалів, здатних працювати без рідкого мастила. Полімерні, пористі металеві й металокерамічні композиції, до складу яких входять або наносяться на поверхню тверді або рідкі мастила, одержали назву самозмащувальних. Наявність змащення перешкоджає схоплюванню поверхонь тертя, зменшує коефіцієнт тертя й зношування матеріалів.

Дотримання правила позитивного градієнта виключає глибинне виривання, тому що руйнування фрикційних зв'язків, що утворилися, локалізується в зоні, близькій до поверхні розділу тертьових матеріалів.

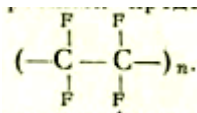
Відмінністю вузлів тертя із самозмащувальних матеріалами є можливість роботи їх "всуху", без подачі у вузол рідких або пластичних змащень, що приводить до значної простоти експлуатації машин, знижує їхню вагу й вартість.

Як тверде змащення застосовується графіт, політетрафторетілен, а також  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ,  $\text{NbSe}_2$ ,  $\text{CdI}_2$ ,  $\text{CdCl}_2$  і інші матеріали.

Залежно від виду твердого змащення можуть істотно змінюватися такі властивості, як фізико-хімічна взаємодія з тертьовими матеріалами, термостійкість, корозійні характеристики, здатність утворення на поверхнях тертя плівок певної товщини, міцність, теплопровідність, електричний опір та ін. Вибираючи необхідну основу й тверде змащення, можна створювати самозмащувальні матеріали для роботи в різних умовах.

### Матеріали, що містять фторопласти.

Іншим видом самозмащувальних матеріалів, що одержали порівняно недавно поширення в машинобудуванні, є фторопласт і фторопластовмісткі антифрикційні матеріали. Фторопласт, або політетрафторетілен являє собою полімер зі структурною форму-



лою. Фізико-механічні й фрикційні властивості політетрафторетілену досить добре вивчені. Однак єдиного думці з питань фізичної причини антифрикційності фторопласта в досі немає. Shoolec і Taliog вважають, що низький коефіцієнт тертя забезпечується малою адгезією політетрафторетілену за рахунок хімічної інертності молекули, розміри атомів фтору і їхнє розташування в якій такі, що вони блокують вуглецевий ланцюг.

У зв'язку з низькою теплопровідністю й різкою залежністю механічних властивостей від температури, а також у зв'язку з "псевдотечією" фторопласта навіть при порівняно невеликих навантаженнях чистий фторопласт не знайшов великого поширення у вузлах тертя.

Фторопласт рекомендується застосовувати: 1) у вигляді тонких плівок, нанесених на металеві поверхні шляхом наклеювання, осаджених із суспензії, і в композиції з лаком; 2) у композиції з різними тонкодисперсними наповнювачами, а також 3) шляхом введення в пористу основу.

До першої групи матеріалів відносяться лаки й суспензії. Створенню матеріалів другої групи присвячена велика кількість робіт. Роль наповнювачів зводиться до зменшення зношування. Слід зазначити, що створення самозмащувальних матеріалів шляхом введення у фторопласт металевих наповнювачів, вирішує завдання, пов'язані з поліпшенням теплопровідності.

В Англії, а пізніше в Радянському Союзі, були створені біметалічні матеріали, що представляють собою сталеву основу з тонким пористим шаром бронзи, просоченої фторопластом або сумішшю фторопласта й дисульфиду молібдену. В Англії такий матеріал одержав назву DU і випускається фірмою Глассіп.

Самозмащувальні матеріали із фторопластом знайшли поширення в хімічній промисловості для роботи в агресивних середовищах і хімічно чистих газах, в авіаційній промисловості й енергетиці. Їх рекомендується використовувати, коли застосування змащення ненадійне або небажане: при високих і низьких температурах, у механізмах зі зворотно-поступальним або обертовим рухом, коли гідродинамічний шар змащення не встигає утворюватися й т.д.

**Матеріали з дисульфідом молібдену й інших твердих змащень.** Як матеріали партертя, що працюють у високому вакуумі й підданих дії радіації, становлять великий інтерес самозмащувальні матеріали із твердими змащеннями (дисульфід молібдену, йодистий кадмій, йодистий свинець і т.д.), що мають шарувату структуру.

Найбільше поширення одержали матеріали з дисульфідом молібдену.

Способи одержання самозмащувальних матеріалів із твердими змащеннями принципово мало чим відрізняються від способів одержання матеріалів із фторопластом. Додавання в полімерні самозмащувальні матеріали наповнювачів (азбесту, скловолокна) розширює температурний діапазон експлуатації цих матеріалів, робить їх більше теплостійкими й дозволяє застосувати в більш навантажених вузлах

**Графіт і графітові матеріали.**

У наш час у практиці машинобудування широко застосовуються різні види графітових матеріалів.

По технологічних ознаках графітові матеріали розділяють на:

- 1) обпалені тверді;
- 2) графітовані;
- 3) просочені смолами, обпалені й графітовані;
- 4) матеріали зі сполучними з полімерних смол;
- 5) просочені металами, обпалені й графітовані.

Графітові антифрикційні матеріали застосовують головним чином для виготовлення поршневих і ущільнювальних кілець, а також підшипників ковзання, електрощіток, напрямних і лопаток ротаційних машин. Використовувати такі матеріали доцільно, коли застосування масел або неприпустимо, або викликає великі утруднення. Так, графітові антифрикційні матеріали виявилися незамінними для роботи в умовах агресивних середовищ (в окисних середовищах з температурою до 400 С. у нейтральних і окисних

середовищах з температурою до 2500°C); у циліндрах компресорів у хімічному й іншому подібному виробництвах, протікання процесів у яких залежить від чистоти стисненого газу; у машинах, вузли тертя яких працюють у середовищі, яке не допускає спільного перебування з маслом і іншими органічними речовинами (наприклад, з рідким киснем і іншими активними окислювачами); у компресорах для кислотних газів, у процесах синтезу аміаку. наявність масла в якій виводить з ладу дорогі каталізatori з губчатої платини; у виробництві полімерів високої якості, у холодильних агрегатах, що працюють на фреоні-12 через розчинність масляних змащень в останньому, і т.д. До технологічних достоїнств самозмащувальних полімерних матеріалів ставляться:

- практично необмежені запаси сировини;
- менші капіталовкладення у виробництво, чим для виробництва металів;
- можливість виготовлення деталей високопродуктивними методами без зняття стружки (відходи в 5 разів менше, ніж у металу);
- низька трудомісткість (в 5...10 разів менше, ніж у металу).

Переваги самозмащувальних матеріалів при експлуатації полягають в наступному:

- спрощення конструкції вузлів тертя, оскільки відпадає необхідність у складних системах змазування;
- зниження трудомісткості обслуговування (відпадає необхідність у періодичному профілактичному змащенню, заміні або долівці мастильного матеріалу);
- забезпечення надійного змащення в умовах зберігання;
- більше широкий, чим у рідких мастильних матеріалів, діапазон робочих температур.

До недоліків самозмащувальних полімерних матеріалів ставляться:

- більше високий, чим при гідродинамічному змащенні, коефіцієнт тертя; він приблизно дорівнює коефіцієнту тертя при граничному змащенні;
- погіршення відводу тепла із зони тертя через відсутність циркуляції рідкого мастильного матеріалу.

Основним напрямком у розробці самозмащувальних полімерних матеріалів є створення багатокомпонентних систем. Підбор співвідношення компонентів у цих системах визначається умовами роботи (режимом тертя, несучою здатністю, середовищем експлуатації), технологічністю одержання матеріалу й економічною доцільністю його використання.

В умовах вакууму, у яких самозмащувальні полімерні матеріали мають більшу швидкість газовиділення, застосовують металокерамічні матеріали або матеріали з робочим шаром твердого мастильного матеріалу.

Металокерамічні самозмащувальні матеріали або просочують рідким мастильним матеріалом, або в їхній склад вводять тверді мастильні матеріали. Останні можна також вносити на поверхню металокерамічних матеріалів.

Існує особливий клас теплостійких самозмащувальних матеріалів, призначених для роботи у вакуумі, на поверхні тертя яких створюється робочий шар твердого мастильного матеріалу.

Найпоширеніші вітчизняні самозмащувальні матеріали - Аф- Зам, АМАН-2, АМАН-4, Естеран-33 у парі тертя зі сталлю мають коефіцієнт тертя 0,1 і максимальну робочу температуру до 300...

У прецизійних вузлах тертя оптико-механічних приладів, що сковзають електричних контактах, а також у деяких силових вузлах тертя, працюючих у широкому діапазоні температур і високих питомих навантажень, застосовують м'які металеві покриття, що виконують роль мастильного матеріалу. У якості м'яких металевих покриттів використовують плівки олова, свинцю, срібла (товщиною 1,5...

До недоліків таких покриттів відносяться:

- неможливість відновлення плівки мастильного матеріалу у процесі зношування;
- високий коефіцієнт тертя;
- гірший (у порівнянні з рідким мастилом) тепловідведення від поверхні тертя.

Про ротапринтний метод використання змащення

Одним з перспективних способів застосування твердих змащень є метод ротапринтного змащення, який полягає в тому, що на одну з тертьових металевих поверхонь шляхом переносу в процесі тертя постійно намазується шар твердого змащення. Втоплювальні ефекти, що приводять до зношування, при цьому локалізуються в мастильному шарі, що відновляється, у результаті чого зношування робочих деталей різко знижується.

При дослідженнях переносу графіту й дисульфиду молібдену на сталеву поверхню встановлено, що кількість перенесеного змащення залежить від шорсткості металеві поверхні. Найбільш ефективною виявилася поверхня з висотою мікронерівностей 1.25-2,5 мкм.

Матеріали для вузлів тертя, що працюють при високих температурах

Для роботи у вузлах тертя при температурах 2000° С и вище застосовуються спеціальні термостійкі антифрикційні матеріали.

До них слід віднести металокерамічні матеріали, що включають у себе тугоплавкі присадки карбідів або боридів ніобію, вольфраму, титану, цирконії й т.д..

При підвищенні температури коефіцієнт тертя спочатку знижується, потім по досягненні певної для кожної пари матеріалів температури - зростає. Такий характер залежності пояснюється тим, що початкове підвищення температури до 1000°С мало позначається на зміні площі фактичного контакту, у той час як сили адгезії можуть зменшуватися, що й приводить до зниження коефіцієнта тертя. При високих температурах площі фактичного контакту різко збільшуються через розм'якшення матеріалу. При цьому зростають сили адгезії в результаті збільшення міжкристалічної дифузії.

Так, при терті графіту по металах, коефіцієнт тертя зменшується аж до температури плавлення металу, якщо не відбувається науглецьовування поверхні металу. Коли має

місце навуглецьовування (наприклад, при терті по вольфраму, нікелю, танталу, молібдену), коефіцієнт тертя швидко зростає при наявності контакту графіту з металом. Залежність коефіцієнта тертя від температури при терті карбідів і боридів по графіті подібна з аналогічною залежністю при терті графіту по графіті. Зі збільшенням температури коефіцієнт тертя спочатку різко знижується до величин порядку 0, 2-0,3, потім значення коефіцієнта тертя змінюються досить незначно.

## ЗНОСОСТІЙКІ МАТЕРІАЛИ

Широко застосовуються в будівельній техніці, для інструментів різання, в штампах. Вони повинні задовольняти наступним основним вимогам: високої міцності, твердості (не нижче НЯС 62 -64), зносостійкості, теплостійкості (до 1000°C), опору тепловому удару. Матеріали для штампового інструменту, крім перерахованих вище вимог, повинні мати високу ударну в'язкість, опір термічній утомі й розгаростійкість.

Інструментальні вуглецеві сталі мають високу твердість після остаточної термічної обробки (загартування), HRC 62 - 64, але низьку теплостійкість (до 200- 250°C). застосування знайшли наступні марки інструментальної вуглецевої сталі: У7, У7А, У8, У8А, У8Г, У8ГА, У10, У10А, У11, У11А, У12, У12А, У13 И У13А.

Леговані сталі. Залежно від призначення й властивостей леговані сталі підрозділяють на дві групи: сталі для ріжучого й вимірнювального інструмента й сталі для штампового інструмента. Для різального інструменту найбільше застосування знайшли сталі 7ХФ, ІХ, ВХ, ХВ5, В1, Ф, 9ХС, ХВГ, 9Х55ВФ, ХВСГ та ін.

Для штампового інструмента - сталі 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХГМ, 5ХНСВ, 3Х2У8Ф, 45Х3В3МФС та ін.

Леговані сталі мають підвищену в'язкість у загартованому стані, глибоку прогартуваність, малу схильність до деформацій і тріщин при гартуванні. Мають низьку теплостійкість (200 - 250°C).

Швидкорізальні сталі. Інструментальні швидкорізальні сталі набувають після термообробки високу твердість, міцність і зносостійкість, зберігаючи ріжучі властивості при нагріванні під час роботи до 600 - 650°C. Поряд із застосуванням розповсюджених швидкорізальних сталей Р9, Р12 і Р18 використовують нові марки швидкорізальних сталей: підвищеної продуктивності й зі зниженим змістом дорогих і дефіцитних легуючих елементів (насамперед вольфраму) при збереженні їхніх ріжучих властивостей.

## Металокерамічні тверді сплави

Вітчизняна промисловість випускає три групи металокерамічних твердих сплавів: вольфрамові, титано- вольфрамові й титано-тантало-вольфрамові. Одержують їх шляхом спікання вихідного матеріалу при високій температурі. Сплави першої групи складаються з карбідів вольфраму й металевого кобальту й позначаються буквами ВК і цифрою, що показує процентний вміст кобальту.

Сплави другої групи складаються з карбідів вольфраму й титану й металевого кобальту. Ці сплави позначаються буквами ТК і цифрами. Цифра після букви Т указує на процентний вміст карбідів титану, а цифра після букви К - на процентний вміст кобальту.

Сплави третьої групи складаються з карбідів вольфраму, титану й танталу і металевого кобальту. Цифра, що стоїть після букв ТТ, указує на процентний вміст карбідів титану й карбідів танталу, а цифра після букви К - на процентний вміст кобальту.

Зносостійкість металокерамічних твердих сплавів у 8 разів вища, ніж у чавунів і майже в 20 разів – ніж у сталей.

## КОНСТРУКТИВНІ СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ

До числа найбільш ефективних конструктивних заходів з поліпшення умов тертя можна віднести наступні:

- зниження контактної навантаженості;
- усунення можливості схоплювання поверхонь;
- заміна сухого тертя граничним, граничного тертя - режимом гідродинамічного або гідростатичного тертя;
- зменшення роботи тертя;
- поліпшення температурного режиму тертя;
- захист вузлів тертя від абразивних часток;
- захист вузлів тертя від хімічних агентів зовнішнього середовища.

Захист вузлів тертя від абразивних часток здійснюється за допомогою різних систем масляних і повітряних фільтрів, які забезпечують очищення масла й повітря, що надходять до поверхонь тертя.

Один з конструкторських способів підвищення зносостійкості вузлів тертя - застосування герметизувальних пристроїв. Герметизувальний пристрій (ГУ) - сукупність деталей, що утворюють конструкцію, призначену для герметизації вузла тертя (запобігання витоку змащення й захист від проникнення ззовні абразивних часток).

Герметизувальні пристрої діляться на рухливі й нерухливі, контактні й безконтактні: манжети, торцеві ущільнення, поршневі кільця, набивальні (чепцеві) ущільнення, лабіринтові ущільнення, прокладочні герметизатори різних типів та ін.

На працездатність будь-якого ГУ впливають численні й різноманітні по своїй природі фактори, які часто взаємозалежні між собою. Так, на працездатність герметизувальних пристроїв впливають:

- режим роботи (ресурс, температура, навантаження, швидкість ковзання, умови зберігання й транспортування, наявність вібрацій конструкції, пульсацій робочих параметрів та ін.);

властивості герметизуємого середовища (температури замерзання й кипіння, теплофізичні властивості, хімічна активність, в'язкість і залежність її від температури й тиску, особливості поведіння у вузьких зазорах і т.д.);

- властивості матеріалів сполучених деталей і їхніх покриттів (міцнісні, втомлювальні, релаксацийні, теплофізичні й ін.);

- технологія виготовлення й складання ущільнень (спосіб і характер обробки поверхонь, точність виготовлення й т.д.).

## ТЕХНОЛОГІЧНІ СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ

Пластичне деформування, термічна, хіміко-термічна й хімічна обробка поверхонь, гальванічні покриття, металізація напилюванням, наплавлення, електроупрочнення й т.д. відносяться до технологічних способів поліпшення умов тертя

Обробка різанням

При обробці різанням забезпечується необхідна шорсткість поверхні, на 20...30 % збільшується твердість обробленої поверхні за рахунок утворення зміцненого шару глибиною 0,05...0,5 мм, у поверхневому шарі залишкові напруження стиску 3...7 Мпа позитивно впливають на зношування.

На величину шорсткості впливають наступні технологічні показники процесу різання:

1 Швидкість різання - чим більше, тим більше шорсткість і далі знижується, збільшується товщина наклепаного шару, але при більших швидкостях - зменшення (200...600 об/хв), зниження наклепу.

2 Подача - зі збільшенням подачі збільшується глибина наклепу, збільшується шорсткість.

3 Глибина різання - мало впливає

Пластичне деформування

Обробка дробом, дробоабразивна обробка, накочування роликками, кулькам вібраційне накочування, поверхневе розкочування, зміцнення карбуванням, віброударна обробка, вібраційна головка – це засоби зниження шорсткості та зміцнення поверхневого контактного шару.

*Термічна й хіміко-термічна обробка*

З можливих видів хіміко-термічної обробки поверхні найпоширеніші наступні:

1 Цементация - насичення вуглецем поверхневого шару маловуглецевих (до 0,3%3)

сталей. Поверхня тверда, серцевина м'яка, тслоя = 0,2...0,3м, швидкість 0,08...0,1

мм/год. При цьому завжди застосовується загартування, гази зі змістом CO<sub>2</sub>, C. Рідина Si, NaCN, t = 900<sup>0</sup>C.

2 Азотування - насичення азотом сталі й титану. Температура процесу

$T_{pa}$  - 520- 560<sup>0</sup>, використовуються нітриди азоту, швидкість насичення 0,01 мм/год, для завершення процесу треба 60...70 годин, утвориться шар товщиною 0,6...0,7 мм. Твердість HRC = 56...58, зносостійкість збільшується в 8...20 разів.

3 Цианірування - одночасно використовуються азот і вуглець (530...650<sup>0</sup>C

- низькотемпературне, 800...930<sup>0</sup>C - високотемпературне).

Як термообробка застосовується поверхнєве загартування:

а) полум'яна ПЗ - нагрівання шлаками, газом і киснем, газ- кисень. Охолодження - вода, емульсія, повітря;

б) поверхнєве загартування з контактним нагріванням струму від понижувального трансформатора (зварювального). У контакті - тепло, охолодження водою, емульсією (25...600<sup>0</sup>C). Є незагартований шар 0,05...0,2 мм, видаляється шліфуванням (рейки, колеса, шейки валів і т.д.);

в) СВЧ- Загартування - індуктор з охолодженням. СВЧ- СПЧ;

г) загартування з нагріванням в електроліті (розчин кальцинованої соди підключають до "+", а деталь - до "-"): деталь швидко нагрівається - стрижні клапанів, штифти, торці гвинтів.

*До хімічних видів обробки поверхні відносяться:*

1 Хімічне нікелювання - покриття поверхні сплавом нікелю й фосфору, виділення металів з водяних розчинів із солей за допомогою хімічних препаратів восстановителей. Піддають сталь, чавун, бронзи, алюміній і його сплави. Температура ванни до 95<sup>0</sup>C. При нагріванні до 300<sup>0</sup>C утвориться з'єднання Ni<sub>3</sub>P - захисне (= 0,1 мм). Термостійке (до 600<sup>0</sup>C).

2 Оксидування - утвориться штучна оксидна плівка Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, товщина до 3 мкм - попереджає заїдання. Ведеться у ваннах лужних і кислих при t розчину 138...165<sup>0</sup>C.

3 Фосфатування - утворення плівки нерозчинних фосфатних солей (у ванні до 90<sup>0</sup>C) або в струмені. Плівка має товщину 2...50 мкм, жаростійка до 600<sup>0</sup>C, гарна для приробляння.

4 Сульфїдування - збагачення шарів сталевих виробів сіркою. Ведуть у рідкому, твердому або газоподібному середовищі при  $t_{pa}$  від 150<sup>0</sup>C до 950<sup>0</sup>C, утвориться Fe і Fe<sub>2</sub>. Глибина шару до 0,04 мм. Прискорюється приробляння, активізується дія змащення, шорсткості доводять до Ra = 0,32...0,04 мкм.

5 Обробка паром - при t = 80<sup>0</sup>...600<sup>0</sup>C, тиск 0,1 Мпа з витримкою 1- 2 години - інструмент зі швидкорізальної сталі. Утвориться окісна плівка, збільшується зносостійкість, проявляється ефект приробляння.

*Покриття поверхонь тертя. Гальванічні покриття*

Електролітичне хромування. Хром має високу твердість, міцністю, хімічною стійкістю. У ваннах з електролітом осаджується на поверхню деталей, твердість покриття міняється (HV 450...1000) за рахунок зміни плавності струму



й температури електроліту. Хром мало зношується сам, майже не зношує сполучену з ним сталеву або чавунну поверхню. Покриття гладке або пористе.

Електролітичне нікелювання. Застосовується для підвищення износо-стійкості, відновлення розмірів зношених деталей (до 1,25 мм.). При терті без змащення зносостійкість нікелевого покриття в 2...3 рази вище, ніж у загартованої сталі, на 10...20 % нижче, ніж хромованої поверхні.

Залізнення. Процес електролітичного осадження заліза з водяних розчинів його закисних солей. Залізо осаджують на катоді (-), анодом (+) служать прутки малоуглеродистий сталі. Плівка заліза характеризується високою чистотою, корозійна стійкість висока. Покриття можна цементувати або хромувати (якщо потрібна твердість).

Наплавлення й металізація поверхонь

Наплавлення застосовується для ремонту, підвищення твердості поверхонь, зниження витрати кольорового металу. Найменша товщина наплавленого шару - 0,25 мм, найбільша - не обмежена. Небезпека - поява тріщин. Щоб уникнути утворення тріщин застосовують попереднє нагрівання й збереження постійної температури в процесі наплавлення: чим вище схильність до тріщинотворення, тим вище температура підігріву. По закінченні процесу необхідно плавне охолодження (10...30<sup>0</sup>С у сек.). Наплавлений метал має структуру литого металу й зміцнюється накопчуванням.

Металізація напилюванням полягає в розплавленні металу й розпиленні його струменем стисненого газу (повітря) на попередньо підготовлену поверхню деталі. Розплавляють дрід сталі, міді, цинку, свинцю, бронзи, латуні, алюмінію, кадмію, порошкові матеріали. Розрізняють газову, електричну й плазменну металізацію (спосіб плавлення). Частки при ударі деформуються й вклинюються в нерівності поверхні. Пористість покриття до 10% , шар має усадку при товщині шару більше 1,5 мм. Можливе відшаровування шару; підігрів деталі до 150<sup>0</sup>С знижує ймовірність відшаровування. Підвищення зчеплення - металізація в захисному середовищі, металізація одночасно двома й більше металами - псевдосплавами (наприклад, свинцево-алюмінієвим сплавом у співвідношенні 1:1 - добре припрацьовується).

## ЗМАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### Види змащення

Застосування мастильних матеріалів для зменшення сили тертя відомо з глибокої стародавності. На зміну застосовуваним століттями органічним, головним чином рослинним, маслам наприкінці ХІХ століття прийшли мінеральні (нафтові) масла.

У міру розвитку науки й техніки нафтові масла вдосконалювалися; потім з'явилися синтетичні мастильні матеріали, тверді й, нарешті, матеріали, що самозмащуються. У наш час залежно від фізичного стану мастильного матеріалу розрізняють три види ма-

стильних матеріалів: рідкі (масла, емульсії, суспензії), пластичні (змащення) і тверді (порошки, покриття).

За типом розділення поверхонь тертя мастильним шаром розрізняють наступні види змащення:

1 Гідродинамічне (газодинамічне) змащення - рідинне (газове) змащення, при якому повний поділ поверхонь тертя здійснюється в результаті тиску, що самовиникає в шарі рідини (газу) при відносному русі поверхонь.

2 Гідростатичне (газостатичне) змащення - рідинне (газове) змащення, при якому повний поділ поверхонь тертя деталей, що перебувають у відносному русі або спокої, здійснюється в результаті надходження рідини (газу) у зазор між поверхнями тертя під зовнішнім тиском.

3 Граничне змащення - змащення, при якому тертя й зношування між поверхнями, що перебувають у відносному русі, визначаються властивостями поверхонь і властивостями мастильного матеріалу, відмінними від об'ємних.

4 Напіврідинне змащення - змащення, при якій частково здійснюється рідинне змащення.

Механізм мастильної дії при граничному змащенні

Механізм дії граничного змащення досить складний, тому що при малій товщині шару мастильний матеріал втрачає свої об'ємні властивості, зокрема, рухливість, під впливом молекулярного поля твердого тіла. Крім того, мастильний матеріал, вступаючи у фізичну й хімічну взаємодію з поверхнями тертя, різко змінює властивості цих поверхонь.

Відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя ефективність мастильної дії обумовлена двома явищами: по-перше, змащення знижує сили адгезійної взаємодії поверхонь тертя (зменшують молекулярну складову коефіцієнта тертя  $f_m$ ); по-друге, знижує опір пружному або пластичному відтисненню (зменшує механічну складову коефіцієнта тертя  $f_d$ ). З погляду фрикційних зв'язків застосування мастильного матеріалу сприяє збереженню умов зовнішнього тертя, створенню позитивного градієнта механічних властивостей, тому що міцність плівки (мастильного шару) менше міцності основного матеріалу. Мастильна плівка зменшує фрикційні параметри, від яких залежить величина дотичних напружень, що виникають у результаті міжмолекулярної взаємодії.

Рідкі мастильні матеріали

Рідкі мастильні матеріали зменшують коефіцієнт тертя, охолоджують і захищають від корозії тертьові поверхні, видаляють продукти зношування й інші абразивні частки, що попадають у вузли тертя з атмосфери цехів заводу. Ці матеріали використовують у таких випадках:

1) у вузлах вдається створити рідинне або напіврідинне тертя;

- 2) є надійне ущільнення або ущільнення не потрібно через розташування вузлів у герметично закритих корпусах (підшипники шестеренних клітей і редукторів);
- 3) необхідний примусовий відвід теплоти або промивання для видалення продуктів зношування й виробничого пилу (гайки натискних пристроїв обтискних станив).

Вузли тертя промислового устаткування змазують дистилатними й залишковими мінеральними маслами, які є продуктами другої й третьої перегонки, нафти. Масла вибирають по фізико-хімічних і експлуатаційних властивостях. Найважливіша властивість їх - в'язкість - характеризує внутрішнє тертя, що виникає між частками мастила при відносному переміщенні їх під дією зовнішньої сили.

Розрізняють динамічну, кінематичну и умовну в'язкості. Динамічну оцінюють силою, затрачуваною на переміщення одного слоя масла относительно другого со скоростью  $l$  м/с, когда площадь каждого слоя  $l$  м<sup>2</sup>, а расстояние между слоями  $l$  м. Если сила равна  $l$  Н, то единица динамической вязкости  $1 \text{ Па} \cdot \text{с}$

Кінематична в'язкість - це відношення динамічної в'язкості до щільності масла. Якщо одиниця щільності масла  $1 \text{ кг/м}^3$ , то одиниця кінематичної в'язкості  $1 \text{ м}^2/\text{с}$ .

Умовна в'язкість являє собою відношення часу витікання через стандартний капіляр  $200 \text{ см}^3$  масла при  $50$  або  $100^\circ\text{C}$  до часу витікання такого ж обсягу води при температурі  $20^\circ\text{C}$ . Вимірюють умовну в'язкість градусами ВУ. Зв'язок між кінематичною в'язкістю  $\nu$  і градусами ВУ можна описати емпіричною формулою

$$\nu = 730 \text{ ВУ} - 630/\text{ВУ}$$

В'язкість масел обернено пропорційна температурі Це дуже важлива експлуатаційна властивість. Неминучі при роботі устаткування коливання температури змінюють в'язкість і швидкість зношування деталей. Залежність в'язкості масел від температури нелінійна. Як наближена оцінка в'язкісно- температурних властивостей масел прийнятий температурний коефіцієнт в'язкості /ТКВ/

$$TKB = \frac{\nu_0 - \nu_{10}}{\nu_{50}}$$

де  $\nu_0$   $\nu_{50}$   $\nu_{100}$  - кінематична в'язкість масел при температурі відповідно  $0$ ,  $50$ ,  $100^\circ\text{C}$ .

Чим менше цей коефіцієнт, тим вище експлуатаційні якості масел. В'язкість вимірюють стандартними приладами - капілярними віскозиметрами.

При граничних умовах тертя, коли деталі частково розділені шаром масла, якість змащення оцінюють не в'язкістю, а маслянистістю, що характеризує змочуваність металів мінеральними маслами. Порівнюють масла по індексах маслянистості.

Температура спалаху масла - це температура, при якій пари масла утворять з навколишнім повітрям горючу суміш. Якщо масло загоряється й горить не менш  $5$  с, то така температура називається температурою запалення. Ці показники характеризують такі експлуатаційні властивості масел, як випаровуваність і вогнебезпечність. Особ-

ливо важливо враховувати їх, вибираючи масло для вузлів тертя машин і механізмів, що працюють у зонах високих температур.

Температурою застигання називають температуру, при якій масло втрачає плинність і здобуває властивості, пластичної маси. Щоб визначити температуру застигання, масло наливають в пробірку площею поперечного перерізу  $1 \text{ см}^2$ , нахилenu на кут  $45^\circ$ , і охолоджують. Рівень масла не повинен змінювати свого положення протягом 1 хв. Чим краще масло зберігає плинність, тим більше придатне воно для змащення вузлів тертя машин, що працюють в умовах негативних температур.

Кислотність характеризує наявність у маслі вільних кислот, які з'являються в ньому під час експлуатації або попадають із дистилатів. Реагуючи з чорними металами й водою, окислені масла утворюють металеві мила. Оподи у вигляді важких шламів на внутрішніх стінках трубопроводу зменшують прохідні перерізи й понижають ефективність циркуляційних систем рідкого мастила. Кислотність вимірюють кислотним числом, тобто кількістю міліграмів їдкого калію (КОН), необхідного для нейтралізації 1 г масла.

Коксівність - властивість масел виділяти твердий осад (кокс) при нагріванні без доступу повітря. Мірою коксівності служить коксове число, тобто кількість опадів, отриманих прожарюванням 10 г масла при  $500\text{...}600^\circ\text{C}$ .

Під зольність розуміють якість очищення масла й наявність у ньому неспалених речовин. Вона дорівнює кількості залишку, отриманому після випарювання, згорання й прожарювання навішення масла.

Вільні луѓи, реагуючи з кольоровими металами, утворюють густі клейкі оподи (мила), які осаджуються на внутрішніх стінках трубопроводів. Наявність у маслі вільних луѓів установлюють фарбуванням спиртової витяжки під дією фенолфталеїну

Вода окисляє металеві поверхні й сприяє появі згустків, що порушують функціонування мастильних систем. Вона попадає в масло при недбалому зберіганні або негерметичних ущільненнях, крім того, осаджується на внутрішніх стінках трубопроводів у вигляді конденсату,

Емульгованість - здатність масла, змішуючись із водою, утворювати важко роздільні емульсії. Це властивість необхідно враховувати для систем змащення устаткування, інтенсивно охолоджуваного водою. Емульгованість вимірюють числом деемульсації, тобто часу (у хвилинах) повного поділу масла й води..

Рідкі мастильні матеріали, що широко використовуювані в сучасних машинах, умовно можна розбити на три групи за способом одержання: рослинні, мінеральні та синтетичні.

Моторні мастила застосовуються для змащення поршневиx двигунів внутрішнього згорання. Ці мастильні матеріали складаються з основи базового масла, а також присадок, що поліпшують природні властивості базового масла або надають нові властивості, що йому необхідні. Експлуатаційні властивості моторного масла визначаються в

основному складом і в'язкістю базового масла, а також типом і концентрацією доданих до нього присадок.

Автотракторні трансмісійні масла призначені для змазування механічних і гідромеханічних передач рухливих наземних машин. Типовий вид ушкодження робочих поверхонь зубів шестірень і підшипників трансмісій - втомлювальне викришування, при наявності високих контактних температур, і заїдання. Ефективні заходи боротьби проти заїдання - додавання протизадирних присадок до масел.

Призначення масел для промислового устаткування (індустріальних масел) - сприяти зниженню коефіцієнта тертя й інтенсивності зношування в тертьових вузлах верстатів, пресів, прокатних станів і іншого промислового встаткування. Одночасно індустріальні масла повинні відводити тепло від вузлів тертя, захищати деталі від корозії, очищати тертьові поверхні від забруднення, не допускати утворення піни при контакті з повітрям і т.д.

Індустріальні масла по в'язкості умовно ділять на три підгрупи:

- маловязкі (легкі) в'язкістю від 6 сст при 20°C до 10 сст при 50°C;
- середневязкі (середні) в'язкістю від 10 до 58 сст при 50°C;
- грузлі (важкі) в'язкістю від 58 сст при 50°C до 95 сст при 100°C.

#### Присадки до мастильних матеріалів

Присадкою називають речовину, що додається до мастильного матеріалу для надання йому нових властивостей або зміни існуючих. Залежно від виконуваних функцій вони діляться на в'язкісні, миючі, депресорні, антиокисні, антифрикційні, протизадирні й протизношувальні.

В'язкісні присадки поліпшують температурний коефіцієнт в'язкості, не змінюючи в'язкісно- температурних властивостей масел. Масло з такими присадками (поліізобутилені, вініпол, воль толи) менше втрачає рухливість при низьких температурах. Миючі присадки (нафтелові кислоти, солі кальцію, барію, алюмінію, з'єднання цинку, свинцю) мають здатність очищати поверхню тертя й внутрішні стінки трубопроводів від опадів металевих мил і плівок смолистих речовин. Депресорні (вольтоли, окислений петролатум, депресоры АзНДІ й АзНДІ- ЦІАТІМ І, поліметакрилат, парафлоу, сантопур) знижують температуру застигання.

Протизадирні присадки (ЕЗН-2, ЛЗ-309, ВІД-1, сульфол) зменшують швидкість утворення металевих зв'язків при зношеннях схоплюванням I й II роду. Взаємодія протизадирних присадок з контактуючими деталями - це процес селективної корозії ювенільних ділянок поверхонь тертя хімічно активними з'єднаннями хлору, сірки, фосфору, у результаті чого на цих ділянках утворюються захисні плівки оксидів. Зношування схоплюванням можна усунути, якщо вибрати присадки так, щоб виконувалися співвідношення  $V_{ox} > V_1$ ,  $V_{ox} > V_2$ , де  $V_{ox}$  - швидкість утворення захисних плівок оксидів;  $V_1$ ,  $V_2$  - швидкість процесів схоплювання I і II роду.

Протизношувальні присадки (МНІ-3, МНІ-5, МНІ-7, ДФ-12, СБ-3, СК-3) підсилюють міцність масляної плівки, що розділяє поверхні тертя Антиокисні (АзНДІ-11, 'АзНДІ-11Ф та ін.) підвищують опір масла окислюванню киснем повітря й збільшують строк його служби.

### Пластичні мастильні матеріали

Пластичні мастильні матеріали зменшують коефіцієнт тертя й частково охороняють тертьові поверхні від корозії. Їх використовують для вузлів, теплота яких повністю виділяється в навколишній простір, і для важконавантажених підшипників ковзання, якщо вал обертається з малою кутовою швидкістю ( $\omega < 5$  рад/с) або робить тільки частину обороту (наприклад, підшипники валів маніпуляторів і кантувачів обтискних станів).

Пластичні мастила являють собою мінеральне масло, сплавлене з різними загусниками (органічні, синтетичні й металеві мила, парафін, цезерин, петролатум).

Залежно від виду загусника розрізняють мастила кальцієві, натрієві, на змішаній кальцієво-натрієвій основі, на металевій основі. Крім того, пластичні мастила класифікують по температурі каплепадіння (низько-, середньо- і тугоплавкі) і по призначенню (антифрикційні, захисні, ущільнювальні).

Кальцієві мастила вологостійкі містять до 4% вільної води, мають низький коефіцієнт внутрішнього тертя; змішуючись із водою, вони не утворюють емульсії. Їх можна застосовувати в умовах високої вологості при температурі  $-30 \dots +55$  °С. Розплавляючись, кальцієві мастила втрачають воду, що втримується в них, а після охолодження не відновлюють фізико-хімічні властивості.

Натрієві мастила чутливі до вологи: з'єднуючись із водою, вони легко утворюють емульсії й виділяють кородувальні кислоти й луги. Тому їх використовують в умовах, коли повністю виключений контакт з водою. Температурний діапазон натрієвих масил коливається в межах  $18 \dots 400$  °С. На відміну від кальцієвих вони мають здатність відновлювати фізико-хімічні властивості після розплавлювання.

Кальцієво-натрієві мастила по вологостійкості й температурному діапазоні займають проміжне положення. Вони ефективні при невеликій вологості в інтервалі температур  $0 \dots 110$  °С.

Пластичні мастила характеризуються наступними основними показниками: температурою каплепадіння, пенетрацією, вмістом води, вільних кислот і лугів, а також золи, механічних домішок.

Температурою каплепадіння називається температура, при якій з мастила, що підігрівається в умовах стандартного приладу, падає перша крапля. Цей показник не означає розплавлювання пластичного змащення, але дає наближене уявлення про верх-

ню границю її працездатності. Робоча температура вузла тертя повинна бути нижче температури каплепадиння на 10...20 °С.

Пенетрація характеризує щільність або ступінь консистенції пластичних змащень. Її вимірюють стандартними пенетрометрами, занурюючи в змащення тарований конічний плунжер, Глибина занурення (у сотих частках сантиметра) за 5с при 25 °С називається числом пенетрації. Чим більше це число, тим менше консистентність мастила. З підвищенням температури щільність пластичних мастил зменшується, Щоб установити характер такої зміни, число пенетрації визначають при 25, 50, 75 °С. Для роботи у вузлах тертя зі значними тепловими коливаннями вибирають мастила з більш пологою кривою пенетрації.

Наявність у мастилi великої кількості вільної води викликає корозію поверхонь тертя деталей, що контактують. Крім того, замерзаючи, вода погіршує прокачуваність змащення по трубопроводах, Максимальна кількість вільної води в кальцієвих мастилах не повинна перевищувати 4%, у натрієвих - 0,5%, а в захисних мастилах наявність води не допускається.

Для того щоб у системах змащення не утворилися металеві мила, пластичні мастила повинні бути хімічно нейтральними. У деякі мастила додають невелику кількість вільних лугів (до 0,2%) для зв'язування кислот, які з'являються при експлуатації або зберіганні устаткування.

Наявність у пластичних мастилах механічних домішок - результат неякісного виготовлення або недбалого зберігання. Домішки в мастилах більш небезпечні, ніж у мінеральних маслах, тому що на багатьох підприємствах немає устаткування для очищення пластичних змащень.

Пластичні мастила випробовують на механічну, термічну, хімічну стабільність і кородувальну здатність, Ці показники дозволяють судити про можливість застосування мастил у конкретних умовах.

#### Тверді мастильні матеріали

Тверді мастильні матеріали - це матеріали, які забезпечують змащення між двома поверхнями в умовах сухого або граничного тертя в екстремальних умовах. Вони можуть або входити як наповнювач матеріалу або покриття до складу одного або двох елементів пари тертя або вноситься у вигляді порошку.

Основні типи твердих мастильних матеріалів: графіт, дисульфід молібдену ( $\text{MoS}_2$ ), дисульфід вольфраму ( $\text{WS}_2$ ) і деякі інші ( $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ,  $\text{NbSe}_2$ ,  $\text{PbJ}_2$ ,  $\text{BN}$ ,  $\text{MoT}_2$ ). Графіт при терті по твердій поверхні служить хорошим мастильним матеріалом для деталей, що працюють на повітрі.

Дисульфід молібдену має гексагональну кристалічну решітку В решітці  $\text{MoS}_2$  кожний шар атомів молібдену по обидва боки зв'язаний із шаром з атомів сірки. Два шари сірки, між якими перебуває шар молібдену, представляють шаруватий пакет. Пакети контактують один з одним шарами сірки, між якими й відбувається тертя. Слабкі мо-

лекулярні сили забезпечують легкість ковзання пакетів і, тим самим, низький коефіцієнт тертя.

Графіт має шарувату кристалічну структуру, у якій атоми в шарах ґрат щільно впаковані. Атоми в шарі зв'язані силами ковалентного зв'язку, а атоми в сусідніх шарах - більш слабким металевим зв'язком. Розходження зв'язків у кристалі приводить до великої анізотропії властивостей

Антифрикційні властивості графіту визначаються здатністю його кристалів легко розщеплюватися по площині спайкості; орієнтуватися під впливом навантаження перпендикулярно напрямку впливу, а також утворювати на поверхнях тертя тонку суцільну плівку орієнтованих лусочок графіту, міцно пов'язану з металом за рахунок ненасичених зв'язків, що виникають при розщепленні.

## ЛАБОРАТОРНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ

### 1 Класифікація

По кінематичній ознаці всі машини для випробування на зношування малих зразків можна розділити на два класи: I - машини поступального руху й II - машини зворотно-поступального руху. Усередині кожного класу машини розділяються на дві групи: 1) машини торцевого тертя й 2) машини тертя по твірній.

Усередині кожної групи розрізняють дві підгрупи: а) машини з коефіцієнтом взаємного перекриття, що прагне до одиниці, і б) машини з коефіцієнтом взаємного перекриття, що прагне до нуля (пальцеві машини).

Таким чином, є вісім різних типів машин. Такий підрозділ необхідно у зв'язку з потребою збереження видів руйнування поверхонь тертя.

При поступальному й зворотно-поступальному рухах характери руйнування різко відрізняються. Так, зворотно-поступальний рух приводить до значного зношування (наприклад у результаті фреттинг- корозії).

Зміна коефіцієнта взаємного перекриття, як ми вказували, змінює зношування на кілька порядків. Торцеве тертя й тертя по твірній дають різко різний ефект в умовах граничного змащення, тому що міняються умови утворення плівки змащення.

Для певного типу машини необхідно дотримувати теплового режиму й характер навколишнього середовища.

Найпростішим способом контролювання потрібного температурного режиму є застосування термопар (не менш двох: одну на глибині, іншу біля поверхні); можливо також і застосування термофарб.

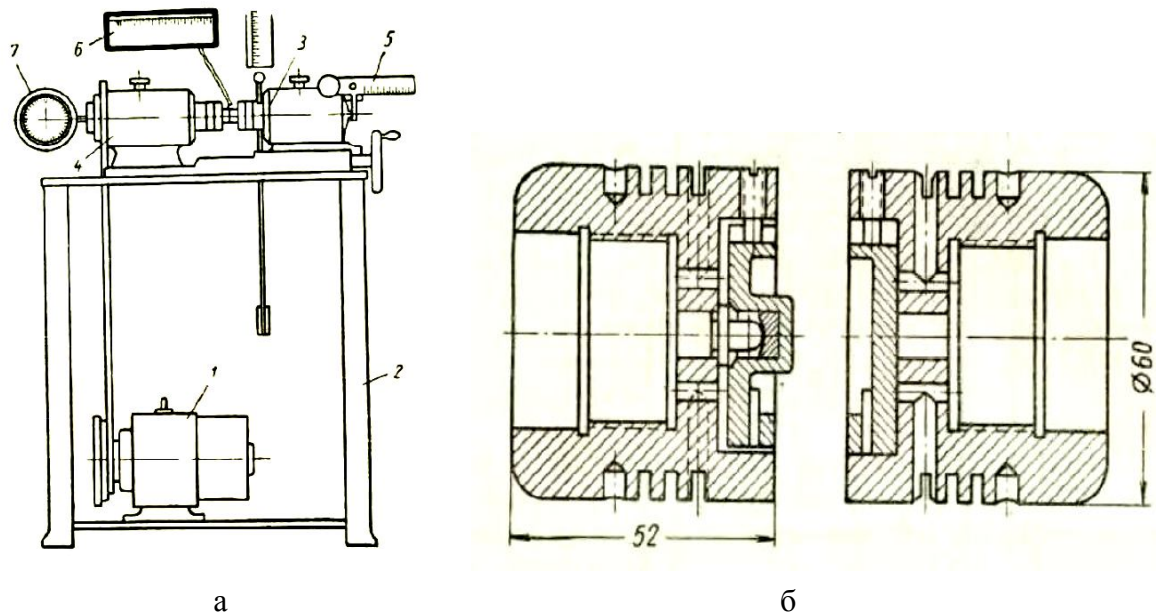
### 2. Испитові машини тертя

Приведемо опис деяких іспитових машин.

Деякі лабораторні установки для випробувань на тертя й зношування



Машина I-47-K- 54. призначається для оцінки зношування й коефіцієнта тертя металевих і неметалічних матеріалів (рис). На кінцях валів укріплені голівки із гніздами для зразків. Голівка, що приводиться в обертання валу має кульову опору для гнізда, що забезпечує самовстановлення зразка. Загальний вид голівок зі зразками показаний на рис. . Випробування ведуться на двох кільцевих зразках, що труться торцями. Зовнішній діаметр зразків 28 мм, внутрішній 20 мм, висота 10- 15 мм. Машина забезпечує обертання зразків зі швидкістю 100- 5000 об/хв і можливість регулювання швидкості обертання при зміні числа оборотів. Навантаження на зразок створюються натискним пристроєм. Сила тертя й коефіцієнт тертя визначаються по попередньо відтарованому відхиленню маятника. Для зміни теплового поля є змінні голівки, які або нагріваються струмом, або прохолоджуються водою (рідким повітрям); зі зміною теплового поля змінюється коефіцієнт тертя й зношування.



1 - електродвигун; 2 - станина; 3 - рухлива бабка з обертовим валом; 4 - нерухлива бабка, у якій вал закріплений на підшипниках; 5 - навантажувальний пристрій; 6 - прилад для виміру температури, що розвивається при терті; 7- прилад для вимірі числа оборотів зразків

Рисунок – Загальна схема (а) та вигляд голівок для зразків (б) машини I-47K54

Перевагою машини I-47-K54 є можливість одержання на ній широкого діапазону температур (до 1000°). Вона дозволяє оцінювати теплостійкість фрикційних і антифрикційних матеріалів. Стандартні випробування матеріалів на фрикційну теплостійкість проводяться при стаціонарному режимі тертя.

Схема торцевого тертя циліндричних зразків знаходить усе більше широке застосування в машинах тертя.

Для випробування матеріалів на фрикційну теплостійкість самозмащувальних матеріалів у вакуумі було розроблено машину І-47-В2. Вона дозволяє одночасно випробовувати три пари тертя (у вакуумі  $10^{-8}$ - $10^{-9}$  мм. рт. ст. - одну пару тертя, у вакуумі  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  мм. рт. ст. - дві пари тертя).

Електродвигун постійного струму 11 (рис.) приводить в обертання через пасову передачу 10 магнітну муфту 1, що фланцевим з'єднанням кріпиться до патрубку 4. Муфта надає руху валу 2, установленому у підшипниках ковзання з металокераміки з  $\text{MoS}_2$  у корпусі 3. На кінці вала є кульова опора для оправки рухливого зразка 7, що полегшує прилягання зразків по поверхні тертя. Нерухомий зразок 8, установлений в оправці 6, має можливість провертатися в підшипнику, поки упорний гвинт не торкнеться тензодатричної балочки 5 з тим більшою силою, чим більше сила тертя. Вузол тертя навантажується важільною системою з вантажем 9. Електродвигун, муфта, корпус вузла тертя охолоджуються водою. Момент тертя замірюють системою: тензодатрична балочка з тензодатчиками - підсилювач - мікроамперметр. Температура поблизу поверхні тертя вимірюється за допомогою термопари й потенціометра; швидкість обертання вала - фотоелементом, що працює в комплекті із частотоміром. Системи виміру моменту тертя й температури перед випробуваннями таруються.

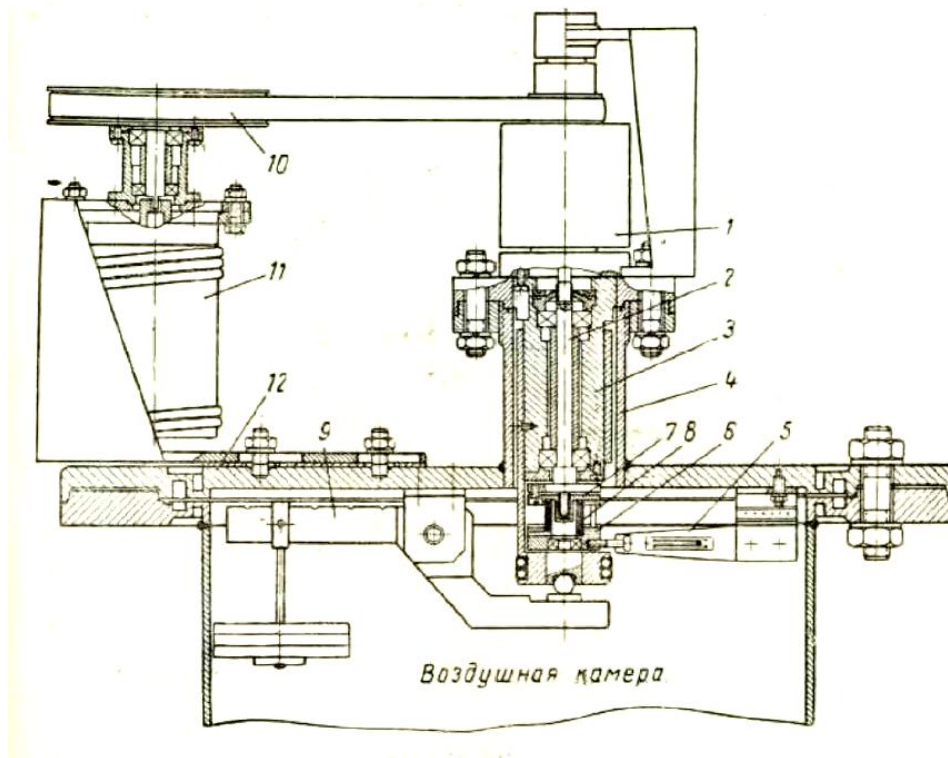


Рисунок – Робочий вузол машини І47 В2

Машина тертя дозволяє проводити випробування матеріалів у діапазоні швидкостей від 200 до 10 000 об/хв при тиску від 0,1 до 0,5 МПа.

*Пальчастий прилад тертя Анічкова й Єлина* (по класифікації Й, 1, б) показаний на рис.. Випробувана пара тертя являє собою три пальчики, укладені в кільце 5 (один з випробуваних пальчиків позначений цифрою 4). Пальчики притискаються до еталонного диска 3 шайбою 6, на яку діє навантаження, створювана важільною системою. Диск, що приводиться від вала 1, укладений у чаші для охолодження 2, у якій збирається змащення. Діаметр диска 200- 300 мм. Звичайний діаметр зразка (пальчика), що третється торцем, 10 мм; швидкість ковзання змінюється до 20 м/сек. Змащення здійснюється за допомогою подачі її краплями до центра диска. Зношування визначається зважуванням зразків на аналітичних вагах.

Наявні пристосування дозволяють прохолоджувати або нагрівати до 200° С поверхню диска. Машина АЕ-5 є однією з найбільш зручних для оцінки матеріалів в умовах граничної тертя.

Користуючись нею, можна виявляти максимальне навантаження при заїданні, якості мастильних матеріалів і ін. Зразок з випробуваного матеріалу рухається по гвинтовій лінії, причому радіальна подача на один оборот диска дорівнює 1 мм.

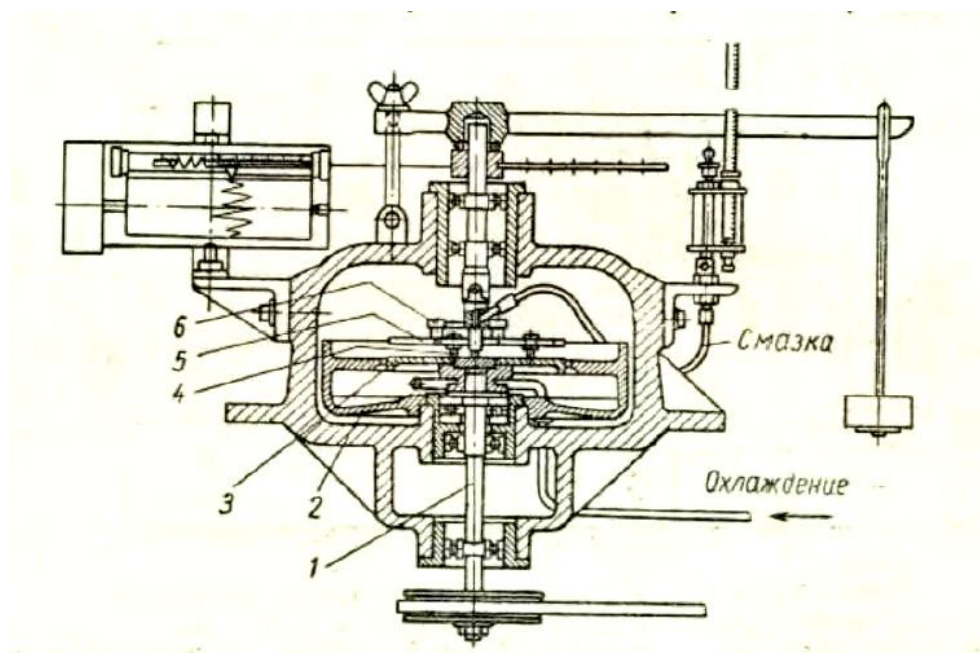
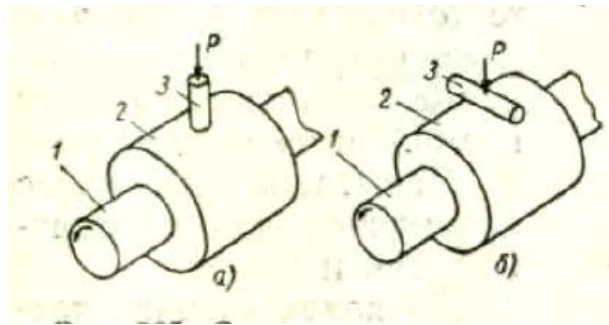


Рисунок – Пальчастий прилад тертя АЕ-5

Пальчикова машина Арчарда (по класифікації Й, 2, б). Арчард застосував дві схеми тертя циліндричного зразка по кільцю (мал.). Циліндричний зразок (діаметром 6 мм) притискається торцем або утворюючим обертовим валом



1-обертвий вал, 2 – кільце, 3 – циліндричний зразок

Рисунок – Схеми тертя циліндричного зразка по валу в машині Арчарда

Змінюючи в широкому діапазоні навантаження  $p$ , швидкість і подаючи змащення або працюючи без змащення, вдається відтворити різні види зношування. Зношування визначається зважуванням зразків або лінійним виміром. Крім того, вимірюється сумарне зношування за допомогою голки профілографа, що встановлюють зверху випробуваного зразка. Перевагою установки є її виняткова простота й можливість контролювання площі торкання.

Установка Амслера (по класифікації 1,2,6) марки МІ-1м призначена для випробування на зношування підшипникових матеріалів (рис. 206).

Випробування виконують у двох варіантах: у першому на двох притиснутих один до іншого роликів, що обертаються з постійним числом оборотів; у другому - на обертовому ролик, до якого в притискається вкладиш. Діаметр ролика  $d = 40$  мм, число оборотів 200 у хвилину. Вкладиш має ширину 10 мм і розмір по хорді 20 мм. Навантаження на ролик або вкладиш можуть бути змінені в межах від 20 до 200 кг.

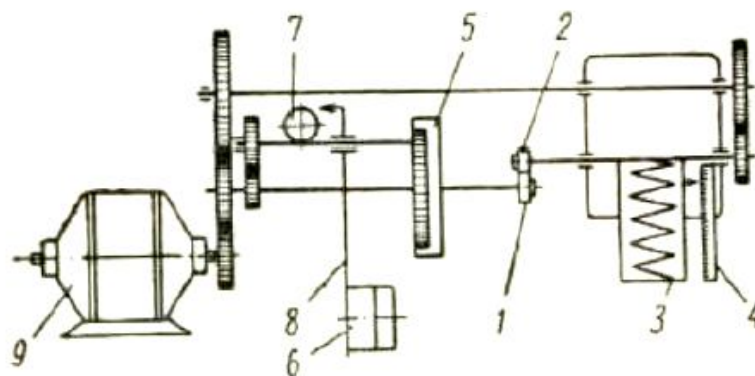


Рисунок – Схема машини Амслера

Випробувані зразки 1 і 2 приводяться в рух від електродвигуна 9 потужністю 1 л. с. Навантаження на зразок створюються пружиною 3, величина якої визначається по шкалі 4. Момент тертя замірюється важелем 8 зі змінним вантажем 6. Величина моменту тертя записується на барабан 7. Передача руху виробляється шестірнею 5.

Верхня каретка може робити коливальні рухи уздовж осі з амплітудою 8 мм. На машині є ексцентрик, що дозволяє періодично змінювати навантаження на зразки. Момент тертя вимірюється маятником, на якому можна міняти вантажі.

Істотним недоліком машини є її мала швидкість ковзання (до 0,4 м/с), відсутність пристрою для самоцентрування зразка і його підігріву або можливості охолодження.

Випробування на зношування проводяться як зі змащенням, так і без нього.

Дискова машина тертя Барвелла й Стронга (по класифікації Й, 1, б) (рис.) складається з диска 1, що рухається, нерухливого зразка 2, вантажів 3, що створюють навантаження, і мікроскопа 4.

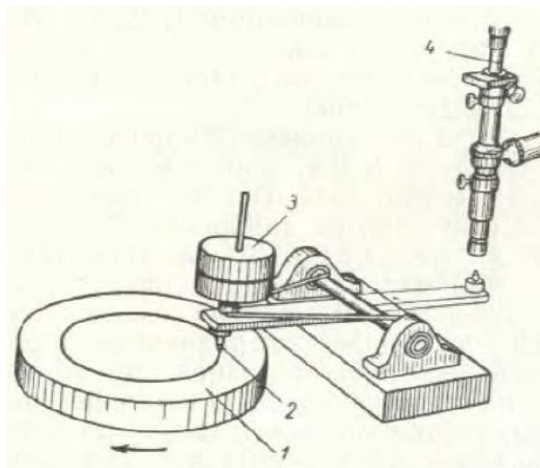


Рисунок - Дискова машина тертя Барвелла й Стронга

Для визначення величини зношування важіль з нерухомим зразком перекидається в положення, показане штриховою лінією. Зразки виготовляються у вигляді циліндрів або усечених конусів. Мінімальна величина сумарного лінійного зношування, що може бути обмірювана мікроскопом, становить  $10^{-6}$  см.

Швидкість змінюється в широкому діапазоні за допомогою східчастої передачі. Крім того, швидкість можна змінювати установкою зразків на різних радіусах, для чого в голівці є відповідні пази. У середині диска, для його охолодження, підводиться вода. Для змащення поверхні диска є спеціальне дозувальне пристосування. Висока точність виміру зношування дозволяє вести короткочасні випробування.

Машина Л ТС1 (рис) призначається для випробувань різних антифрикційних матеріалів, зокрема на ній виробляються й випробування підшипників із пластмас.

Як випробуваний зразок прийнятий вкладиш 7, що для кращого самовстановлення на валу опирається на призму 10 і кульки, що вільно лежать у чашці. У машині передбачений регульовальний пристрій 9.

На робочу конусну шийку вала 4 надівається змінне (для зручності ремонту) кільце 6, зафіксоване на валу гайками. До цього кільця притискається випробуваний вкладиш. Кільце знаходиться посередині вала між двома опорами 5, вмонтованими в корпус П-подібної каретки 3. Каретка вільно висить на чотирьох консольних, прикріплених до

кронштейна 1, плоских пружинах 2 і має можливість вертикально переміщатися на незначну величину.

Вал 4 обертається від мотор-ваг 12 постійного струму. Неспіввісність робочого вала 4 і вали мотор-ваг 12 компенсується сполучною муфтою 11. Випробуваний підшипник навантажується через важіль 13 і тягу.

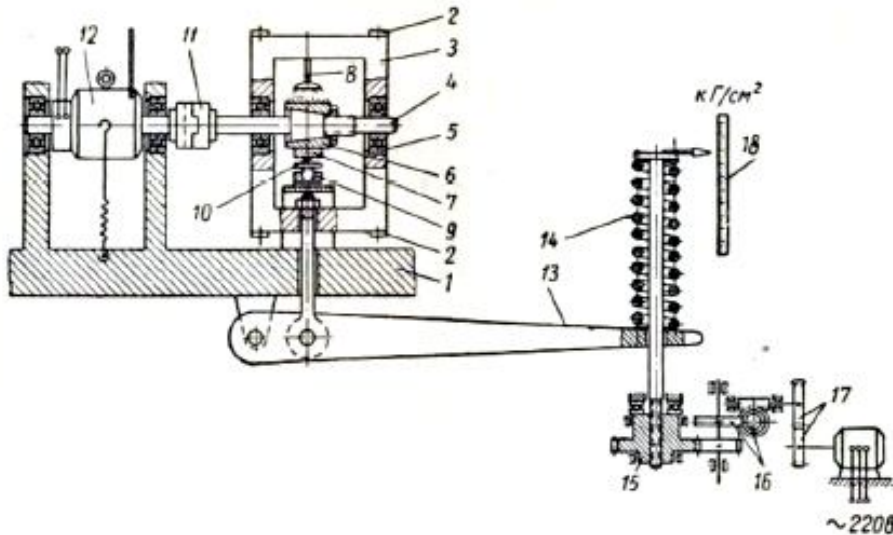


Рисунок – Машина ЛТС 1

Сила створюється за рахунок стиску пружини 14, що давить на кінець важеля. Стиск пружини здійснюється поступальним переміщенням пов'язаного із пружиною гвинта при обертанні зубчастого колеса 15. Повільне обертання зубчастому колесу повідомляється через триступінчастий комбінований черв'ячно-циліндричний редуктор і пару змінних шестірень 17 від електродвигуна змінного струму. Змінними шестірнями може бути отримано кілька швидкостей навантаження підшипників. Щоб скоротити час, необхідний для розвантаження підшипника, і збільшити швидкість переміщення гвинта, поставлено додатковий електродвигун (на схемі не показаний), що з'єднується з валом другої черв'ячної пари 16. Момент тертя на валу визначається по шкалі, при відхиленні стрілки, закріпленої на статорі мотор-ваг.

Для виключення із загальної величини крутного моменту на валу мотор-ваг величини моменту на корінних підшипниках кочення виконується тарування останніх. Для цього на машині встановлюється спеціальний тарувальний валик із чотирма однаковими роликпідшипниками (того ж розміру, що й корінні). Кожний із цих підшипників із силою, такий же, як і при нормальній роботі машини. Половина заміряного моменту буде дорівнює моменту на корінних підшипниках, що при підрахунках коефіцієнта тертя випробуваного підшипника повинен відніматися від загального моменту тертя.

Тарування пружини для нанесення шкали 18 навантаження підшипника виробляється за допомогою кільцевого динамометра (сталевого кільця з індикатором). Динамометр установлюється замість випробуваного підшипника й навантажується щаблями. На кожному щаблі навантаження фіксується відповідна величина стиску пружини, тобто положення стрілки на шкалі.

Випробуваний вкладиш покривається змащенням, що надходить струменем із системи, що зрошує, 8 на відкриту частину вала.

Випробування виконуються в такий спосіб. Вкладиш ставиться на випробування (без попереднього приробляння) при певній швидкості навантаження (для пластмас була прийнята швидкість навантаження 1,5 МПа/хв). Досвід триває, поки момент тертя на мотор-вагах різко зростає; при величині моменту, рівній 3,6 Нм, машина вимикається. Потім досвід повторюється ще 2 рази. Найбільше навантаження, отримане в трьох досвідах, вважається граничною вантажопідйомністю. Однак робоче навантаження для підшипника вибирається трохи менше й перевіряється при більше тривалих випробуваннях на сталому режимі. При випробуванні підшипника фіксуються показання стрілки мотор-ваг, навантаження на підшипник, температура вхідного масла, число оборотів. Після кожного випробування поверхні вкладиша й цапфи оглядаються.

## МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЗНОСУ

Для визначення величини зношування матеріалу й розподілу зношування по поверхні тертя застосовуються різні методи.

Найпоширенішим є метод визначення лінійного зношування. Вимірюючи розміри елементів пари тертя до й після випробування й визначаючи різницю лінійних розмірів, судять про величину лінійного зношування. Для виміру лінійних розмірів користуються мікрометрами, контактними приладами з індуктивними або дрововими датчиками й безконтактними із пневматичними датчиками. При спільному вимірі зношування пари тертя досить зручним є зміцнення на одній із випробовуваних деталей голки профілографа, яка записує величину зносу в часі. Доцільно лінійне зношування виражати в безрозмірних одиницях. Зношування можна визначати по втраті у вазі, але вагарний спосіб визначення зношування є інтегральним, тому що фактично визначається сумарна втрата ваги по всій поверхні тертя. Вагове зношування неважко виражають у мг/км шляху. Краще виражати його в г/см<sup>3</sup>. Тоді досить полегшується перехід від лінійного зношування до вагового:

$$I_g = I_h \gamma$$

де  $\gamma$  - питома вага.

Для визначенні величини зношування найбільш широко застосовуються вимірювальні інструменти, мікрометри, мікрометричні нутроміри, індикаторні прилади. Погрішності виміру цих інструментів, якщо величина зношування невелика, бувають відносно великими, а часом і порівнянними з величиною зношування.

### Метод штучних баз

В основі цього способу лежить проста ідея: визначити кількісну величину лінійного зношування по зміні розмірів поглиблення, що звужується, профіль якого відомий зробленого на зношувальній поверхні. Геометрична форма цього поглиблення повинна мати вісь, нормальну до поверхні тертя, уздовж якого слід відраховувати місцеве лінійне зношування.

Такими поглибленнями можуть бути виділений відбиток у формі піраміди або конуса, висвердлене конічне поглиблення, вирізана, витерта або вишліфувана лунка тієї або іншої форми. Всі ці методи визначення зношування об'єднані під загальною назвою - метод штучних баз, що містить у собі метод відбитків, метод вирізаних лунок та ін.

**Метод відбитків** полягає в тому, що штучна база створюється шляхом вдавнення алмазної піраміди, що служить для виміру твердості, або якого-небудь іншого індентора в поверхню, зношування якої треба замірити.

Звичайно в якості індентора застосовується алмазна піраміда з квадратною основою й двограним кутом при вершині, рівним  $136^\circ$ .

Величина лінійного зношування для відбитка квадратної піраміди на плоскій поверхні пластичного матеріалу:

$$\Delta h = h_1 - h_2 = (d_1 - d_2) / m$$

де  $h_1$  та  $h_2$  - глибина відбитка до й після випробування;

$m$  - коефіцієнт пропорційності;

$d_1, d_2$  - довжина діагоналі до і після випробування.

При  $\alpha = 136^\circ$   $m = 7$ , тому  $\Delta h = (d_1 - d_2) / 7$

Досвід показує, що для точного визначення зношування слід вимірювати діагональ, розташовану перпендикулярно до напрямку ковзання, тому що риски, що утворюються на поверхні тертя, можуть утруднити визначення положення кінця діагоналі. Тому при обертovому русі вала слід вимірювати діагональ, розташовану уздовж твірної, у цьому випадку величина зношування визначається так само, як для плоских зразків. При поступальному русі плунжера відносно циліндра слід вимірювати діагональ, розташовану перпендикулярно твірній, тобто уздовж окружності. У цьому випадку з урахуванням кривизни циліндра  $\Delta h = (d_1^2 - d_2^2) / 8R$

Для відбитка на опуклій циліндричній поверхні

$$\Delta h = (d_1 - d_2) / 7 + (d_1^2 - d_2^2) / 8R$$

**Метод накернених відбитків** полягає в тому, що на поверхні, зношування якої слід визначити, ударом молотка або спеціального інструмента роблять відбиток за допомогою конічного керна ( $\alpha = 120^\circ \dots 140^\circ$ ), що є індентором. Неперпендикулярність осі керна до досліджуваної поверхні служить основним джерелом можливої неточності цього методу, особливо, якщо kern або ударний інструмент утримується від руки. Застосування напрямних втулок дозволяє уникнути цієї неточності.

Алмаз у якості індентора тут не придатний через небезпеку руйнування його при ударі, можливості відколу його вістря в результаті неточності напрямку, а також труднощі додання алмазу правильної конічної форми. Як матеріал індентора рекомендується застосовувати загартовану сталь.

Цей метод невільний від недоліків, властивих раніше описаному способу.

Величина зношування  $\Delta h = c \Delta d$  де  $c = 0,5 \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha/2)$ ;  $\Delta d$  - зміна діаметра відбитка.



**Метод вирізаних лунок** знайшов широке застосування при дослідженні зношування різних пар тертя. Принципово він відрізняється від раніше описаних способів лише тим, що база на досліджувану поверхню наноситься за допомогою різця, що має форму тригранної піраміди.

У методі вирізаних лунок особливо важливим є розташування вимірюваного параметра лунки щодо напрямку ковзання. При цьому слід керуватися правилом, викладеним у методі відбитків.

Крім основних недоліків, які можуть бути віднесені до методу штучних баз (місцеве спучування й відхилення лунок і відбитків від справжньої форми), існує ще досить висока трудомісткість (тривалість випробування вимірюється сотнями й тисячами годин), а також необхідність створення механізмів для виміру величини зношування.

**Метод радіоактивних індикаторів.** Цей метод дозволяє вести безперервний контроль за зношуванням кута тертя в процесі його роботи, не роблячи розбирання досліджуваного вузла машини. Для вивчення зношування деталей при допомозі цього способу необхідно активізувати матеріал деталей, т. е, тим або іншим шляхом увести в них певний радіоактивний елемент, що надалі буде служити індикатором величини зношування.

Відомі й застосовуються наступні методи активуванні

1. Введення радіоактивного ізотопу в метал при плавці.
2. Нанесення радіоактивного електролітичного покриття.
3. Активування в процесі дифузії.
4. Установка радіоактивних вставок.
5. Опромінення нейтронами.

Вибір того або іншого методу оцінки величини зношування залежить від умов експерименту.

Визначення швидкості зношування методом радіоактивних ізотопів дозволяє вивчати процес зношування в динаміці. При цьому в досліджуваній матеріал деталі, зношування якої хочуть вивчити, вводиться радіоактивний ізотоп. У міру зношування разом з продуктами зносу попадає пропорційна їм кількість атомів радіоактивного ізотопу. По інтенсивності випромінювання цього ізотопу в пробі масла можна судити про кількість металу, що потрапив у масло за певний період часу.

Якщо є готова деталь, то її зношування можна вивчити, запресовуючи нормально до поверхні тертя вставки у вигляді дроту невеликого діаметра зі сплаву, що містить радіоактивний ізотоп. При наявності готової деталі її можна зробити радіоактивною шляхом опромінення а ядерному реакторі. Якщо використовуються деталі, на поверхні тертя яких є спеціальні покриття, то в матеріал покриття вводиться радіоактивний ізотоп.

Досить зручним є вимір зносу за допомогою запресовування на певній глибині радіоактивного джерела.

Про величині зношування судять по зміні інтенсивності потоку радіоактивних частинок, що досягають поверхні. Цей метод із застосуванням радіоактивного талію виявився

досить зручним для виміру зносу шин. Методика ця була розроблена науково-дослідним інститутом шинної промисловості й відрізняється великою чутливістю.