## Лекція 13

# МЕТОДИ І ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ

План
13.1. Методи вимірювання зношування поверхонь тертя
13.2. Класифікація лабораторних машин для випробування матеріалів на зношування
13.3. Методи вимірювання зовнішніх параметрів тертя

## 13.1. Методи вимірювання зношування поверхонь тертя

### *13.1.1. Класифікація методів вимірювання зношування*

Існують різні методи вимірювання зношування від найпростіших, коли звичайними засобами вимірюють розміри деталей, що зношуються, до методів, які використовують в ядерно-фізичних процесах.

Область застосування тих чи інших методів вимірювання зношування визначають: поставлену мету досліджень, необхідну точність вимірювань, можливість вимірювання малого зношення, час, необхідний для вимірювання зношування, можливість вимірювання зношування в умовах експлуатації без розбирання, а в ряді випадків – без зупинки машини, затратами часу і засобами, необхідними для всього циклу підготовки.

Для вимірювання зношування можна застосовувати як інтегральні, так і диференційні методи оцінювання. В ряді випадків застосовують також методи оцінювання зношування за вихідними параметрами виробу чи спряження.

В свою чергу інтегральні методи вимірювання зношення поділяють на: А – методи вимірювання, що базуються на оцінюванні сумарного зносу; і Б – методи вимірювання, що базуються на аналізі продуктів зношування у змащувальному середовищі.

До різновидностей методу А – вимірювання, що базуються на оцінюванні сумарного зносу, відносять:

– за зміною маси зразка;
– за зміною об’єму зразка;
– за заміром зазору в спряженні.

До різновидностей методів вимірювання, що базуються на аналізі продуктів зношування в змащувальному середовищі, відносять спектральний аналіз і дослідження за допомогою радіоактивних ізотопів.

Диференційні методи дозволяють визначати розподіл зношування по всій поверхні тертя і оцінити вплив нерівномірності зношування на вихідні параметри виробу.

Диференційні методи поділяють на методи вимірювання, що базується на мікрометрії, метод штучних баз і метод поверхневої активації.

До методу вимірювання, що базується на мікрометрії, відносять:

– вимірювання розмірів;
– профілографування.

Різновидами методу штучних баз є такі:

– метод відбитка;

– метод лунок;

– метод зліпка.

До різновидів методу поверхневої активації відносять:

– метод активації частини ділянки;

– застосування вставок.

Методи вимірювання вихідних параметрів спряження поділяють за вимірюванням:

– коефіцієнта тертя;

– витрати мастила;

– температури.

Вимірювання величини зношування за зменшенням ваги чи об'єму деталі застосовують, як правило, при дослідженні зразків. Цей метод малопридатний для більшості деталей машин.

Оцінювання зношування за зміною вихідних параметрів спряження дає лише побічну уяву про величину зношування.

Розглянемо основні методи, які застосовують для вимірювання зношування поверхонь тертя при роботі різних спряжень в умовах їх експлуатації або випробувань.

### *13.1.2. Визначення зношування за вмістом продуктів зношування в змащувальному матеріалі*

Даний метод ще називають методом визначення вмісту заліза, його окислів та інших домішок у змащувальному матеріалі. Він базується на взятті проби у відпрацьованому мастилі, де накопичились продукти зношування, що являють собою металічні частинки, оксиди металів і продукти хімічної взаємодії металів з активними компонентами мастила.

Перевага даного методу в тому, що він дозволяє уникнути розбирання агрегатів і вузлів. Метод застосовують у лабораторних умовах і при експлуатації для вимірювання інтегрального зношування. Точність методу характеризується чутливістю приладів до вмісту металічних домішок у мастилі, який складає $10^{-6}$-$10^{-8}$ г в $см^3$ мастила. Лінійне зношування даним методом оцінити важко.

При відборі проби необхідно, щоб вона характеризувала середній вміст продуктів зношування в мастилі. Наприклад, при взятті проби з картера двигуна масло зливають і ретельно перемішують.

Для аналізу проб мастила на вміст заліза та інших складових застосовують різні методи.

***Хімічний аналіз*** базується на визначенні вмісту заліза, інших продуктів зношування в попелі спаленої масляної проби.

***Спектральний метод*** базується на визначенні вмісту механічних домішок в мастилі з допомогою спектрального складу полум'я при спалюванні проби мастила. Метод досить складний, довготривалий і дорогий.

***Радіометричний метод*** базується на вимірюванні радіоактивності продуктів

зношування, які містяться в мастилі. Продукти зношення накопичуються у фільтрі в результаті зношування радіоактивних деталей. *Радіоактивність деталей* створюється введенням радіоактивних ізотопів у розплавлений матеріал або з допомогою покриття деталей радіоактивним шаром.

***Активаційний аналіз*** має спільні риси зі спектральним і радіометричнимметодами. Вміст продуктів зношування в мастилі визначається за їх радіоактивністю з допомогою аналізу спектрів гамма-випромінювання після опромінення взятої проби нейтронами. При використанні методу активаційного аналізу радіаційна небезпека відсутня.

### *13.1.3. Метод мікрометричних вимірювань*

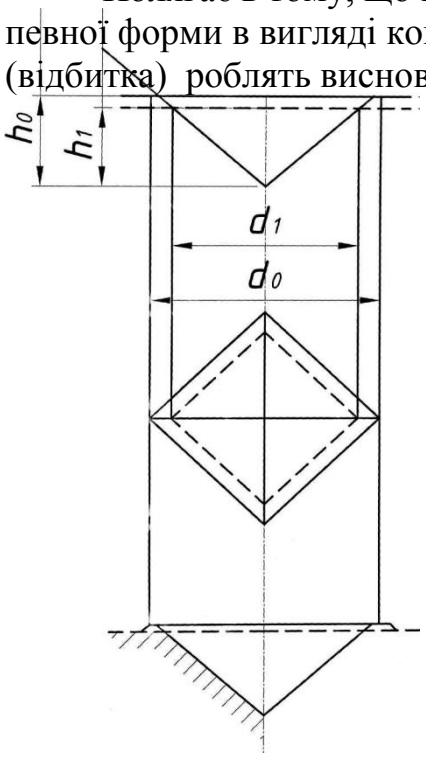
Базується на вимірюванні деталі до і після зношування з допомогою мікрометра, індикатора чи інших приладів, точність яких знаходиться в межах 1 – 10 мкм.

У більшості випадків для вимірювання зношування можна застосовувати ті ж універсальні і спеціальні засоби, які використовуються для контролю точності даної поверхні при її виготовленні.

Недоліком даного методу є те, що ним неможливо вимірювати зношування в процесі роботи машини.

### *13.1.4. Метод штучних баз*

Полягає в тому, що на поверхню, яка зношується, наносять заглиблення лише певної форми в вигляді конуса, піраміди і т.п. За зменшенням розмірів заглиблення (відбитка) роблять висновок про величину зношення.




Застосовують різні варіанти даного методу.

***Метод відбитків*** (рисунок 13.1). Для утворення заглиблення застосовують алмазну чотиригранну піраміду з квадратною основою і кутом 136° при вершині між протилежними гранями. Таку піраміду використовують у приладах для визначення мікротвердості (ПМТ-3 і Віккерс). Піраміду тиску під навантаженням у поверхню і заміряють діагональ відбитка. Після зношування розмір відбитка зменшується ($d_1$) і за різницею ($d_0$-$d_1$) роблять висновок про величину зношування $U=h_0-h_1$. Діагоналі вимірюють з допомогою оптичного вимірювального засобу через мікроскоп.

***Рисунок 13.1. Метод відбитків***

Даний метод має ряд недоліків. По-перше, при втискуванні піраміди навколо відбитка відбувається спучування матеріалу, в результаті чого спотворюється форма відбитка. По-друге, після зняття навантаження відбувається деяке

відновлення заглиблення.

Спучування знімають поліруванням. Пружного відновлення відбитка уникнути не вдається.

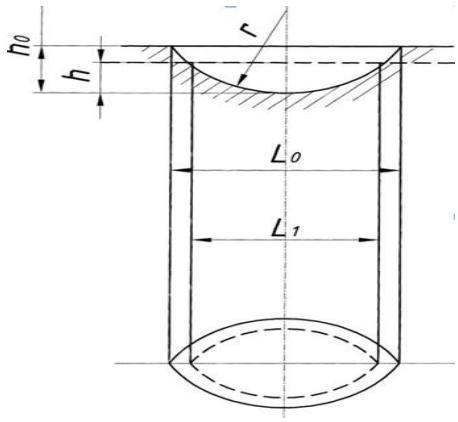



***Рисунок 13.2. Метод лунок***

Широкого застосування набув метод, який запропонували проф. М.М. Хрущов і Е.С. Беркович, його називають ***методом вирізаних лунок.***

Цей метод полягає в тому, що на досліджуваній поверхні різцем, який обертається, виготовляють лунку (рисунок 13.2). За зменшенням її розмірів при зношуванні роблять висновок про величину місцевого зношування.

Метод лунок має ряд переваг порівняно з методом відбитків. За цим методом втискування індентора замінене на виготовлення лунки різанням, унаслідок чого явища спучування мета лу і пружного відновлення зведені до мінімуму.

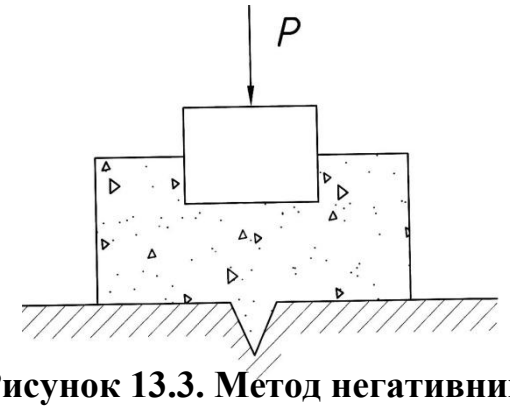



**Рисунок 13.3. Метод негативних відбитків**

При ускладненні вимірювання зношування безпосередньо на деталі застосовують ***метод негативних відбитків*** (рис. 13.3).

На поверхню наносять заглиблення (відбиток чи спеціальну риску). Потім з неї знімають зліпок за допомогою самотвердіючої маси або пластмаси. Висоту відбитка заміряють звичайними методами і порівнюють з розмірами, отриманими після зношення.

### *13.1.5. Метод поверхневої активації*

Метод базується на вимірюваннях зниження радіоактивності при зношуванні.

На деталі на заданій ділянці створюють радіоактивний об'єм глибиною 0,05-0,4мм шляхом опромінення зарядженими частинками (дейтронами, протонами, -частинками).

Величину зношення визначають за допомогою градуювального графіка шляхом порівняння зниження радіоактивності деталі зі зниженням радіоактивності зразка.

Метод поверхневої активації призначений для контролю зношування деталі у стендових і експлуатаційних випробуваннях без розбирання і зупинки машини.

## 13.2. Класифікація лабораторних машин для випробування матеріалів на зношування

У першій половині XX століття А.К.Зайцев розробив і запропонував найбільш загальну і раціональну класифікацію лабораторних машин для вимірювання матеріалів на зношування. Відповідно до цієї класифікації всі лабораторні машини для вимірювання матеріалів на зношування поділяють на шість категорій.

***Машини I категорії*** – це машини з найбільш точними вимірювання. Вони реєструють параметри, які дають можливість слідкувати за ходом процесу зношування і за величинами параметрів процесу.

У цих машинах обов'язково вимірюють і реєструють силу тертя, температуру поверхонь тертя, частоту обертання і роботу тертя. Величину зносу визначають точним вимірюванням або зважуванням до і після кожного досліду.

***Машини II категорії*** – простіші, але досконаліші лабораторні машини для випробування матеріалів на зношування при певному його виді. Умови досліджень вибирають, виходячи з умов роботи матеріалів у конкретних вузлах тертя.

***Машини III категорії*** – машини для швидкого і простого контролю заводської продукції.

***Машини IV категорії*** – спеціалізовані машини, які імітують умови роботи матеріалів у машинах.

***Машини V категорії*** – машини для випробування на зношування готових деталей.

***Машини VI категорії*** – стенди для випробувань на якість роботи і на зношення готових машин.

## 13.3. Методи вимірювання зовнішніх параметрів тертя

В установках, призначених для вивчених фрикційних властивостей матеріалів, використовують різноманітні методи визначення сили тертя, швидкості ковзання і температури.

### *13.3.1. Вимірювання сили тертя*

Широкого розповсюдження набули динамічний (пружинний) і маятниковий методи вимірювання сили тертя.

У сучасних лабораторних установках використовують динамометри високої жорсткості з електричними тензорезисторними силовимірювачами (рис. 12.4). Вони являють собою дротяні датчики, наклеєні на пружний елемент вимірювача (як правило, на стальну консольну балку, так звану тензобалку або кільце).

Дротяні перетворювачі й тензометри на їх основі мають такі переваги: малу інерційність, можливість автоматичної реєстрації показників, високу чутливість, дистанційність вимірювань. Недоліком тензодатчиків є залежністьпоказників від температури, бо нагрівання змінює опір перетворювачів. Найпоширенішою стала схема, в якій дротяний (робочий) перетворювач вмикається в одне плече моста, а неробочий перетворювач (аналогічний робочому) – у сусіднє плече. Внаслідок цього температурна похибка вимірювання значно зменшується. Обидва перетворювачі наклеюють на такий же метал, як і вимірювальне (тензометричне) стальне кільце, або на балку
(рис. 13.4).

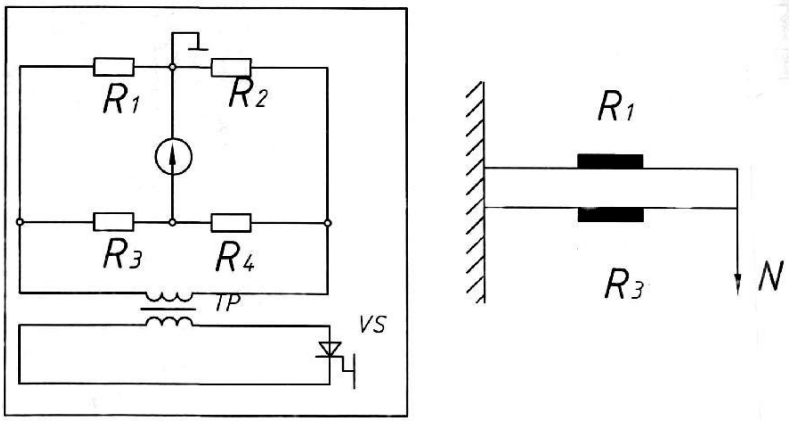



***Рисунок 13.4. Схема тензометричного моста для вимірювання сил тертя***

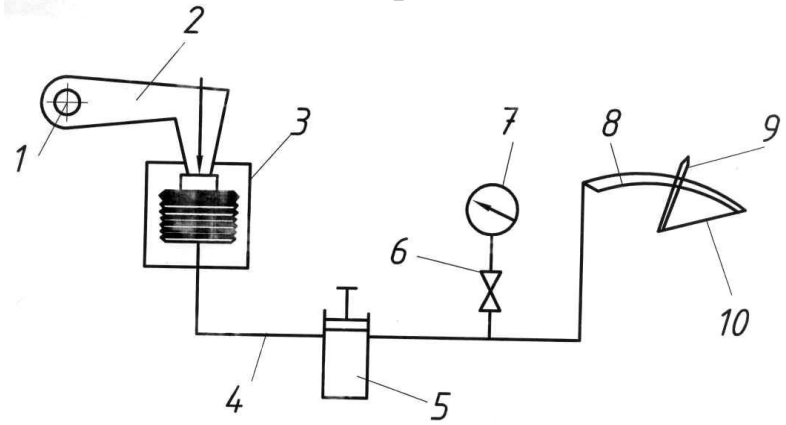



***Рисунок 13.5. Манометрична схема вимірювання моменту тертя: 1 – вал; 2 – важіль; 3 – мездоза; 4 – трубопровід; 5 – порошковий компенсатор; 6 – вентиль; 7 – манометр; 8 – трубка Бурдона; 9 – перо самописця; 10 – пружина***

При вимірюванні моменту тертя поряд із тензометричними системами застосовують гідродинамічні (манометричні). Манометричну схему вимірювання моменту тертя зображено на рис.13.5.

### *13.3.2. Вимірювання температури*

Безпосереднє вимірювання температури, як фізичної величини, є неможливим. У зв'язку з цим визначення температури здійснюється завдяки її перетворенню в іншу фізичну величину, яка піддається кількісному оцінцюванню.

У практиці вимірювання температур поверхонь, що труться, найбільшого поширення набули контактні термоприймачі (термопари).

Найбільш застосувують ***штучні термопари.*** В них термометричним параметром є термоелектрорушійна сила (ЕРС).

Термопари вимірюють температуру в діапазоні від -100 до 2500°С з точністю ±(0,1 ... 25°С).

Одним із недоліків таких термопар є їх інерційність, на яку впливає матеріал термоприймача, його форма і розміри.

Зі зменшенням розмірів гарячого спаю термопари точність вимірювань підвищується.

Суттєвим недоліком штучних термопар є те, що вони не дозволяють замірювати температуру безпосередньо поверхонь тертя.

В літературі є дані, що хромель-алюмелева термопара здатна реєструвати зміну температури в тисячні долі секунди.

Практично безінерційною є природна термопара. Це забезпечується тим, що її спай нагрівається від джерела, яке знаходиться в самому спаї. Електродами такої термопари є самі елементи пари тертя. Недоліком природної термопари є складне її градуювання, яке здійснюється штучною термопарою. Використання природної термопари можливо у випадку, коли контурна площа контакту близька до номінальної.

Похибки вимірювань можуть бути викликані стрибками струмів, які зумовлені спалахами температур і порушенням контакту при ковзанні.

Для визначення температур біля поверхні тертя, а також температурних градієнтів у тонших об'ємах матеріалу, ніж у випадку штучної термопари, застосовують метод напівштучної термопари. Вона немає постійного гарячого спаю. За даним методом термоелектрорушійна сила заміряється між одним з елементів пари тертя і привареним до нього електродом, виготовленим з іншого матеріалу.

Недоліком даного методу, як і методу природної термопари, є складність градуювання можливість вимірювання температури тільки металевих матеріалів.

Для вимірювання температур використовують також і термометри опору. Орієнтовно про температуру тертя можна зробити висновок за допомогою легкоплавких індикаторів температури, кольорів мінливості,термофарб.

Професор Б.І. Костецький розробив структурний метод дослідження температур при терті. Суть його полягає в тому, що про величину температури роблять висновок за структурними змінами і мікротвердістю матеріалів.

Перспективним напрямком розвитку методів вимірювання температури при терті є використання апаратури, принцип роботи якої базується на реєстрації теплового випромінювання нагрітих поверхонь. Основною перевагою даного методу є дуже низька інерційність. Постійна часу сучасних фотоопорів, які

використовують у ролі перетворювачів, дорівнює $10^{-6}$ ... $10^{-7}$ с.

Вперше температуру тертя за інфрачервоним випромінюванням зареєстрував Ф.П. Боуден. Інтенсивність випромінювання замірювали здопомогою сірчано-свинцевого фотоелемента. Зразок, що обертався, був виготовлений з прозорого матеріалу.

***Термовізуальний метод*** вимірювання температур при терті. Суть методу полягає в реєстрації інфрачервоного випромінювання об'єкта дослідження і наступному перетворенні випромінювання в електричні сигнали чи у видиме зображення. В процесі променевого теплообміну беруть участь лише тонкі поверхневі шари. Для провідників така товщина шарів має порядок 1 мкм. Тому теплове випромінювання для твердих тіл можна розглядати як поверхневе явище.

Блок-схема тепловізора зображена на рисунку 13.6. Тепловізійна установка складається з оптичної головки і відеоконтрольного пристрою амплітудного індикатора й індикатора яскравості. Інфрачервоне випромінювання поверхні тертя системи дзеркал оптичної установки фокусується на чутливий шар фотоприймача (фотоопору), який перетворює інфрачервоне випромінювання в електричні сигнали.

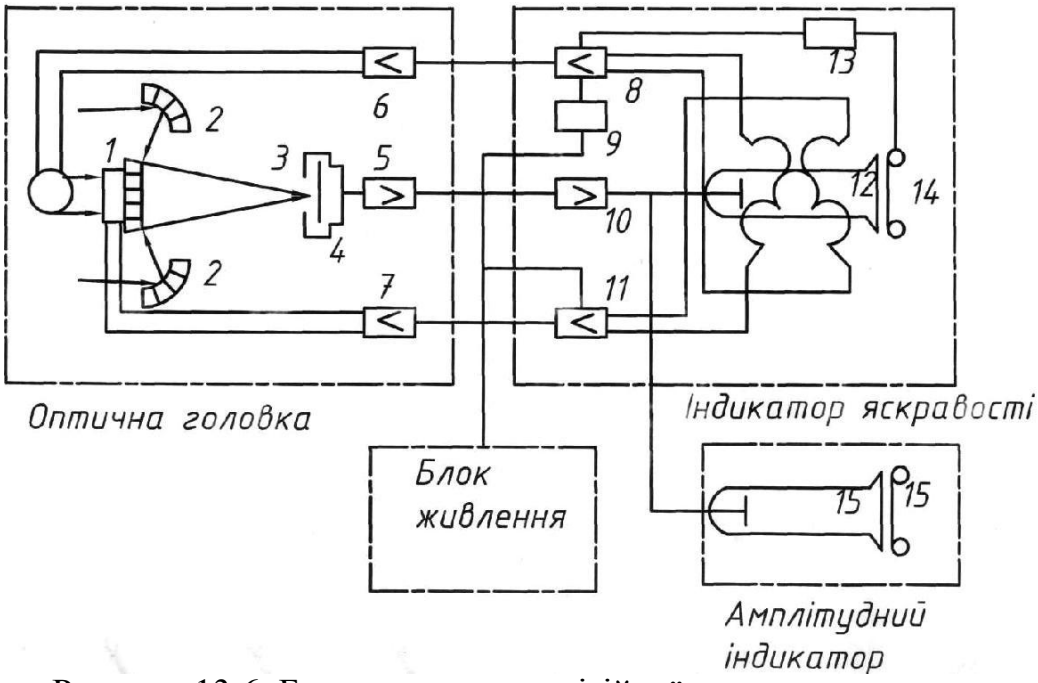



Рисунок 13.6. Блок-схема тепловізійної установки:

***1 – плоске дзеркало; 2 – параболічне дзеркало; 3 – фотоопір; 4 – охолоджувальний пристрій (рідкий азот); 5 – попередній підсилювач; 6 – скануючий пристрій по кадрах; 7 – скануючий пристрій по рядках; 8 – генератор кадрової розгортки; 9 – вузол формування і змішування рядкових і кадрових гасячих імпульсів; 10 – відеопідсилювач; 11 – генератор рядкової розгортки; 12 – електронно-променева трубка; 13 – вузол синхронізації роботи затвору фотоапарата; 14, 15 – фотоприставки; 16 – електронно-променева трубка амплітудного індикатора***

Електричні сигнали, підсилені попереднім підсилювачем і

відеопідсилювачем, модулюють яскравість променя електронно-променевої трубки індикатора яскравості. На екрані індикатора яскравості утворюється растр телевізійного типу (теплограма), оптична густина на якій пропорційна інтенсивності інфрачервоного випромінювання ділянки поверхні тертя. Паралельно електричні сигнали надходять на екран амплітудного індикатора, на якому найбільшій інтенсивності випромінювання відповідає максимальне значення амплітуди електричного променя.

Фотоприставки дозволяють проводити синхронну зйомку амплітудного зображення і зображення яскравості. Точне наведення на об'єкт здійснюють фокусуванням оптичної системи приймального пристрою.

### *13.3.3. Дослідження вузлів тертя машин та розроблення рекомендації з підвищення їх надійності на основі методу паспортизації*

Для розроблення ефективних заходів із підвищення надійності пар тертя машин необхідно мати інформацію про найслабші та вразливі вузли, які обмежують надійність машини.

В основу діагностики технічного стану деталей, що труться, покладено метод паспортизації, який базується на оптимізації процесів, що проходять при терті і зношуванні матеріалів. Він дозволяє встановити причинні зв'язки, пояснити протікання цих процесів, класифікувати їх і розробити методи керування ними.

Крім того, паспортизація пар тертя дає можливість отримати повне уявлення про вплив матеріалу деталей, спосіб його обробки, зовнішніх механічних дій, мастила і середовища на якісні й кількісні характеристики зношування деталей машин.

Метод паспортизації застосовують у наукових дослідженнях, розробленні, виробництві, експлуатації та ремонті машин і механізмів.

При проведенні паспортизації складається технічний паспорт вузла тертя. Структура паспорта містить такі групи характерних факторів: стан деталей пар тертя, нових або відремонтованих; умови тертя; протікання процесів зношування і пошкодження; заходи (рекомендації) з підвищення зносостійкості.

Перша група факторів включає дані, які характеризують матеріал і поверхні тертя досліджуваних деталей після їх виготовлення і ремонту.

Основними з них можуть бути:

1. Вид матеріалу (сталі і сплави на основі заліза, кольорові метали і сплави, полімери, неметалічні матеріали).

2. Загальні характеристики матеріалу, його фізичні, хімічні й механічні властивості (границя міцності, границя текучості, твердість, в'язкість, теплопровідність та ін.).

3. Геометричні характеристики деталей (розміри поверхонь тертя, точність, зазори в парі та ін.).

5. Геометрія контакту (площина–площина, циліндр–циліндр, конус–конус, сфера–сфера, гвинт–гайка, площина–конус, циліндр–площина, сфера–площина та

ін.). Види і режими обробки поверхонь (метод механічної обробки, деформаційне зміцнення, електромеханічна обробка, хіміко-термічна обробка та ін.).

6. Характеристика якості поверхонь тертя (шорсткість, мікротвердість, покриття, структура поверхні і матеріалу в січенні).

До цього розділу можна додавати макро- і мікрофотографії поверхонь і структури матеріалу або їх ескізне зображення, дані про мікротвердість поверхонь тертя і перерізу матеріалу, профілограми та ін.

Друга група факторів несе інформацію про режими тертя деталей. В паспорт записують дані, які характеризують:

Характер відносного переміщення (обертальне, поступальне, зворотно-поступальне).

Тип тертя (кочення, ковзання, вертіння, кочення з проковзуванням). Характер навантаження (притискне, постійне, плавно-перемінне, ступінчасте, ударне та ін.).

Режими й умови тертя (діапазон навантаження в контакті, діапазон відносних швидкостей переміщення, діапазон температур).

Вид змащення (без змащення, граничне, напіврідинне, рідинне, тверде покриття).

7. Характер системи змащення (циркуляційна, крапельна, фітільна та ін.).

8. Характер навколишнього середовища (повітря, вакуум, агресивні середовища, абразивне середовище).

Третя група факторів розкриває триботехнічні характеристики вузла тертя, зміну структури і властивостей матеріалів пари тертя.

У паспорт записують дані про тертя та зношування деталей (швидкість зношування, зміну геометрії деталей і поверхонь тертя, шорсткість зношеної поверхні, структурний стан поверхневих шарів матеріалу), встановлюють домінуючий вид зношування поверхонь тертя.

В додатку до даної групи додають фотографії зношених деталей і поверхонь тертя або їх ескізне зображення, мікротвердість поверхневих шарів деталей.

Четверта група містить рекомендації й заходи з підвищення зносостійкості та надійності досліджуваної пари.

Рекомендації можна поділити на такі групи:

- конструктивні (зміна конструкції вузла, матеріалів деталей пари тертя, системи подавання мастила та ін.);
- технологічні (методи і способи механічної обробки, шорсткість поверхонь тертя та ін.);
- експлуатаційні (зміна марки мастила, періодичності заміни фільтрів, рекомендації з регламентного обслуговування та ін.).

В додатку до паспорта наводять графіки, діаграми, таблиці, схеми, фотографії та інше.

Приклад технічного паспорта деталей пар тертя колінчастий вал – вкладки шатуна наведено в таблиці 13.1 двигуна внутрішнього згорання моделі СМД 62.

**Таблиця 13.1**

Технічний паспорт деталей пар тертя колінчастий вал – вкладки двигуна

| **Машина: двигун внутрішнього згорання СМД-62. Вузол тертя – колінчастий вал – шатунна вкладка** | | |
|---|---|---|
| **Показники** | **Деталь I (колінвал)** | **Деталь II (вкладка)** |
| **1. Характеристика деталей** | | |
| Марка матеріалу | Сталь 45 | Смуга сталь–сплав А06-1 |
| Хімічний склад | C – 0,42...0,50%,<br>Si – 0,17...0,37%<br>Mn – 0,50...0,80% | Sn – 5,5...7,0%,<br>Cu – 0,7...1,3%,<br>Si – до 0,3%,<br>Al – решта |
| **Фізико-механічні властивості** | | |
| Тимчасовий опір, НМ/м$^2$ | 610 | 120 - 136 |
| Межа текучості, НМ/м$^2$ | 360 | 46 - 54 |
| Ударна в’язкість, мДж/м | 0,5 | |
| Твердість, НВ | 229 | 40-48 |
| Термічна обробка СВЧ, HRC на глибину, мм | 48-52<br>2,5-3,0 | |
| Температура початку плавлення,$^0$ С | 1350 | 224 |
| Теплопровідність, В/мК | 32 | 180 |
| **Геометричні характеристики** | | |
| Розміри поверхні тертя, мм | Діаметр 85 $_{0.015}$ | Діаметр 85 $^{0.131}$ |
| | Довжина 82 $^{0.14}$ | Довжина 32 |
| Розміри поверхні тертя, мм | Овальність - 0,015 | Непаралельність поверхонь стиків<br>твірної зовнішньої поверхні не більше 0,02 |
| | Конусність - 0,015 | |
| | Корсетність - 0,01 | |
| | Діжеподібність - 0,01 | Неперпендикулярність торців до твірної поверхні не більше 0,45 мм на довжині 90 мм |
| Геометрія контакту | Циліндр–циліндр | |
| **Якість поверхні** | | |
| Шорсткість $R_a$ ,мкм | 0,16-0,18 | 0,63-0,50 |

| | Рисунок 12.7 | Рисунок 12.8 |
|---|---|---|
| Мікротвердість, Н/мм$^2$ | Н=0,981<br>Рисунок 12.9 | Н=0,049 |
| Спосіб кінцевої обробки поверхні | Механічна обробка (шліфування) | |

**2. Характеристика умов тертя**

| | | |
|---|---|---|
| Характер відносного руху | Обертовий | |
| Тип тертя, що реалізується | Ковзання | |
| Характер навантаження | Змінний | |
| Максимальний питомий тиск при номінальній потужності Р, МПа | 34-35 | |
| Швидкість пересування V, м/с:<br>- при номінальній потужності<br>- при максимальній швидкості холостого ходу | 9,35 | 10,15<br>3,56 |
| - при максимальному обертовому моменті | 6,54 – 7,34 | |
| Температура змащувального матеріалу за нормальних умов роботи, °С | 60-80 | |
| Система змащування | Двоконтурна, під тиском передпускового прокачування масла до 0,15 МПа | |
| Змащувальний матеріал:<br>- взимку<br>- влітку | М - 10Г$_2$<br>М - 8Г$_2$ | |
| Тиск масла, МПа:<br>- при нормальних обертах колінвала<br>- при мінімальних обертах | 0,2-0,4<br>Менше 0,12 | |
| Спосіб фільтрації | Повнопоточна центрифуга | |
| Навколишнє середовище | Газове | |
| Ресурс деталей до ремонту, год. | 6000 | 6000 |
| Амортизаційний термін служби деталей, год. | 15600 | 15600 |
| **3. Характеристика зношування і пошкоджування** | | |
| Час роботи вузла,год. | 540 | |

| | | |
|---|---|---|
| Геометрична характеристика зношеної поверхні | Рисунок 12.10 | Рисунок 12.11 |
| Структура поверхні | | |
| Мікротвердість, Н/мм$^2$ | Рисунок 12.12 | |
| Встановлений вид пошкодження поверхні тертя | Гаряче заїдання (схоплення другого роду) | |
| Коефіцієнт тертя (при граничному змащуванні) | 0,06-0,08 | |
| **4. Рекомендовані заходи для підвищення зносостійкості деталей** | | |
| Конструктивні | | Заміна матеріалу вкладки (використання сплавів АМСТ з 5% свинцю) |
| Технологічні | Зміна технології кінцевої обробки шийок (обробку шийок колінвала методом термодифузійного борування проводити гартуванням з відпуском до міцності HRC 56-58) | |
| Експлуатаційні | Заміна змащувального матеріалу М - 10Г$_2$ на масло М-10Г$_{к2}$ або використання змащувального матеріалу з особливо стійкими протизадирними присадками (1,5% радону міді) | |

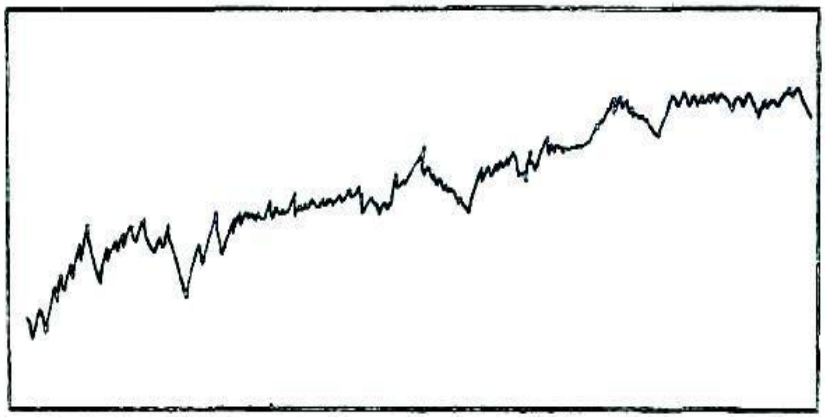


***Рисунок 13.7. Профілограма мікрорельєфу робочої поверхні нової шийки колінчастого вала***

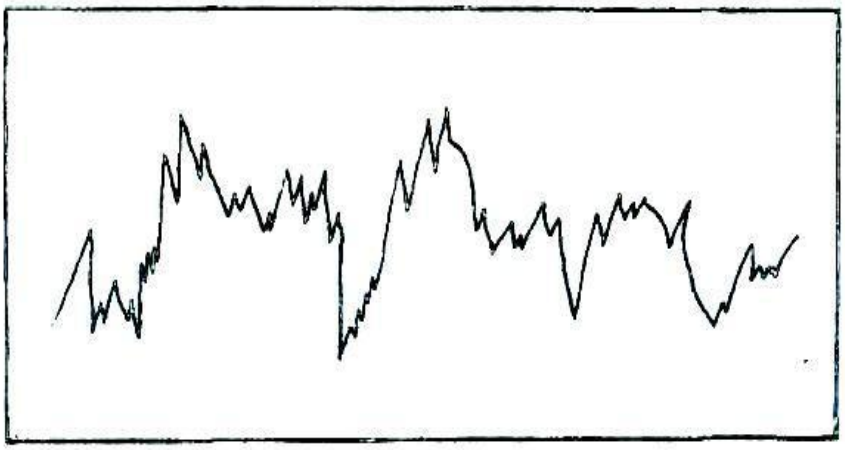


***Рисунок 13.8. Профілограма мікрорельєфу робочої поверхні нової вкладки***

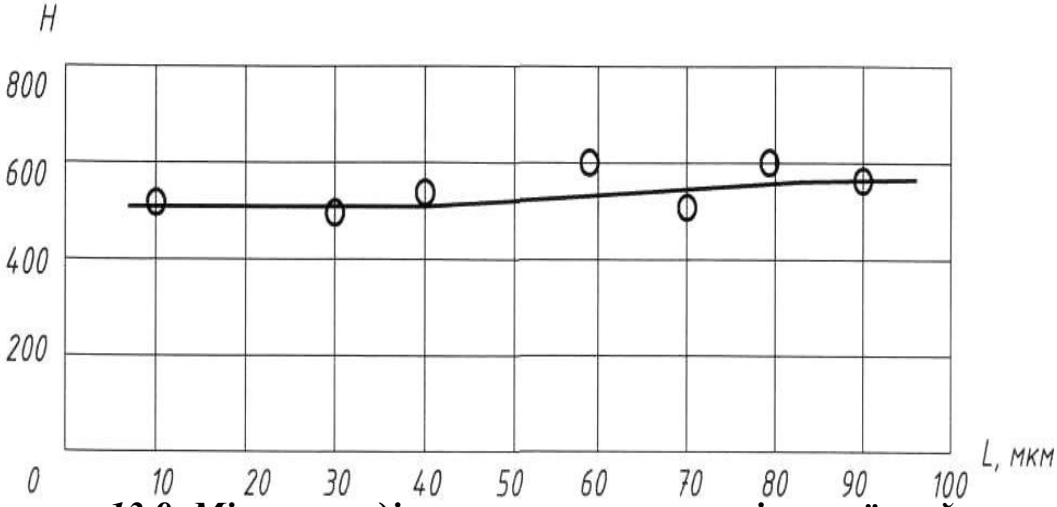



***Рисунок 13.9. Мікротвердість поверхневих шарів нової шийки колінвала***

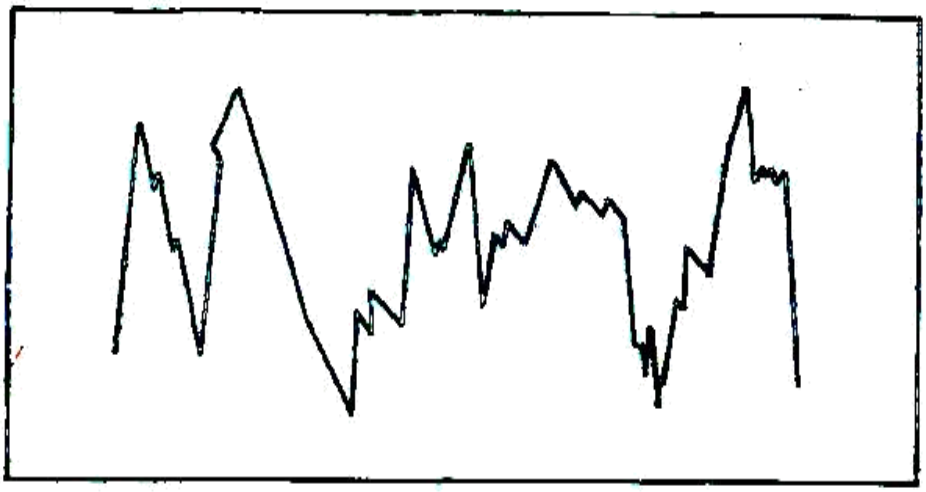


***Рисунок 13.10. Профілограма мікрорельєфу поверхневого шару пошкодженої шийки вала***

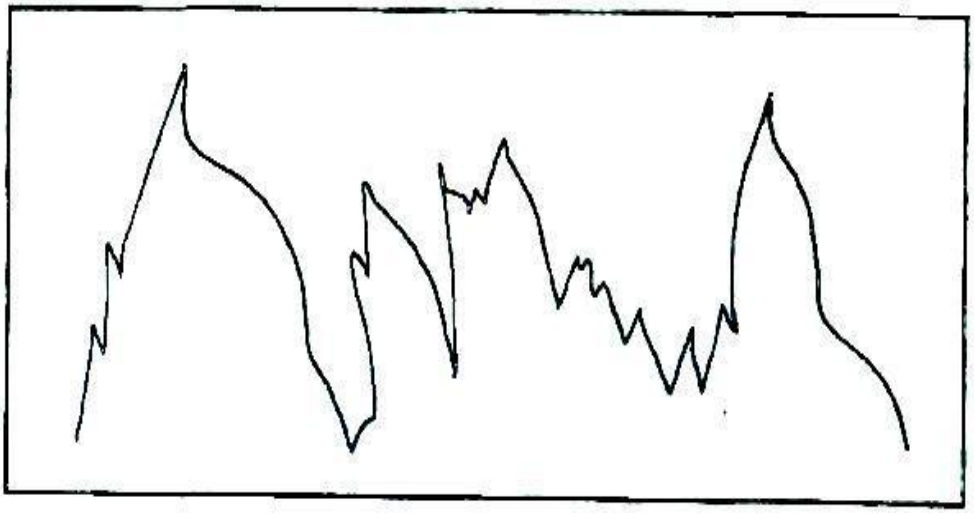


***Рисунок 13.11. Профілограма мікрорельєфу поверхневого шару пошкодженої вкладки***

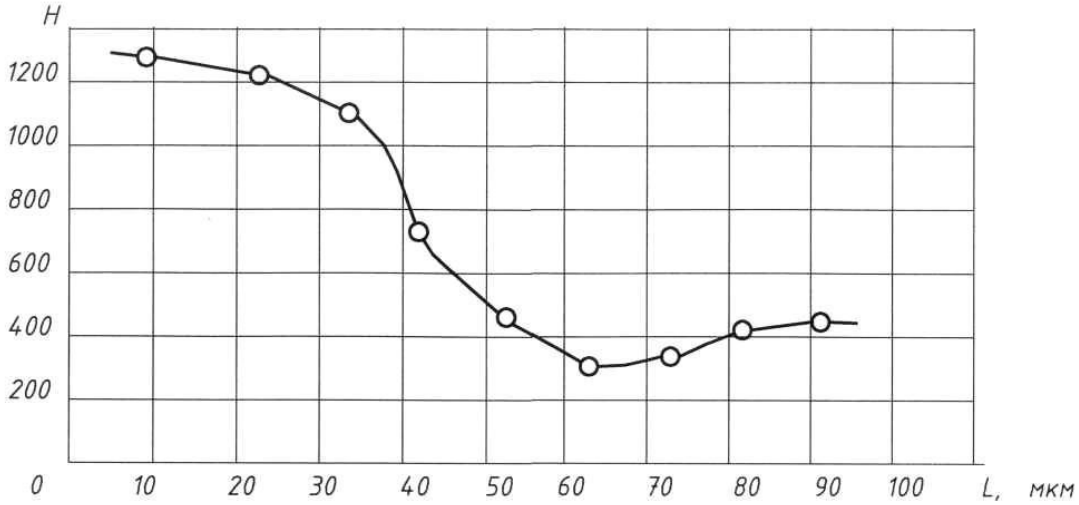



***Рисунок 13.12. Мікротвердість поверхневих шарів пошкодженої шийки колінвала (характерна зміна мікротвердості при гарячому задирі)***