

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Гончар Н.В.
ТЕКСТИ (конспект) лекцій з дисципліни

«Дослідження фізичних та механічних
властивостей конструкцій»

для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка»
освітньої програми «**Технології машинобудування**»
усіх форм навчання

Тексти (конспект) лекцій з дисципліни «Дослідження фізичних та механічних властивостей конструкцій» для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. Е.В. Кондратюк, Н.В. Гончар, – НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 51 с.

Укладач: Е.В. Кондратюк, доц., канд. техн. наук
Н.В. Гончар, доц., канд. техн. наук

Рецензент: О.Б. Козлова, доцент, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск С.І. Дядя, доцент, канд. техн. наук

Затверджено
на засіданні кафедри ТМБ
протокол № 1
від 06.08.2025 р.

Рекомендовано до видання НМК
машинобудівного факультету
протокол № 1
від 26.08.2025 р.

ЗМІСТ

1 Якість поверхні. Основні показники якості	4
2 Фізико-механічний стан матеріалу поверхневого шару та хімічний склад	17
3 Залишкові напруження	23
4 Основні характеристики опору втомленості при періодичному навантаженні	28
5 Фазовий склад	33
6 Тертя та дослідження трибологічних властивостей деталей і зразків	38
Перелік інформаційних джерел.....	50

1 Якість поверхні. Основні показники якості

Якість деталей машин, що забезпечується при механічній обробці, визначається показниками точності та якості поверхні.

Точність – відповідність розмірів, форми та взаємного розташування поверхонь отриманої деталі, розмірам, формі та взаємному розташуванню поверхонь, вказаних на кресленні.

Якість поверхні – ступінь відхилення реальної поверхні деталі від ідеальної.

Ідеальна поверхня – поверхня деталі, обмежена лінією креслення.

Реальна поверхня – поверхня, отримана після механічної обробки, на якій залишаються риси від інструмента та інші поверхневі дефекти.

Поверхневий шар – шар матеріалу зі зміненою структурою, фазовим та хімічним складом в порівнянні з основним металом.

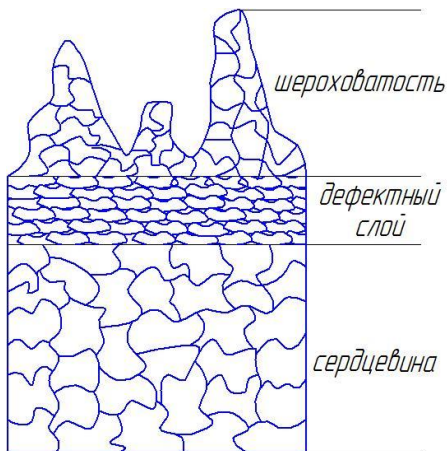


Рисунок 1.1 – Схематичний вигляд ділянки поверхневого шару

Якість поверхні визначається:

- 1) шорсткістю;
- 2) хвилястістю;
- 3) фізико-механічними властивостями та хімічним складом.

І. Шорсткість – сукупність мікронерівностей з відносно малими

кроками, виміряна на базовій довжині.

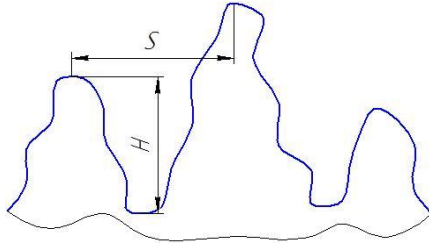


Рисунок 1.2 – Параметри S та H нерівностей поверхні

$H/S=50\dots 1000$ – хвилястість;

$H/S<50$ – похибка форми, макровідхилення;

$H/S>1000$ – шорсткість.

Причини утворення шорсткості:

- слід ріжучого інструмента (режими різання, геометрія інструменту);
- пластичні та пружні деформації (різець та заготовка), сколювання;
- копіювання попередньої похибки (спадковість);
- вібрації технологічної системи в цілому.

Параметри шорсткості:

- 1) R_z - висота нерівностей профілю, мкм;
- 2) R_a - середньоарифметичне відхилення профілю, мкм;
- 3) R_q - середньоквадратичне відхилення профілю, мкм;
- 4) S_m - середній крок мікронерівностей, мкм;
- 5) L_0 - загальна довжина профілю, мкм, мм;
- 6) l – відносна довжина профілю

$$l = \frac{L_0}{l_0},$$

де l_0 - базова довжина.

7) опорна довжина профілю $l_p = \sum_{i=1}^n b_i$. Визначається сумою довжин відрізків, відтинаючих на заданому рівні Р виступи профілю лінією, паралельною середній лінії.

8) Відносна опорна довжина профілю:

$$t_p = \frac{l_p}{l_0} \cdot 100 \%.$$

Способи визначення шорсткості:

- 1) візуальний (метод порівняння):
 - по еталонам шорсткості;
 - по еталонній деталі;
- 2) на інструментальному (інтерференційному) мікроскопі;
- 3) на профілометрі (контактний, безконтактний);
- 4) на профілометрі-профілографі.

Найбільш доступним і поширеним способом оцінки якості поверхонь є порівняння їх з поверхнями еталонів (рис. 1.3). Еталони (робочі зразки) випускають з різними параметрами шорсткості, отриманої точінням, фрезеруванням, струганням, шліфуванням, поліруванням, доводкою, виконаних на різних матеріалах. Щоб легше було порівнювати поверхні (досліджувана та еталона) зіставляються та порівнюються.

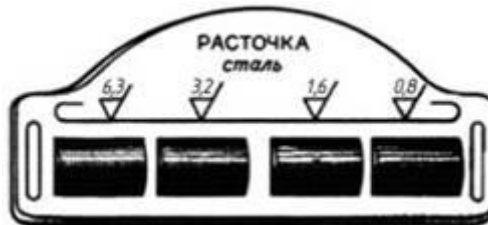


Рисунок 1.3 – Еталони для контролю шорсткості методом порівняння

Для більш точної оцінки шорсткості поверхонь застосовують інтерференційні мікроскопи (рис. 1.4), профілометри, профілографи

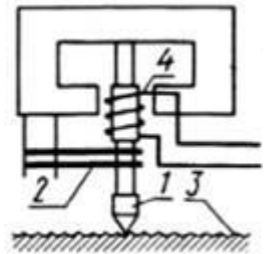
(рис. 1.5). Профілометри призначено для безпосереднього визначення середнього арифметичного відхилення профілю поверхні Ra . Профілографи записують профіль поверхні у вигляді профілограми. На рис. 1.5, а показано профілограф-профілометр, що працює за контактним методом, а на рис. 1.5, б - принцип дії щупу цього приладу.



Рисунок 1.4 – Інтерференційний мікроскоп



а)



б)

Рисунок 1.5 – Профілограф (контактний)

У приладах контактного типу копіювання профілю здійснюється шляхом переміщення голки-щупа по мікропрофілю досліджуваної поверхні (рис. 1.5, б). Нерівності викликають механічні коливання голки, в результаті яких формується електричний сигнал, пропорційний розмірам нерівностей.

До приладів безконтактного типу відносяться растрові електронні мікроскопи та оптичні (тіньові проєкції, світлового

перетину і інтерференційні), а також прилади, що використовують для сканування поверхні монохроматичне випромінювання (зокрема, лазерне – метод зсуву частоти випромінювання). Але при дослідженні забруднених поверхонь з використанням безконтактної технології профілометри можуть видавати спотворені значення внаслідок сканування не шорсткості поверхні, а її забруднень.

Вплив технологічних факторів на шорсткість:

а) вплив подачі (рис. 1.6);

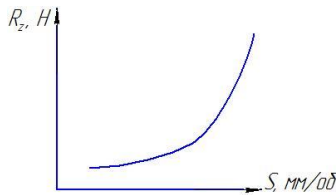


Рисунок 1.6 – Залежність шорсткості від подачі

б) вплив швидкості різання (рис. 1.8);

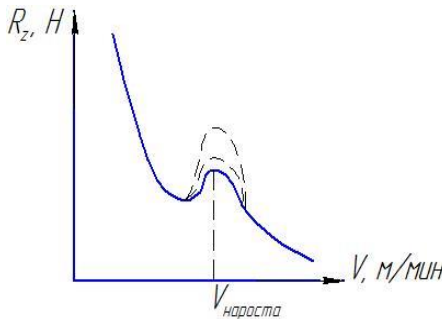


Рисунок 1.7 – Залежність шорсткості від швидкості різання

в) вплив радіусу при вершині різця (рис. 1.8).

Чим більше радіус r , тим краще мікропрофіль отриманої поверхні. Але при однакових інших режимах потребує більше потужності за рахунок росту площі перерізу стружки та необхідної для її зняття сили різання.

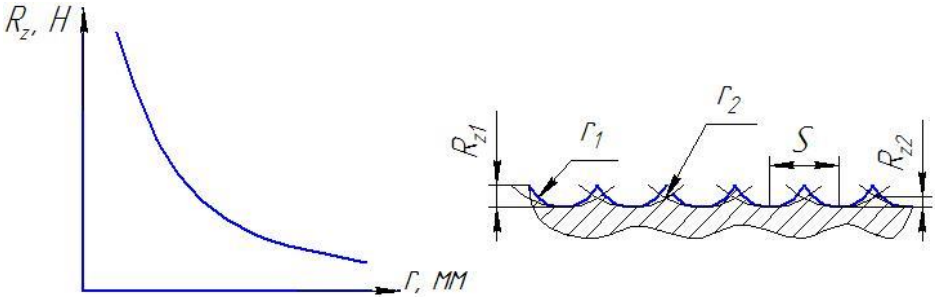


Рисунок 1.8 – Залежність шорсткості від радіусу при вершині різця

З графіку видно, що найкраща шорсткість забезпечується при $\rho \rightarrow \infty$. Майже такий радіус забезпечує «бриючий» різець (рис. 1.9).

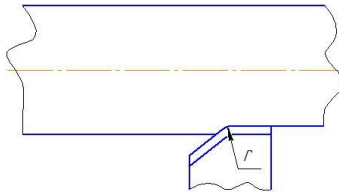


Рисунок 1.9 – «Бриючий» різець

г) вплив змащувально охолоджуючих рідин та технологічних середовищ (ЗОР та ЗОТС) є непрямим. Їх наявність дещо зменшує шорсткість.

Методи зниження шорсткості:

- 1) зниження вібрацій та підвищення жорсткості всіх елементів технологічної системи;
- 2) застосування оптимальної геометрії ріжучої частини інструменту;
- 3) своєчасна і ретельна заточка ріжучого інструменту;
- 4) вибір оптимальних режимів різання;
- 5) застосування ЗОТС;
- 6) застосування фінішних оздоблювально-зміцнюючих операцій (шліфування, полірування, притирка, накатка, виходжування, хонінгування, вигладжування, віброгалтовка, електрополірування та ін.).

Шорсткість поверхні помітно впливає на експлуатаційні властивості деталі. Чим чистіше поверхня, тим менше тертя і зношення деталей, тим вище коефіцієнт корисної дії механізмів, міцність і антикорозійна стійкість, кращий зовнішній вигляд виробу. Шорсткість поверхонь деталей впливає і на герметичність їх з'єднань. Однак не можна завищувати параметри шорсткості поверхні більше, ніж потрібно для її функціонування, тому що при підвищенні точності виготовлення і досягненні високої якості поверхні різко зростає вартість обробки (рис. 1.10).

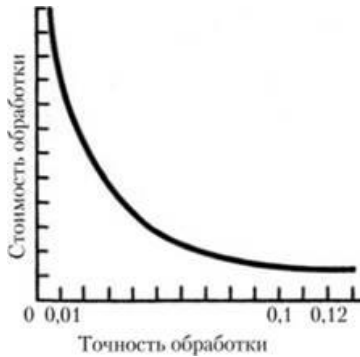


Рисунок 1.10 – Вплив точності обробки і ступеня шорсткості на вартість обробки деталі

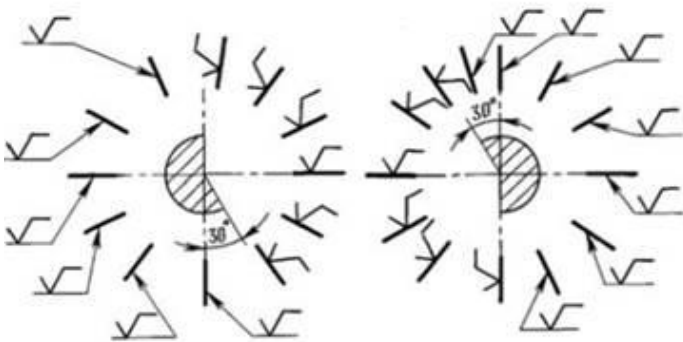


Рисунок 1.11 – Позначення шорсткості при різному розташуванні поверхонь

II. Хвилястість – наявність періодично повторюваних, приблизно однакових, хвилеподібних відхилень, відстань між якими набагато більша їх висоти.

Хвилястість поверхні – сукупність періодично повторюваних нерівностей, у яких відстані між суміжними височинами або западинами перевищують базову довжину.

Форма хвилі залежить від причин, які викликають хвилястість поверхні. Найчастіше хвилястість має синусоїдальний характер, що є наслідком коливань в системі верстат - пристосування - інструмент - деталь.

Причини утворення:

- а) наявність неврівноважених мас, похибок верстата призводять до коливань технологічної системи верстата;
- б) биття ріжучого інструменту;
- в) нерівномірність складових сил різання;

Хвилястість не стандартизована (не розбита на класи).

Хвилястість оцінюють двома параметрами: висотою хвилястості і кроком хвилястості.

Висота хвилястості – це середнє арифметичне з п'яти її значень, визначених на довжині ділянки вимірювання, що дорівнює не менше п'яти дійсним найбільшим крокам хвилястості (рис. 1.12, а).

$$W_z = \frac{W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5}{5}$$

Числові значення W (мкм) слід вибирати з наступного ряду: 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5; 25; 50; 100; 200.

Середній крок хвилястості – середнє значення відстаней між однойменними сторонами сусідніх хвиль, виміряних по середній лінії профілю (рис. 1.12, б)

$$S_w = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 S_{w_i}$$

Положення середньої лінії, визначається так само, як і середньої лінії профілю шорсткості.

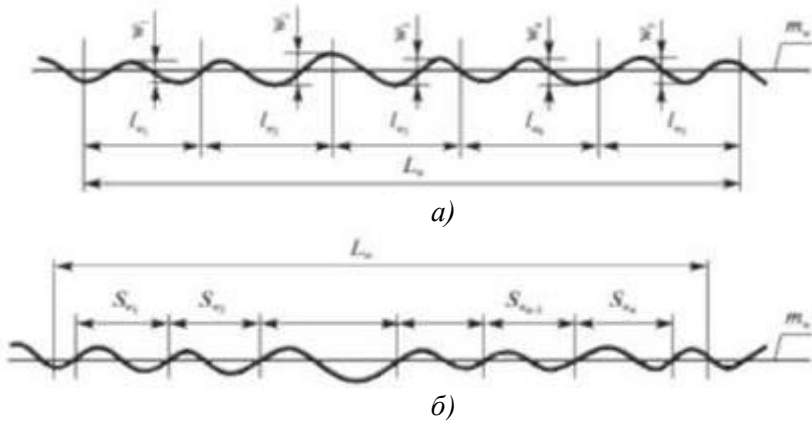
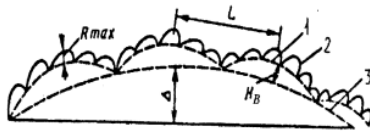


Рисунок 1.12 – Визначення висоти (а) і кроку (б) хвилястості

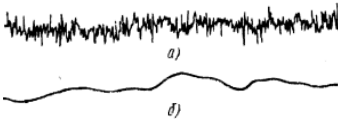


1 – хвилястість; 2 – шорсткість; 3 – макровідхилення
Рисунок 1.13 – Схема мікрогеометрії поверхні

Основні теоретичні положення до практичного дослідження показників шорсткості

Встановлено три групи показників шорсткості:

- висотні (R_z , R_a , R_{max}), що характеризують шорсткість по нормалі до бази відліку;
- крокові (S_m , S), що характеризують відстань нерівностей уздовж бази відліку;
- структурні (t_p), що дають комплексну оцінку шорсткості.



Профілограма сталеві поверхні після шліфування:

- а) вертикальне збільшення 40000, горизонтальне збільшення 400;
- б) дійсний профіль поверхні при однакових вертикальному і горизонтальному збільшенні.

Рисунок 1.14

Для оцінки всього комплексу цих показників необхідно записати профілограму поверхні на базовій довжині із значним вертикальним і горизонтальним збільшенням нерівностей (рис. 1.15).

Показник R_z спочатку оцінюється за профілограмою:

$$R_{zn} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 H_i - \sum_{i=1}^5 h_i \right) \quad (1.1)$$

Для цього на профілограмі в межах базової довжини встановлюється п'ять максимальних западин відносно середньої лінії l_m . Далі від довільно обраної бази відліку (на рис. 1.15 базою відліку є лінія 2) за допомогою лінійки вимірюються значення H_i та h_i і підставляються у формулу (1.1).

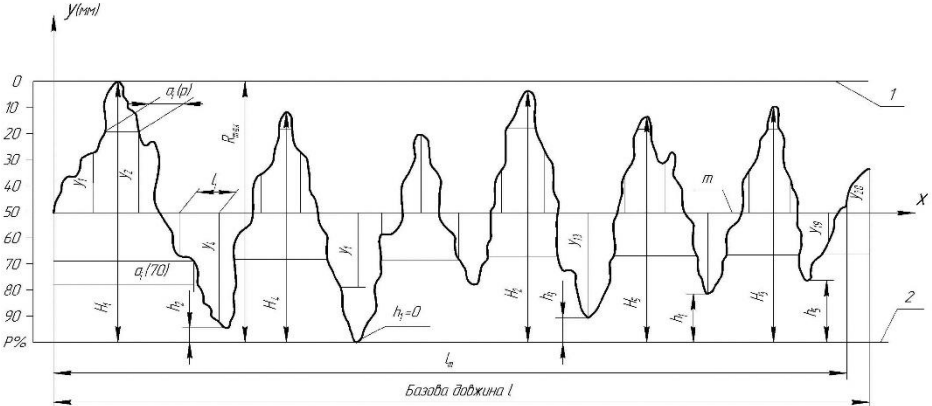


Рисунок 1.14 – Профілограма поверхні

Із урахуванням вертикального збільшення $\times V_y$, що забезпечується під час запису профілограми, дійсне значення показника розраховуємо за формулою (1.2):

$$R_z = \frac{R_{zn}}{\times V_y} \quad (1.2)$$

Показник R_a за даними профілограми розраховується за формулою:

$$R_{an} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1.3)$$

де y_i – абсолютне значення відхилення i -ї точки профілю від середньої лінії l_m за профілограмою;

n – число вимірюваних відхилень на базовій довжині.

Приймають $n \geq 20$.

Дійсне значення R_a з врахуванням вертикального збільшення розраховується за формулою:

$$R_a = \frac{R_{an}}{\times V_y} \quad (1.4)$$

Показник R_{max} вимірюється так, як показано на рис. 1.7 і являє собою відстань між максимальним виступом і западиною. Дійсне

значення цього показника розраховується за формулою:

$$R_{\max} = \frac{R_{\max n}}{^x V_y} \quad (1.5)$$

Середній крок нерівностей S_m на профілограмі представляється довжиною відрізка середньої лінії l_m , що перетинає профіль в трьох точках і розраховується або класично, або за формулою:

$$S_{mn} = \frac{2 \cdot l_m}{K_m - 1} \quad (1.6)$$

де l_m' – довжина відрізка середньої лінії l_m до останнього непарного її перетину з профілем на базовій довжині l ;

K_m – кількість усіх точок перетинання профілю середньої лінії на базовій довжині.

Дійсне значення кроку з урахуванням горизонтального збільшення $^x V_x$ розраховується за формулою:

$$S_m = \frac{S_{mn}}{^x V_x} \quad (1.7)$$

Відносну опорну довжину профілю t_p визначають так:

$$t_p = \frac{\eta_p}{l} \cdot 100\% \quad (1.8)$$

і виражають у процентах базової довжини l .

Рівень P відкладають від лінії виступів 1 (рис. 1.1) і виражають у процентах від максимальної висоти профілю – R_{\max} .

Опорна довжина:

$$\eta_p = \sum_{i=1}^n a_{i(P)} \quad (1.9)$$

являє собою суму відрізків $a_{i(P)}$ у матеріалі виступів профілю, що відсікаються на рівні P лінією, паралельною середній лінії. Якщо рівень P змінюється від 0 до 100 %, то t_p також буде змінюватись від 0 до 100 % (рис. 1.2).

Для порівняльного аналізу використовують також коефіцієнт технологічної концентрації напружень α_{σ}^{mex} , який характеризує плавність мікропрофілю, тому що риси від ріжучого інструменту після механічної обробки поверхні є концентраторами напружень. Його

визначають за формулою:

$$\alpha_{\sigma}^{mexh} = 1 + 2 \sqrt{\gamma \frac{t_m}{\rho_m}} \quad (1.14)$$

де t_m – середнє значення висоти виступів, що утворюють вимірювані западини, мкм;

ρ_m – радіус западин мікронерівностей, мкм;

γ – коефіцієнт, що враховує відношення висоти мікронерівностей до кроку S_m .

2 Фізико-механічний стан матеріалу поверхневого шару та хімічний склад

Фізико-механічний стан поверхневого шару та хімічний склад визначається фізичними процесами, що відбуваються в зоні різання.

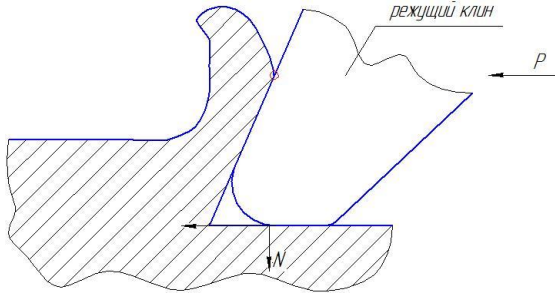


Рисунок 2.1 – Сили, що діють в зоні різання (спрощено)

Матеріал нової поверхні у самої ріжучої кромки зазнає впливу нормальної стискаючої сили (N) та сили тертя τ , яка діє в напрямку лінії зрізу.

Нормальна сила викликати деформацію стискання, а сила тертя – деформацію розтягання. Таким чином, поверхневий шар зазнає неоднорідної пластичної деформації, монотонно затухаючої по глибині шару.

Пластична деформація супроводжується структурними змінами. В атомній ґратці різко зростає кількість дислокацій, вакансій та інших дефектів. Змінюються форми та розміри зерен (біля поверхні подрібнюються і витягуються).

Пружно-пластичні деформації та теплота при механічній обробці змінюють структурні характеристики поверхневого шару (в порівнянні з вихідним станом матеріалу). Теплота, що виділяється при різанні, сприяє частковому зняттю деформаційного зміцнення, тобто в поверхневому шарі одночасно проходять два взаємовиключних процеси (зміцнення і знеміцнення). Все залежить від інтенсивності перебігу цих двох процесів. В результаті, як правило, зростають всі показники опору деформування:

- а) модуль пружності E ;
- б) межа плинності σ_T ;

- в) межа міцності σ_g ;
- г) межа витривалості σ_{-1} ;
- д) твердість HB, HRC, HRA тощо;
- е) крихкість.

Та знижуються характеристики пластичності:

- а) відносне видовження δ ;
- б) відносне звуження ψ ;
- в) питома в'язкість a_i .

Фізико-механічний стан поверхневого шару в цілому визначається: твердістю, структурними та фазовими перетвореннями, залишковими напруженнями, станом кристалічної ґратки.

Поверхневий шар після обробки відрізняється від основної маси матеріалу: під дією сили різання змінюються його твердість, кристалічна будова тощо. Товщина дефектного поверхневого шару залежить від матеріалу заготовки, виду і режимів обробки і досягає при деяких видах чорнової обробки 0,5-1 мм.

Стан поверхневого шару характеризується наступними фізико-механічними властивостями:

- наклеп;
- щільність дислокацій;
- фазовий склад;
- залишкові напруження;
- хімічний склад.

Наклеп – локальне зміцнення поверхневого шару, що характеризується величиною мікротвердості, виміряної на поверхні та на серцевині.

Для визначення мікротвердості по глибині розташування наклепаного матеріалу застосовують «косий» шліф.

Косий шліф отримують в спеціальному пристосуванні притиранням, яке здійснюється зазвичай в три етапи: грубе притирання, чистове і остаточне. Перше виконується на чавунній плиті з використанням крупно-зернистою пасті ГОІ, дві наступних - з використанням більш дрібних паст на чавунній або скляній плиті.

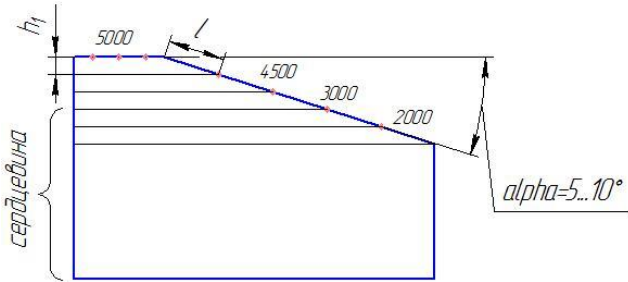


Рисунок 2.2 – «Косий» шліф для заміру мікротвердості за глибиною

Мікротвердість [*microhardness*] – це твердість окремих фаз та структурних складових, твердість усередині окремих зерен, тонкого поверхневого шару (після хіміко-термічної обробки), тонких металічних листів і фольги.

Мікротвердість вимірюється втискуванням алмазного індентора (пірамідальної форми) під навантаженням не більше 2 Н (200 Гс). Вибір ділянки для випробування мікротвердості і визначення розмірів відбитку роблять під мікроскопом, за спеціальними таблицями або номограмами перераховують на так зване число твердості – відношення навантаження до площі поверхні відбитку.

Прилад для визначення мікротвердості (рис. 2.3) забезпечує можливість вибору ділянки мікроструктури, де буде зроблено втискування алмазного індентора; завдяки малим розмірам відбитку можна вимірювати мікротвердість окремих фаз або навіть окремих зерен.

Дані про мікротвердість використовують для вивчення неоднорідності розподілу розчинних домішок по зерну, дослідження пластичної деформації, побудови діаграм фазової рівноваги тощо.

Вимірювання мікротвердості проводять відповідно до вимог ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» за методом відновленого відбитка (рис. 2.4). Для вимірювання мікротвердості застосовують сучасні програми аналізу мікротвердості. Прикладом такої програми є аналізатор мікротвердості *ImageExpert™ MicroHardness 2*. При необхідності проведення множинних вимірювань мікротвердості продуктивність може бути істотно підвищена за рахунок автоматизації апаратно-програмного комплексу.



Рисунок 2.3 – М-400-Н
фірми «LECO»

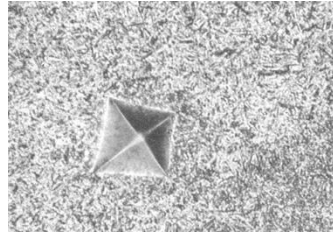


Рисунок 2.4 – Відбиток алмазної
пірамідки

Процес нанесення серії відбитків в цьому випадку відбувається повністю автоматично, а по закінченні програмний модуль поверне оператора у вихідну точку випробування і проведе користувача послідовно по кожному відбитку для їх збереження і подальшого вимірювання.

Характеристики наклепу:

а) глибина наклепу h_H , мкм;

б) ступінь поверхневого наклепу:

$$S_H \{U_H\} = \frac{H_{\mu\max} - H_{\mu\text{исх}}}{H_{\mu\text{исх}}} \cdot 100\% ,$$

де $H_{\mu\text{исх}}$ - мікротвердість серцевини.

в) градієнт наклепу (інтенсивність зміни по глибині):

$$U_{\text{сп}} \{S_{\text{сп}}\} = \frac{H_{\mu\max} - H_{\mu\text{исх}}}{h_H} , \left[\frac{\text{МПа}}{\text{мкм}} \right]$$

За отриманими даними будують залежність ступеня поверхневого наклепу по глибині поверхневого шару.

$$S_{H_0} ; S_{H_{20}} ; S_{H_{50}} ; S_{H_{100}} \dots S_H = f(h)$$

Значення наклепу асимптотично наближається до нуля на рівні серцевини (рис.2.5)

На графіку залежності мікротвердості за глибиною поверхневого шару значення її постійно змінюється, асимптотично наближаючись до рівня звичайної мікротвердості серцевини (рис. 2.6).

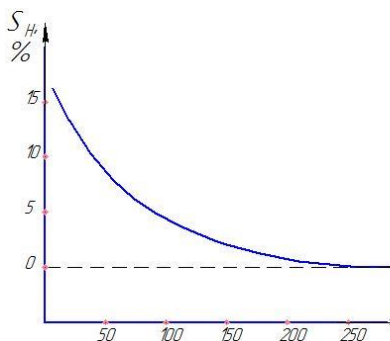


Рисунок 2.5 – Залежність ступеня поверхневого наклепа по глибині

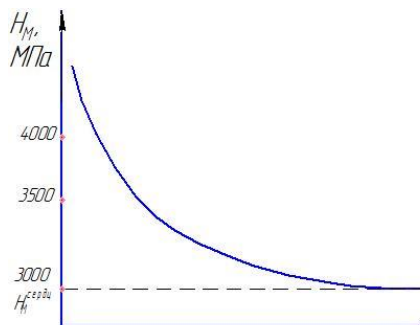


Рисунок 2.6 – Залежність мікротвердості по глибині

Зміцнюючи поверхню, необхідно уникати такого явища, як «перенаклеп». Він характеризується різким підвищенням (стрибком) мікротвердості локальних ділянок поверхні і майже повним вичерпанням пластичності, що призводить при найменшому навантаженні до появи сітки мікротріщин (до окрихчування).

Щільність дислокацій $\rho_{дисл}$

Дислокація – дефект кристалічної ґратки, що не переміщується самовільно.

Переміщується при обробці тиском, навантаженнях, деформаціях.

Класифікація можливих структурних дефектів у ґратках кристала можлива на основі просторової довжини. Розрізняють крапкові, лінійні й поверхневі дефекти або відповідно нуль-мірні, одномірні й двомірні дефекти. Найважливіші типи дефектів будови кристала наведено нижче.

Крапкові дефекти: дефекти за Френкелем, дефекти за Шотткі, антидефекти за Френкелем, антидефекти за Шотткі.

Лінійні дефекти: дислокація.

Поверхневі дефекти: малокутова границя зерна, великокутова границя зерна, дефект упакування, двійники.

Поряд із цим є безліч складних і ще маловивчених дефектів структури, наприклад скупчення крапкових дефектів в «хмари», які перевищують атомарні розміри. Різні дефекти структури часто проявляються в кристалі не в чистому виді: вони взаємно впливають один на одного й можуть реагувати один з одним.

Тому що крапкові дефекти мають у трьох кристалографічних напрямках атомарні розміри, їх називають ще атомними дефектами. Дефекти за Френкелем й за Шотткі принципово відрізняються від лінійних і поверхневих дефектів тим, що вони перебувають у тепловій рівновазі. Тому неможливо одержати ідеальні кристали при нормальній температурі. Навіть якби вони були вільні від дислокацій і не мали б яких-небудь поверхневих дефектів, при температурі, що відрізняється від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, варто було б зважати на певну рівноважну концентрацію атомних дефектів.

3 Залишкові напруження

Це напруження, які існують та врівноважуються всередині твердого тіла після усунення причин, що викликали їх появу. Характеризуються величиною (МПа), знаком («+» – розтягуючі, «-» – стискаючі залишкові напруження), глибиною залягання (мкм, мм).

За теорією Н.Н. Давиденкова прийнято таку класифікацію залишкових напружень:

а) **напруження I роду** (макронапруження). Охоплюють області, співрозмірні з розмірами деталі, мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі. Виникають від неоднорідності силового або температурного поля (розподілу деформацій в об'ємі деталей після обробки).

Результатом досліджень є епюри залишкових напружень.

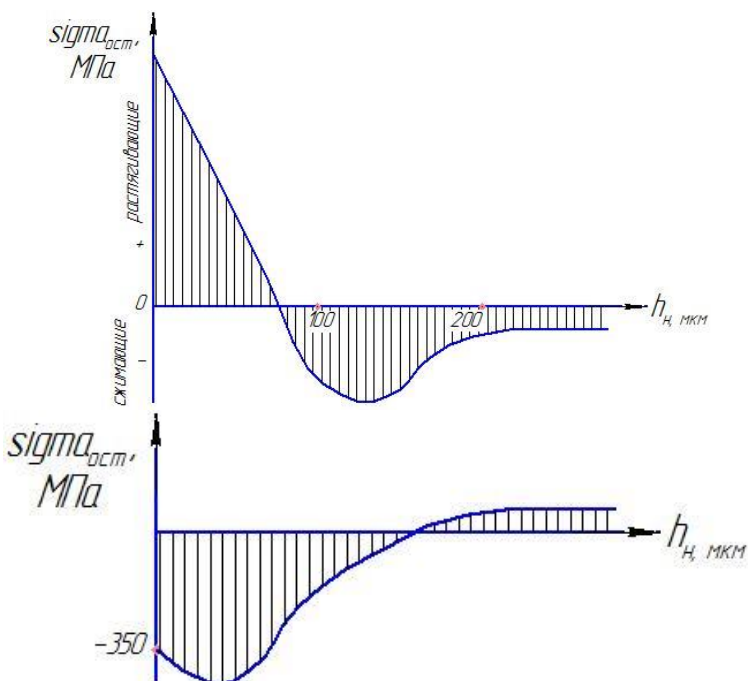


Рисунок 3.1 – Епюри залишкових напружень

б) **напруження II роду** (мікронапруження). Поширюються на окремі зерна металу (або на групу зерен – блоки). Виникають в

результаті взаємодії зерен між собою, фазових перетворень, зміщень границь зерен.

в) напруження III роду (субмікронапруження). Відносяться до викривлень атомної ґратки. Причини утворення:

- дислокації;
- атоми втручання тощо.

Переважають визначають напруження I роду, рідше – II роду і тільки в дослідницьких цілях – III роду.

Методи визначення залишкових напружень

I. Механічний

Найменшу похибку вимірювання залишкових напружень дає метод пошарового стравлювання металу (метод Давіденкова). Найчастіше для цього метода використовують зразки прямокутної форми (рис.3.2), отримані електроерозійним розрізанням, щоб не наводити додаткові напруження від механічної обробки. Іноді такі зразки вирізають з деталей більш складної конфігурації.

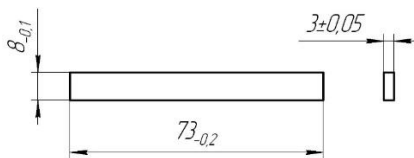


Рисунок 3.2 – Ескіз зразка для досліджень залишкових напружень

Поверхню для дослідження залишають незмінною, інші – покривають лаками і воском.

Послідовно стравлюють шари металу електролітичним методом і контролюють деформацію (прогин) зразка або деталі.

Наприклад, в якості електроліта для нікелевих жароміцних сплавів використовують суміш, що складається з H_3PO_4 (50%), H_2SO_4 (30%), H_2O (20%).

Після стравлювання напруження «вивільнюються», зразок вигинається.

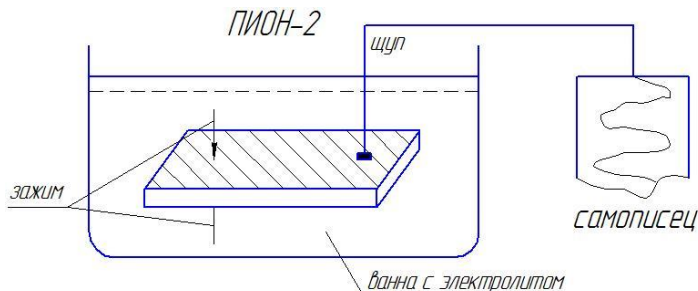


Рисунок 3.3 – Схема травлення зразка на ПІОН-2 – пристрої для вимірювання залишкових напружень (для напружень I роду)

Величина вигину характеризує залишкові напруження $\sigma_{ост}$, які визначають [3] за формулою:

$$\sigma_{ост} = \frac{4E}{3l^2} \left[(h-a)^2 \frac{df}{da}(a) - 4(h-a) \cdot f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right] \quad (3.1)$$

Глибину стравленого шару визначають, зважуючи на вагах зразок перед випробуванням та після нього. Стравлений шар – прямокутного перерізу, різницю мас поділяють на щільність, отримують об'єм, а з нього і з відомих довжини і ширини зразка знаходять глибину видаленого шару.

За стрічкою самопишучого пристрою розмічають відсічки глибини 2, 5, 10, 20 ... 80, 90, 100, 150, 200 мкм. Перераховують значення залишкових напружень і заповнюють протокол досліджень.

Після цього отримують епюру розподілу залишкових напружень за глибиною поверхневого шару (рис. 3.4).

2. Рентгенівський. Вимірюється деформація викривлення кристалічної решітки за дифракційними лініями, які характеризуються величиною їх зміщення відносно аналогічних ліній у відпаленого матеріалу (шириною та інтенсивністю). Застосовується для визначення напружень II та III роду.

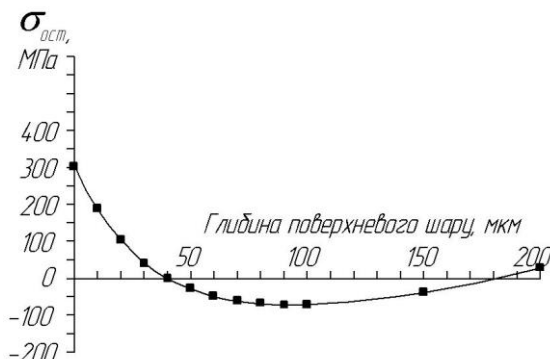


Рисунок 3.4 – Епюра залишкових напружень поверхні після протягання

3. Оптичний. З спеціального скловолокна виготовляється імітатор – модель досліджуваної деталі або декількох контактуючих деталей. Нульові залишкові напруження залишають скловолокно прозорим. Напруження, що виникають змінюють колір імітатора в небезпечному перерізі від голубого до синього, в залежності від інтенсивності залишкових напружень.

4. Комп'ютерне (віртуальне) моделювання. За допомогою спеціальних комп'ютерних програмних пакетів.

Хімічний склад

Зміна хімічного складу поверхневого шару відбувається під час термообробки, механічної обробки, експлуатації, в основному внаслідок взаємодії металу з оточуючим середовищем. Глибина проникнення середовища в поверхневому шарі залежить від коефіцієнта дифузії, часу взаємодії і діючої температури.

Втрата хімічних елементів поверхневого шару відбувається за тими ж причинами, що і дифузія.

Необхідно враховувати ймовірність зміни хімічного складу поверхневого шару та передбачати заходи для його запобігання. У випадку, якщо зміна хімічного складу корисна (наприклад, насичення вуглецем сталі), проводиться хіміко-термічна обробка (наприклад,

цементация).

Зубчасті колеса піддають азотуванню зубів для підвищення їх зносостійкості. Для цієї операції інші поверхні, які не повинні піддаватись цій ХТО покривають міддю, яку після азотування видаляють.

Методи визначення хімічного складу.

«Штучний ніс», «штучний язик» – прибори, що знаходяться в розробці, для миттєвого визначення хімічного складу газів, рідин або поверхні твердих тіл.

Лазерні аналізатори.

Хімічні способи (розчинення).

Спектрографія.

Інші.

4 Основні характеристики опору втомленості при періодичному навантаженні

Опір матеріалів змінному у часі навантаженню відрізняється від опору постійному навантаженню: руйнування відбувається при значно менших напруженнях, навіть менших σ_T .

Етапи руйнування: накопичення мікропошкоджень, зародження тріщини, розвиток тріщини у часі часу, остаточне раптове руйнування (долом).

Втомленість – процес постійного накопичення пошкоджень матеріалу під дією змінних напружень, що призводять до зміни його властивостей, появи та розвитку тріщин і до руйнування.

Опір втомленості – властивості матеріалу протидіяти втомленості.

Втомні пошкодження – незворотні зміни фізико-механічних властивостей матеріалу об'єкту під дією змінних напружень.

Тріщина – порушення суцільності матеріалу об'єкту у вигляді щілиноподібного розриву.

Втомна тріщина – часткове розділення матеріалу під дією змінних напружень.

Швидкість росту втомної тріщини – відношення приросту довжини втомної тріщини до інтервалу часу:

$$V_p = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

Час може вимірюватись поточним числом циклів навантаження:

$$V_{p \text{ цикл}} = \frac{\Delta l_{np}}{\Delta N_{цикл}},$$

де $\Delta N_{цикл}$ – кількість циклів.

Руйнування – розділення матеріалу на частини з повною втратою його міцності або працездатності.

Втомне руйнування – руйнування матеріалу навантаженого

об'єкта внаслідок поширення втомної тріщини.

Малоциклова втома (МЦВ) – втома матеріалу, при якій втомне пошкодження або руйнування відбувається при пружно-пластичній деформації (до $10^4 \dots 10^5$ циклів).

Багатоциклова втома (БЦВ) – втома матеріалу, при якій втомне пошкодження або руйнування відбувається в основному при пружному деформуванні ($> 10^5$ циклів).

Інакше: малоциклова втома – розвиток пластичних деформацій при високих рівнях навантаження, і багатоциклова втома – поступове накопичення прихованих необоротних змін в структурі матеріалів, подальше формування мікроскопічних тріщин і їх злиття в так звану магістральну макроскопічну тріщину, що приводить до руйнування.

Витривалість залежить від властивостей матеріалу, вигляду циклу, вигляду напруженого стану, наявності концентраторів напруги, стану поверхні, властивостей довколишнього середовища, розмірів деталі або конструкції тощо. Межа витривалості може виявитися значно нижче за межу міцності або межу текучості матеріалу. Висока чутливість межі витривалості до різних чинників вимагає підвищеної уваги до вибору допустимих напружень і коефіцієнтів запасу при циклічних навантаженнях.

Основні характеристики опору втомленості

Розрізняють циклічну довговічність (N , цикл), яка визначається при періодичному навантаженні, та зносостійку довговічність ($N_{ум}$, цикл) при випадковому та блочному навантаженні.

Циклічна довговічність N , [цикл] – число циклів, витриманих навантаженим об'єктом до утворення втомної тріщини визначеної довжини або до втомного руйнування.

Основні характеристики опору втомленості отримують побудовою кривої втомленості. Це залежність між максимальними навантаженнями (або амплітудами циклу) і циклічною довговічністю. Будується по середньому значенню, частіше всього в партії не менше 10 зразків.

Крива втомленості будується на основі даних експериментальних досліджень в координатах: максимальне напруження в циклі – кількість циклів до руйнування. На машині відпрацьовують цикли із заданим

$r = const$. Перший зразок – при великому значенні σ_{max} , якому відповідають невеликі числа циклів N . Поступово знижуючи σ_{max} , можна прийти до такого значення σ_{max} , при якому зразок не руйнується навіть після дуже великого числа циклів. Одержана крива втомленості (крива Веллера) асимптотично наближається до прямої, паралельної осі ON . Криву втомленості будують і для дотичних напружень.

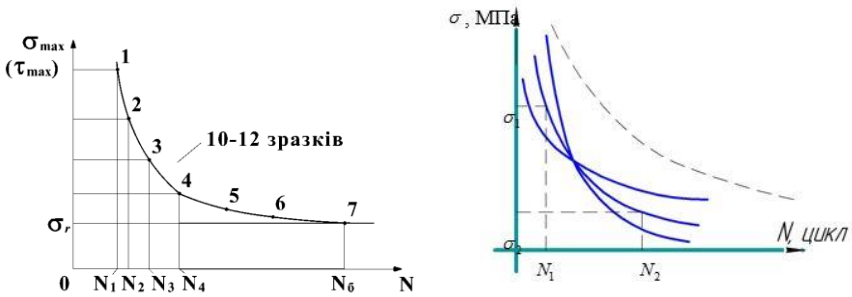


Рисунок 4.1 – Крива Веллера

Легше аналізувати криву втомленості, виконану в напівлогарифмічних (рис. 4.1) та логарифмічних (рис. 4.2) координатах.

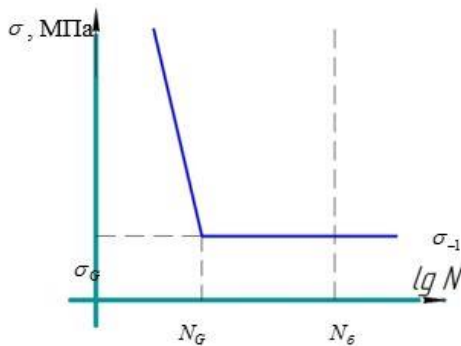


Рисунок 4.2 – Напівлогарифмічні координати

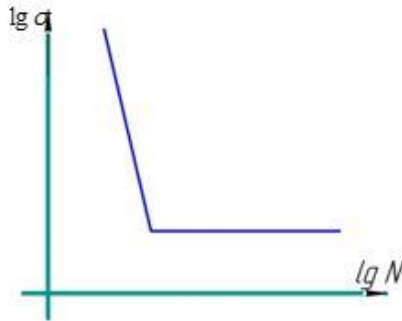


Рисунок 4.3 – Подвійні логарифмічні координати

Базове число циклів N_0 [цикл] – максимальне число циклів навантажень, обмежуючих продовження випробувань зразків без руйнування.

Абсциса точки перелому – число циклів, відповідне границі витривалості σ_{-1} , МПа (τ_{-1} , МПа) – максимальна амплітуда напружень, при якій не відбувалось втомне руйнування до бази випробувань.

За допомогою кривих втомленості, побудованих за результатами випробувань різних партій зразків (рис. 4.4), можна проводити їх порівняння.

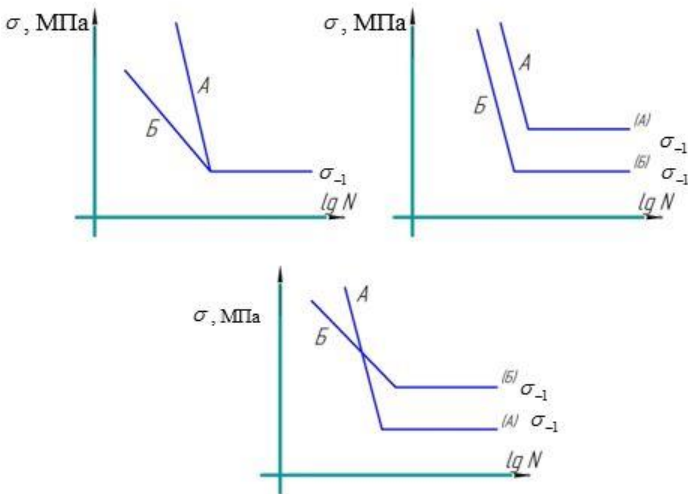


Рисунок 4.4 – Приклади порівняння кривих втомленості

Процес втоми до руйнування має дві стадії:

- 1 – до зародження тріщини;
- 2 – розвиток тріщини.

Відношення тривалості цих стадій змінюється в широких межах в залежності від рівня дійсних напружень, схеми навантаження тощо.

В деяких випадках, стадія розвитку видимої тріщини може складати 60...90% загальної довговічності. Ця стадія називається «живучістю» матеріалу. Особливо важлива «живучість» конструкцій з концентраторами напружень, тому що зародження тріщини починається в більшості випадків від них.

5 Фазовий склад

Фазовий склад визначає:

- а) тип структури (види фаз і матриці, види кристалічної ґратки фаз і матриці);
- б) форму фаз (сферична (куляста), пластична (раф-структура), голчаста, стержнева та ін.);
- в) орієнтування зерен;
- г) концентрацію вакансій тощо.

Методи визначення:

- а) на електронному мікроскопі;
- б) на електронно-растровому мікроскопі;
- в) рентгеноструктурний метод (по розширенню інтерференційної лінії).

Дослідження мікроструктури, фазового складу поверхонь зразків

Внутрішня структура та склад металів неоднорідні, тому що найчастіше вони складаються з численних зерен у вигляді прилеглих один до одного кристалітів. Найчастіше ці неоднорідності мають мікроскопічні розміри, тому відповідні різновиди внутрішньої структури називають мікроструктурами.

Мікроструктура – це будова металу або сплаву, видима при великих збільшеннях за допомогою мікроскопа. Аналіз мікроструктури дає можливість визначити величину і розташування зерен металу, розміри та кількість дрібних неметалічних включень і різних фаз у металі, проконтролювати стан структури поверхневого шару виробів, виявити мікродефекти, а також деякі дефекти кристалічної будови (дислокації та їх скупчення).

У металі, що містить тільки одну фазу, мікроструктури можуть відрізнятися одна від одної лише величиною зерна, його формою і орієнтуванням, а також відрізнятися за морфологією, наприклад, часток цієї фази по глибині, або біля границь зерен. Мікроструктури багатофазних матеріалів розрізняються не тільки за розміром, формою та орієнтуванням зерен, як це характерно для однофазних металів, але також і за відносною кількістю та взаємному розташуванню двох або

більше присутніх фаз.

Об'єктом дослідження мікроструктури сплавів є тонкий поверхневий шар на шліфах зразків. Для її виявлення застосовують такі методи: хімічне травлення, електролітичне травлення, магнітний метод, теплове травлення, травлення в розплавлених солях, катодне травлення, посилення рельєфу мікроструктури після об'ємних перетворень. Для виявлення мікроструктури використовують спеціально підібрані кислоти та луги різної концентрації, розчини різних солей та їх суміші, різні складі електролітів, нагрівання до різної температури на повітрі або в спеціальному середовищі газів або пару, нагрівання до певних температур при пропусканні електричного струму. На поверхні шліфів відбувається розчинення одних фаз, окислення та фарбування інших. У результаті під мікроскопом можна побачити обриси зерен і різних фаз, визначити їх взаємне розташування; за кольором, формою і розмірами визначити присутні в сплаві фази, тобто виявити мікроструктуру сплаву.

Металографічні шліфи, наприклад, з нікелевих жароміцних сплавів готують шляхом механічного полірування з послідовним анодним електрохімічним травленням впродовж 10...30 с в електроліті (насичений розчин хромового ангідриду CrO_3 в ортофосфорній кислоті H_3PO_4 , – анодний потенціал 10 В). Далі перед проведенням досліджень шліфів проводять їх декорування з витримкою при температурі 850 °С впродовж 2 годин у вакуумі для отримання якісного та контрастного зображення (рис. 5.1).

До прямих методів дослідження структурного стану речовини відносяться: оптична металографія, електронна мікроскопія, рентгенівський аналіз тощо. Оптичним мікроскопом можна досліджувати і фотографувати деталі мікроструктури, розміри яких не перевищують 0,4...0,6 мкм. Отримане зображення мікроструктури можна збільшувати, але нові деталі структури при цьому не виявляються.

Одним з сучасних методів досліджень мікроструктури – за допомогою растрових електронних мікроскопів (РЕМ), які у відмінності від більш ранніх світлових просвічуючих електронних мікроскопів (ПЕМ), не потребують підготовки тонких плівок з поверхонь (реплік), що є дуже довготривалим та дорогим процесом. РЕМ дають можливість зробити чіткі цифрові фотографії обраної зони шліфа. З камери, в яку встановлюють шліф (зразок), викачують повітря,

забезпечуючи відсутність похибок зображення; вакуумна камера дає змогу використовувати РЕМ для визначення хімічного складу мікроділянки поверхні (фази, часток карбідів тощо) при підключенні додаткового спеціального обладнання.

Застосування методу рентгеноструктурного аналізу дозволяє визначити ступінь досконалості кристалів, їх орієнтування, глибоко вивчити структурні зміни. Для вирішення завдань рентгеноструктурного аналізу використовують дифрактометри.

Після перерахованих вище підготовчих етапів з виявлення мікроструктури і отримання її зображень, сьогодні стає доцільним проведення дослідження мікроструктури методами автоматичного аналізу зображення. Хоча єдиного стандарту на ці методи поки немає, проте автоматичні аналізатори зображення вдосконалюються з кожним днем.

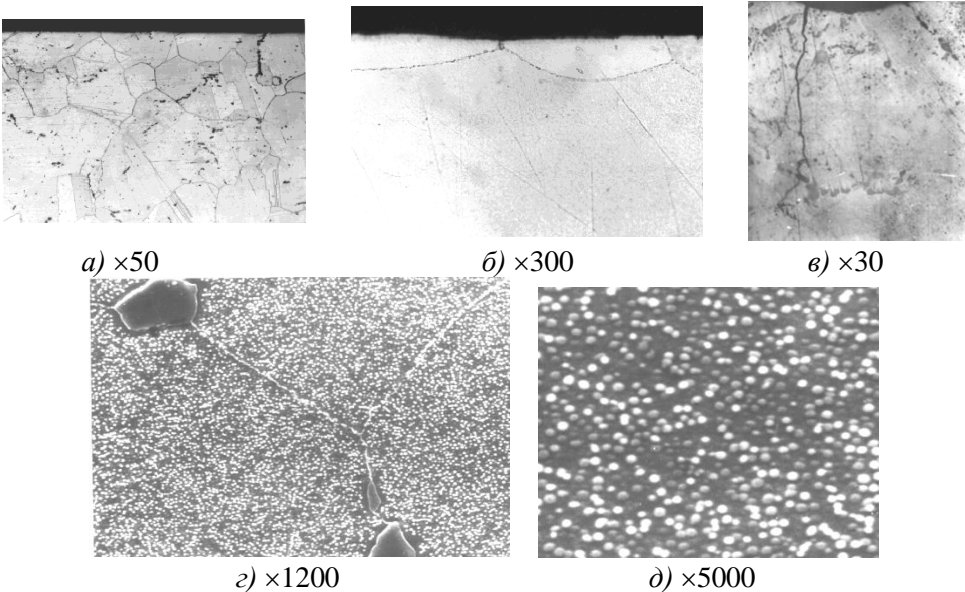


Рисунок 5.1 – Мікроструктура поверхневого шару зразків з нікелевого жароміцного сплаву ЕИ698-ВД (а, б, в – отримано на ПЕМ; з, д – на РЕМ)

Дослідження зломів матеріалів деталей після експлуатації та зразків після досліджень на втомленість

Фрактографія – дослідження зламів; в більш широкому сенсі - наука про будову поверхонь руйнування (від лат. *fractis* – злам). Розрізняють макро- і мікроскопічні методи дослідження поверхонь руйнування. Макроскопічна фрактографія – вивчення поверхонь зламів неозброєним оком або із застосуванням макрозбільшення $\times 20 \dots 60$. Мікроскопічний фрактографічний аналіз здійснюють із застосуванням світлових просвічуюючих (ПЕМ) і растрових (РЕМ) електронних мікроскопів. При використанні ПЕМ зображення поверхонь зламів отримують за допомогою реплік. РЕМ дозволяє безпосередньо вивчати поверхні руйнування без зняття реплік, та робити фотознімки, які називають фрактограмами (рис. 5.2).

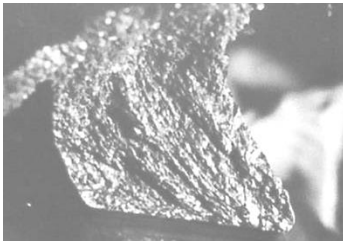
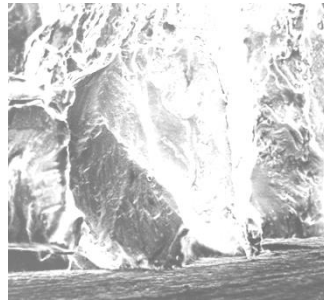
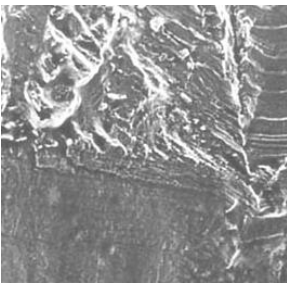
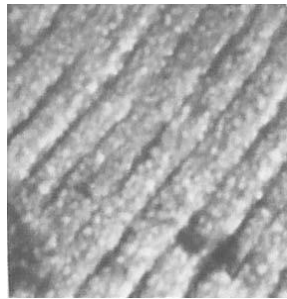
а) $\times 5$ б) $\times 200$ в) $\times 2500$ г) $\times 3500$

Рисунок 5.2 – Поверхня руйнування: загальний вид злому (а), осередок руйнування (б), змішане руйнування (в), втомні бороздки (г)

Світлова фрактографія зламу передбачає використання світлових мікроскопів із збільшенням $\times 200 \dots 1000$.

Основні типи рельєфу поверхні руйнування становлять предмет фрактографії, як науки: скол; квазіскол; ямки; гребені відриву; втомні бороздки; фасетки, інтеркристалітне (міжзеренне) руйнування; змішаний рельєф руйнування; рельєфи зламів, обумовлені хімічним і термічним впливом. Фрактографію застосовують для вивчення механізму та кінетики руйнування, для встановлення закономірності впливу структур і інших факторів на розвиток руйнування, визначення характеру і причин експлуатаційного руйнування тощо.

6 Тертя та дослідження трибологічних властивостей деталей і зразків

6.1 Загальні поняття трибології

Трибологія – це міждисциплінарна науково-технічна галузь, що вивчає закономірності тертя, зношування та змащування тіл, які перебувають у відносному русі та контакті. Термін походить від грецького *tribos* – тертя та *logos* – вчення. У машинобудуванні трибологія відіграє ключову роль, оскільки понад 70 % відмов машин і механізмів пов'язані саме з процесами зношування та тертя у контактних зонах.

Тертя є фундаментальним фізичним явищем, що супроводжує будь-який відносний рух твердих тіл або тіл і середовищ. Воно визначає енергетичні втрати, тепловиділення, зношення деталей, рівень шуму та вібрацій, а також впливає на коефіцієнт корисної дії машин і довговічність вузлів тертя.

Трибологічні властивості поверхонь – це сукупність характеристик, які визначають їхню поведінку в умовах контакту, навантаження та руху. До них належать коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування, контактна міцність, здатність до утримання мастильного матеріалу, схильність до схоплювання та задирів.

Трибологічна система – складна трибодинамічна система, утворена унаслідок взаємодії тіл тертя, а також проміжного середовища і частини навколишнього середовища.

Триботехніка – наука про контактну взаємодію твердих тіл під час їх відносного руху, яка охоплює весь комплекс питань тертя, зношування і змащування машин.

Фізична природа тертя.

Тертя (за ДСТУ 2823-94) – явище опору відносному переміщенню, яке виникає між двома тілами в зонах їх поверхонь, тангенціально до них.

Парами тертя можуть бути різноманітні деталі машин із металів, композитів, і полімерів або інструменти, які оброблюють поверхню матеріалу.

Мастильним матеріалом може бути будь-яка речовина, яка знижує коефіцієнт тертя між частинами твердих тіл.

Сучасні уявлення про тертя базуються на поєднанні механічної,

молекулярної та енергетичної теорій. Реальні поверхні мають мікронерівності (див. практичну роботу №1), тому контакт між ними відбувається не по всій номінальній площі, а лише в окремих мікроконтактних ділянках.

Сила тертя формується як результат:

- механічного зачеплення мікронерівностей;
- адгезійної взаємодії між контактуючими поверхнями;
- пластичної та пружної деформації матеріалу у зонах контакту;
- руйнування та зсуву мікрозварювальних містків.

У процесі тертя відбувається перетворення механічної енергії у теплову, що призводить до локального підвищення температури, структурних змін у приповерхневому шарі та прискорення зношування.

Залежно від умов контакту та характеру руху розрізняють такі основні види тертя (рис. 6.1):

1. Тертя спокою – виникає між тілами до початку їх відносного руху.
2. Тертя ковзання – спостерігається при поступальному або обертальному русі одного тіла відносно іншого.
3. Тертя кочення – виникає при перекочуванні тіл, наприклад у підшипниках кочення.
4. Сухе тертя – відбувається за відсутності мастильного матеріалу.
5. Граничне тертя – реалізується при наявності на поверхні тонкої адсорбційної плівки мастила.
6. Рідинне (гідродинамічне) тертя – поверхні повністю розділені шаром мастила.
7. Змішане тертя – поєднує ознаки граничного та рідинного режимів.

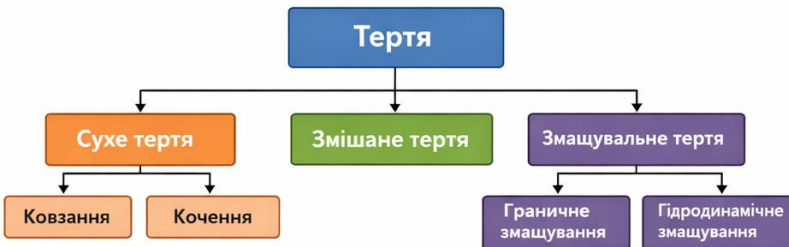


Рисунок 6.1 – Види тертя

Кожен із цих режимів характеризується власними значеннями коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування.

Коефіцієнт тертя та фактори впливу

Коефіцієнт тертя f – безрозмірна величина, що визначається як відношення сили тертя F до нормальної сили тиску N :

$$f = \frac{F}{N}$$

На значення коефіцієнта тертя впливають:

- матеріали контактної пари;
- шорсткість і хвилястість поверхонь;
- фізико-механічний стан поверхневого шару;
- контактний тиск;
- швидкість відносного руху;
- температура в зоні контакту;
- вид і властивості мастильного матеріалу (рис. 6.2).

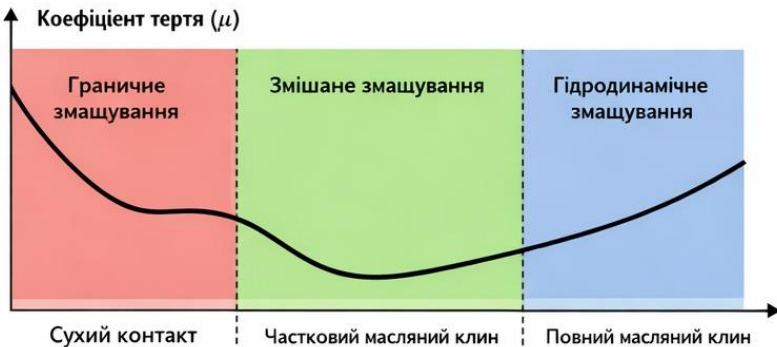


Рисунок 6.2 – Залежність коефіцієнта тертя від наявності масляного клину (крива Штрибека)

Зі зменшенням шорсткості коефіцієнт тертя, як правило, знижується, проте надмірно гладкі поверхні можуть сприяти зростанню адгезійної складової тертя.

6.2 Зношування та його основні різновиди

Зношування – процес відокремлення матеріалу від поверхні тертя твердого тіла і (чи) збільшення його залишкової деформації в умовах тертя, що виявляється у поступовому змінюванні розмірів, форми і (чи) маси тіла.

За ознакою природи взаємодії поверхонь тертя, яка обумовлює знос, розрізняють зношування:

- механічне;
- молекулярно-механічне;
- корозійно-механічне.

Знос – результат процесу зношування.

Інтенсивність зношування – відношення величини зносу до шляху тертя, вздовж якого відбувалося зношування.

Основні види зношування:

- *абразивне* – механічне зношування внаслідок дії твердих тіл або твердих частинок, які ріжуть чи дряпають поверхню матеріалу;

- *адгезійне* – зношування внаслідок локального з'єднання двох твердих тертьових тіл та глибинного виривання матеріалу з їхніх поверхневих шарів;

- *утомне* – зношування внаслідок руйнування від втоми в умовах багаторазового деформування мікрооб'ємів матеріалу поверхневого шару;

- *корозійно-механічне* – зношування при одночасному механічному та хімічному (корозійному) впливі на матеріал.

Інтенсивність зношування визначається швидкістю втрати маси або лінійних розмірів деталі за одиницю часу або шляху тертя.

6.3 Методи дослідження трибологічних властивостей

Дослідження тертя та зношування здійснюється за допомогою спеціальних трибологічних випробувальних установок – трибометрів.

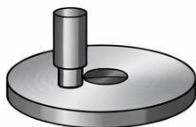
Найпоширеніші схеми випробувань (рис. 6.3):

- «площина – площина»;
- «кільце – кільце»;
- «диск – колодка»;

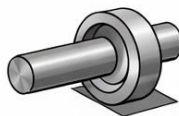
- «кулька – диск»;
- «вал – вкладиш».



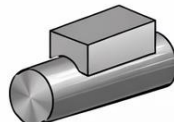
Шар – шар



Штифт – диск



Кільце – вал



Блок – циліндр

Рисунок 6.3 – Приклади методів трибологічних досліджень

У процесі випробувань визначають:

- коефіцієнт тертя;
- температуру в зоні контакту;
- інтенсивність та характер зношування;
- зміну шорсткості поверхні після випробувань;
- масову або об'ємну втрату матеріалу.

Випробування можуть проводитись у сухих умовах, з мастилом або в агресивному середовищі.

Ці дослідження мають важливе практичне значення і використовуються для:

- вибору матеріалів і покриттів пар тертя;
- оптимізації режимів обробки поверхонь;
- підбору мастильних матеріалів;
- прогнозування ресурсу вузлів машин;
- зниження енергетичних втрат і підвищення ККД механізмів.

Для суміжних деталей, що працюють парою у з'єднаннях і шарнірах, забезпечення сприятливих трибологічних властивостей є визначальним чинником довговічності та надійності.

Основні трибологічні формули.

1) Контакт Герца – для пружних тіл при стиску.

Контакт Герца описує розподіл тисків і розміри контактної області при пружній деформації тіл:

Для контактної пари двох сфер або сфера–площина:

$$a = \left(\frac{3FR}{4E^*} \right)^{1/3}$$

де a – радіус контактної плями, мм;

F – нормальна сила тиску, Н;

R – приведений радіус кривизни (мм),

E^* – приведений модуль пружності, що враховує властивості обох тіл:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

де E_1, E_2 – модулі пружності;

ν_1, ν_2 – коефіцієнти Пуассона тіл.

Це дає оцінку розміру контактної області і максимального тиску – фундаментальне для трибології навантаження в контактних парах.

2) Коефіцієнт тертя за Штрибеком

Штрибек встановив емпіричний зв'язок між коефіцієнтом тертя f та нормальним тиском (p):

$$f = f_o + k \cdot \ln\left(\frac{p}{p_o}\right)$$

де f – коефіцієнт тертя;

f_o – базове значення при тиску p_o ;

k – емпіричний коефіцієнт залежний від пари матеріалів.

Цю формулу використовують для **неповністю мастильних контактів**, де адгезійні складові тертя суттєво залежать від тиску.

4) Архард – для сухого тертя

Архард (Archard) дав класичну модель зношування при сухому терті:

$$V = k \frac{FN}{H}$$

де V – об'єм матеріалу, що зношений, мм³;

F – нормальне навантаження, Н;

N – довжина шляху тертя, мм;
 H – твердість матеріалу, Па;
 k – безрозмірний коефіцієнт зношування.

Ця формула дозволяє оцінити **інтенсивність зношування** як функцію навантаження і властивостей матеріалу.

Руйнування поверхонь тертя, що виявляється візуально або під мікроскопом, відбувається у вигляді окремих елементарних процесів, поєднання яких залежить від матеріалів і умов тертя.

Елементарні види руйнування поверхонь тертя

Мікрорізання.

При зануренні на достатню глибину тверда частинка абразиву або продукту зносу може зробити мікрорізання матеріалу з утворенням мікростружки. Мікрорізання під час тертя і зношування проявляється рідко, оскільки глибина занурення недостатня для різання за призначених навантажень.

Дряпання (пластичне відтіснення).

Вдавлена ділянка поверхні або частка при ковзанні відтісняє перед собою і в сторони і підминає під себе матеріал, залишаючи подряпину. Остання обривається під час виходу елемента, що впровадився, із зони фактичного контакту, у разі роздрібнення частинки, її впресовування або винесення за межі області тертя. Повторне дряпання однією трасою з тією самою інтенсивністю в парах тертя буває рідко, частіше відбувається дряпання, за якого зона пластичного відтиску перекриває подряпину, що утворилася раніше. Поверхня тертя покривається подряпинами, розташованими майже паралельно шляху ковзання, а між подряпинами розташовується матеріал, що зазнав багаторазової пластичної деформації, наклепаний і перенаклепаний, тобто вичерпав здатність пластично деформуватися. При навантаженні в такій ділянці легко утворюються тріщини, з розвитком яких матеріал відділяється від основи.

Очевидно, не тільки частинки, що ковзають, а й частинки, що перекочуються, можуть залишити на поверхні подряпини. Частинка, що впровадилася, впираючись під час свого руху в тверду складову матеріалу, може відхилитися в бік, і тому напрямок подряпини на поверхні не слідує суворо напряму переміщення деталі.

Відшаровування.

Матеріал під час пластичної течії може відтіснятися в бік від поверхні тертя і після вичерпання здатності до подальшої течії відшаровуватися. У процесі течії матеріал напливає на окисні плівки і втрачає зв'язок з основою. Якщо за лінійного і точкового контакту тїл напруга по глибині шару більша за опір втоми матеріалу, то під час роботи утворюються тріщини, які призводять до лускатого відокремлення матеріалу. Таке явище трапляється на загартованих або цементованих деталях. Дефекти металу у вигляді шлакових включень, вільного цементиту тощо і значні розтягувальні залишкові напруження сприяють відшаровуванню.

Викришування.

Це поширений вид пошкодження робочих поверхонь деталей в умовах кочення. Для викришування характерна довільна форма виразок із рваними краями.

Можуть викришуватися:

- тверді структурні складові сплаву після того, як зноситься його м'яка основа;
- частинки білого шару;
- острівці основної маси сірого чавуну, облямовані графітовими включеннями;
- частинки антифрикційного металічного шару за умови втомлюваних ушкоджень;
- тверді окисні плівки (на залізовуглецевих і алюмінієвих сплавах);
- частинки металізаційного покриття та ін.

Викрашуванню сприяють:

- високі розтягувальні залишкові напруги в поверхневому шарі після обробки;
- тріщини після цементації, загартування або старіння;
- значні термічні напруження, що виникають під час тертя або внаслідок незадовільного змащення.

Безпосередньо викришуванню передують утворення і розвиток тріщин, які обмежують поодинокі малі обсяги від решти матеріалу. Таким чином, тріщиноутворення є складовою частиною процесу викришування, а також відшаровування. Тріщиноутворення через термічну напругу може охопити значну площу і на певній стадії розвитку тріщин може навіть слугувати бракувальною ознакою, тому

воно повинно розглядатися як особливий вид пошкодження поверхонь тертя.

Глибинне виривання

Виникає при відносному русі тіл, що зчепилися, коли утворений внаслідок молекулярної взаємодії спай міцніший за один або обидва матеріали.

Руйнування відбувається в глибині одного з тіл. Поверхні руйнування у пластичних матеріалів являють собою витягнуті у напрямку руху *гребені*, що виступають, і *конуси*, що звужуються в глиб матеріалу. Прилегли до місць виривів ділянки пластично деформуються більшою чи меншою мірою. Вирваний матеріал залишається на сполученій поверхні. Це одна з причин перенесення матеріалу під час тертя.

Може спостерігатися процес схоплювання окремих складових сплаву, інші складові несуться в мастильний матеріал або йдуть із зони тертя.

Взаємне занурення, глибинне виривання, адгезія, заклинювання і впресовування продуктів зносу зумовлюють **перенесення матеріалу з однієї поверхні тертя на іншу**.

Перенесення матеріалу з однієї поверхні на іншу властиве всім видам тертя, окрім тертя під час рідинного змащування, і виявляється під час *таких технологічних операцій*, як:

- різання,
- клепання і збирання болтових з'єднань: метал переноситься з пневматичного молотка на заклепки, із ключа на гайки, з різця на метал.

Перенесення матеріалу відбувається окремими частинками, середній розмір яких має цілком певну величину для даних умов тертя. Тертя без змащувального матеріалу порівняно з тертям за граничного змащення може знизити перенесення у 20 000 разів і більше, головним чином за рахунок зменшення середнього розміру частинок. Перенесення матеріалу на металеву поверхню може відігравати роль стимулятора корозії металевої поверхні.

Перенесення матеріалу не характеризує знос поверхонь тертя. Перенесена частинка може багаторазово переходити з однієї поверхні тертя на іншу і назад. Знос буде в тому разі, якщо перенесена частинка піде із зони тертя. Це пов'язано з процесами прямого і зворотного переносів і залежить від кінцевого механізму відриву перенесеної

частинки, зокрема від її окиснення або ж від виникнення несприятливого напруження на межі розділу між частинкою і підкладкою. Перенесення металу є однією з необхідних умов забезпечення ВП (вибіркове перенесення).

Описаний механізм відображає процеси зношування незалежно від виду тертя і режиму змащення. Навіть у режимі тертя за рідинного змащення, що порушується в окремих ділянках поверхні, зношування протікає як за тертя без мастильного матеріалу і тертя за граничного змащення. В механізмах та агрегатах машин процес зношування може бути розчленований так само, як у парах тертя, на ті самі елементарні акти руйнування. На відміну від пар тертя інструмент, робочі органи машин у кожен момент часу взаємодіють із новими поверхнями оброблюваного матеріалу.

Основні характеристики процесів тертя і зношування:

Коефіцієнт тертя визначається за формулою:

$$f = F_{\text{тер}} / N$$

де $F_{\text{тер}}$ – сила тертя, Н;

N – нормальна сила, Н.

Інтенсивність зношування за лінійним зносом розраховується за формулою:

$$I_h = \Delta h / S$$

де Δh – лінійний знос зразка, мм;

S – шлях тертя, м.

Інтенсивність зношування за втратою маси матеріала розраховується за формулою:

$$I_m = \Delta m / S$$

де Δm – втрата маси зразка, мг; $\Delta m = m_1 - m_2$, m_1 – маса зразка до випробування, мг; m_2 – маса зразка після випробування, мг;

S – шлях тертя, м.

Для інтенсивності об'ємного зношування:

$$I_V = \Delta V / S = (\Delta m / \rho) / S$$

де ΔV – об'ємний знос, мм³;

Δm – втрата маси, г;

ρ – щільність матеріалу, г/см³.

Питомий знос (за одиницю шляху тертя на одиницю нормальної сили):

$$I_0 = \Delta V / (N \cdot S)$$

Для металевих матеріалів характерні наступні значення інтенсивності зношування для лінійного зносу:

- при граничному терті: $I_h = 10^{-8} \dots 10^{-6}$;
- при сухому терті: $I_h = 10^{-5} \dots 10^{-3}$.

У відповідності з ДСТУ 2823-94 «Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення», ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения» до триботехнічних характеристик матеріалів відносяться:

- сумісність при терті;
- прилеглисть при терті;
- здатність до поглинання твердих часток;
- припрацьовуваність;
- пристосованість;
- зносостійкість матеріалу;
- відносна зносостійкість матеріалу.

Сумісність при терті – властивість матеріалів тертьових тіл і мастильного матеріалу разом забезпечувати задані характеристики тертя та зношування та запобігати адгезії в умовах тертя.

Прилеглисть при терті – властивість матеріалу при терті збільшувати поверхню тертя пружним і пластичним деформуванням поверхневого шару.

Здатність до поглинання твердих часток – властивість матеріалу поглинати тверді частки, щоб зменшити їх дію різати та дряпати.

Припрацьовуваність - властивість матеріалів тертьових тіл в процесі припрацювання змінювати геометрію поверхонь тертя та

фізико-механічні властивості поверхневих шарів, внаслідок чого відбувається зменшення сили тертя та зносу.

Приспосовуваність – властивість трибосистеми в умовах зовнішнього впливу змінювати і стійко відтворювати свою структуру в енергетично вигідному напрямку.

Зносостійкість матеріалу – властивість матеріалу здійснювати опір зношуванню у визначених умовах тертя.

Відносна зносостійкість – відношення інтенсивності зношування одного матеріалу до інтенсивності зношування іншого в однакових умовах.

Аналіз структури відмов продукції машинобудування показує, що надійність і працездатність машин у цілому частіше визначається працездатністю їх фрикційних спряжень. Для об'єктивного контролю і прогнозування стану вузлів тертя на всіх стадіях їх життєвого циклу необхідно введення нормативних уніфікованих показників триботехнічної якості.

Комплексним і найбільш універсальним є *інтенсивність лінійного зношування* або *зносостійкість* спряження і його деталей (матеріалів) при випробуванні у регламентованому для кожного типу виробів стандартному режимі.

Тертя і зношування є невід'ємними процесами в роботі машин і механізмів. Комплексне дослідження трибологічних властивостей поверхонь дозволяє цілеспрямовано керувати якістю поверхневого шару, зменшувати втрати енергії, підвищувати ресурс деталей та забезпечувати стабільну експлуатацію машинобудівних виробів.

Перелік інформаційних джерел

1. Гаврилюк В. Г., Кукляк М.Л. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання. Навчальний посібник для студентів механічних та машинобудівних спеціальностей. К : УМКВО, 1990. - 210 с.
2. Бучинський М.Я., Горик О.В., Чернявський А.М., Яхін С.В. Основи творення машин. Харків : Вид-во «НТМТ», 2017. - 448 с.
3. Опір матеріалів. Підручник /Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський. За ред. Г. С. Писаренка - К.: Вища школа, 1993.
4. Термінологічний словник-довідник з трибології (український, російський, англійський): Навчальний посібник / [Богуслаєв В. О., Івченко Л. Й., Кубіч В. І., Фролов М. В.]; за заг. ред. Л. Й. Івченка – Запоріжжя : ПАТ «Мотор Січ», 2018. – 218 с.
5. Трибологія: підручник. / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є. В. Корбут. – К.: Вид-во Нац. Авіац. Ун-ту «НАУ-друк». 2009. -392 с
6. Pohanish, Richard P., and Christopher J. McCauley, eds. Machinery's Handbook Pocket Companion. Industrial Press Inc., 2000. - 352 p.
7. Musa, Hamldon. "Manufacturing engineering and technology." Pearson, 2009. - 1197 p.
8. Advances on mechanics, design engineering and manufacturing proceedings. Lecture notes in mechanical eEngineering. Springer International Publishing, 2016. - 1208 p.
9. Shajer, Gary S. Practical residual stress measurement methods. Wiley, 2013.
10. Colás, Rafael, and George E. Totten, eds. Encyclopedia of iron, steel, and their alloys (Online version). CRC Press, 2016.
11. Dr. Mark Krieg. Chemical, thermal or mechanical processes. International Surface Technology. 2008. №1. P. 52-54.
12. ДСТУ 2860–94 Надійність техніки. Терміни та визначення.
13. ДСТУ 2413-94 Основні норми взаємозамінності. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення.
14. ДСТУ ISO 4287:2012 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури.
15. ДСТУ ISO 6507-1:2007 Матеріали металеві. Визначення

твердості за Віккерсом. Метод випробування.

16.ДСТУ 2494-94 Метали. Оброблення зміцнювальне. Терміни та визначення.

17.ДСТУ 2824-94 Розрахунки та випробування на міцність. Види і методи механічних випробувань. Терміни та визначення.

18.ДСТУ 2825-94 Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять.

19.ДСТУ 2823-94 "Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення".

20.ДСТУ 7787:2015 "Забезпечення зносостійкості виробів. Метод випробування матеріалів на зношування під час фретингу та фретинг-корозії".

21.ДСТУ 2860-94 "Надійність техніки. Терміни та визначення".

22.ДСТУ 2962-94 "Організація промислового виробництва".

23.ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT + ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT).

24.ISO 468:1982 Surface roughness - Parameters, their values and general rules for specifying requirements.

Рекомендовані інформаційні ресурси

1. Шорсткість поверхонь. Техніка [Електронний ресурс] / https://stud.com.ua/72514/tehnika/shorstkist_poverhon#goog_rewarded – Назва з екрану.

2. Загальні відомості про напруження і деформації. Ukraineana [Електронний ресурс] / <https://www.scribub.com/limba/ucraineana/52748.php> – Назва з екрану.

3. Розрахунок на опір втомі. [Електронний ресурс] / <http://bcoreanda.com/ShowObject.aspx?ID=109> – Назва з екрану.