

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни

**«Дослідження фізичних та механічних властивостей
конструкцій»**

для студентів спеціальності
G9 «Прикладна механіка»
освітньої програми «**Технології машинобудування**»
галузі знань G «Механічна інженерія»
всіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Дослідження фізичних та механічних властивостей конструкцій» для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» галузі знань G«Механічна інженерія» всіх форм навчання / Укл.: Гончар Н.В., Кондратюк Е.В. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025 – 38 с.

Укл.: Гончар Н.В., доцент, канд. техн. наук, доц. каф. ТМБ
Кондратюк Е.В., канд. техн. наук, доцент

Рецензент: Козлова О.Б., доц., к.т.н., доц. каф. ТМБ

Відповідальний за випуск: Дядя С.І., доц., к.т.н.

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**Лабораторна робота 1**

Дослідження параметрів шорсткості поверхні плоских лабораторних зразків	4
---	---

Лабораторна робота 2

Визначення параметрів наклепу шляхом вимірювання мікротвердості «косого» шліфа	10
--	----

Лабораторна робота 3

Дослідження напруженого стану поверхневого шару	14
---	----

Лабораторна робота 4

Визначення параметрів витривалості плоских лабораторних зразків з конструктивним концентратором напружень	17
---	----

Лабораторна робота 5

Дослідження мікроструктури поверхонь зразків та зломів матеріалів деталей після експлуатації та зразків після досліджень на втомленість	22
---	----

Лабораторна робота 6

Дослідження триботехнічних характеристик модельної трибологічної системи матеріалів	29
---	----

Рекомендована література	37
--------------------------------	----

Лабораторна робота 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПЛОСКИХ ЛАБОРАТОРНИХ ЗРАЗКІВ *

1.1 Мета роботи

1) навчитися проводити вимірювання параметрів R_a та R_z на профілометрі-профілографі «Accretech HandySurf 35-2»;

2) отримати профілограму поверхні плоского лабораторного зразка; вирахувати вертикальний та горизонтальний масштаб; окрім R_a та R_z додатково отримати значення таких параметрів шорсткості, як шаг мікропрофілю S_m , висота мікропрофілю t_m , опорну площу t_p , враховуючи масштаб, а також коефіцієнт технологічної концентрації напружень α_σ^{texn} .

1.2 Короткі теоретичні відомості

Сукупність мікронерівностей з відносно малими кроками, що утворюють рельєф поверхні в межах базової довжини l (рис. 1.1), являють собою шорсткість.

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 , α_σ^{texn}), що дають комплексну оцінку шорсткості.

Для оцінки всього комплексу цих показників необхідно записати профілограму поверхні на базовій довжині із значним вертикальним і горизонтальним збільшенням нерівностей (рис. 1.1).

Показник R_z спочатку оцінюють за профілограмою з використанням формули:

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

Для цього на профілограмі в межах базової довжини встановлюють 5 максимальних виступів і западин відносно середньої лінії l_m .

* – за основу практичної роботи №1 взято роботу Хорошкова В.Д. «Оцінка показників шорсткості за профілограмою поверхні».

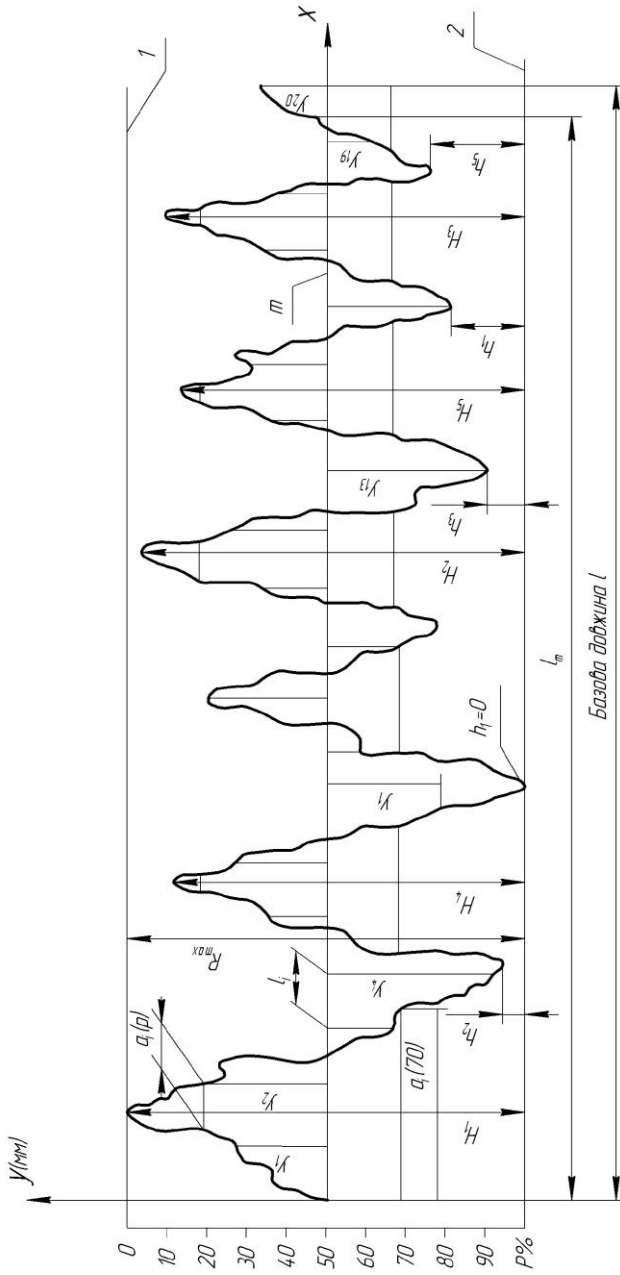


Рисунок 1.1 – Профілограма поверхні

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

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

Показник R_a за профілограмою визначають 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 – кількість вимірюваних відхилень на базовій довжині.

Приймають $n \geq 20$.

Дійсне значення R_a розраховують за формулою:

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

Показник R_{max} вимірюють так, як показано на рис. 1.1, і являє собою відстань між максимальними виступом і западиною. Дійсне значення цього показника розраховують за формулою:

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

Середній крок нерівностей S_m на профілограмі представляється довжиною відрізка середньої лінії l_m , що перетинає профіль в трьох сусідніх точках, його визначають 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 ${}^xV_x$ розраховують за формулою:

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

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).

Ті чи інші параметри шорсткості проставляються на робочих кресленнях деталей, на операційних ескізах, використовуються при порівняльному аналізі технологічних можливостей різних методів обробки поверхонь.

Для визначення показника радіуса западин ρ_m необхідно перетворити профілографу таким чином, щоб горизонтальний масштаб дорівнював вертикальному. Це можна зробити за допомогою CAD-пакетів, таких як КОМПАС, AutoCAD тощо. Після цього ρ_m розраховується за формулою:

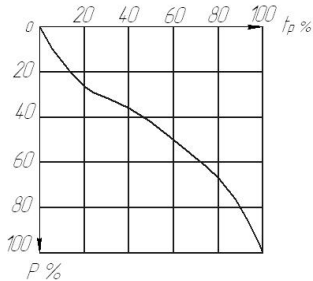


Рисунок 1.2 – Залежність опорної довжини від рівня мікропрофілю

$$\rho_{mn} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_{mi} \quad (1.10)$$

де ρ_{mi} – абсолютне значення радіусу i -ї западини перетвореної профілограми;

n – кількість вимірних радіусів западин на базовій довжині.

Дійсне значення ρ_m розраховується за формулою:

$$\rho_m = \frac{\rho_{mn}}{xV} \quad (1.11)$$

де V – загальний масштаб перетвореної профілограми.

Перед визначенням наступного параметру (α_{σ}^{mexn}) спочатку необхідно знайти параметр t_m таким чином: розраховують t_{mi} – середнє значення висоти двох виступів, що утворюють вимірювану i -ту западину. Параметр t_{mn} знаходять за формулою середньоарифметичного значення:

$$t_{mn} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{mi} \quad (1.12)$$

де n – кількість вимірних западин на базовій довжині.

Дійсне значення t_m розраховується за формулою:

$$t_m = \frac{t_{mn}}{xV_y} \quad (1.13)$$

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

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

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 .

1.3 Порядок виконання роботи

1.3.1 Приготувати до роботи прибори, що заміряють шорсткість.

1.3.2 Підготувати зразки.

1.3 Заміряти шорсткість різними методами, порівняти параметр R_a .

1.3.4 Записати горизонтальний і вертикальний масштаб профілограми та, враховуючи його, визначити параметри R_a , R_z , R_{max} , S_m , t_p .

1.3.5 Перетворити профілографу таким чином, щоб горизонтальний масштаб дорівнював вертикальному. Визначити параметри ρ_m ,

1.3.6 Порівняти визначені параметри з виміряними попередньо іншими методами.

1.4 Зміст звіту

- короткі теоретичні відомості;
- копія отриманої профілографи;
- протокол вимірювань;
- розрахунок параметрів та графік $t_p = f(p)$;
- висновки.

1.5 Контрольні питання

1. Які нерівності відносяться до шорсткості поверхні.
2. На які експлуатаційні властивості поверхні деталей та їх сполучень впливає шорсткість.
3. Якими методами вимірюється шорсткість.
4. Як розраховується показник R_z .
5. Як розраховуються показники R_a і S_m .
6. Як оцінити показник t_p .
7. Як визначити показники ρ_m , t_m , α_{σ}^{mexn} .
8. Як оцінити плавність профілю і його вплив на експлуатаційні властивості деталей.

Лабораторна робота 2

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАКЛЕПУ ШЛЯХОМ ВИМІРЮВАННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ «КОСОГО» ШЛІФА

2.1 Мета роботи

- 1) навчитися користуватись мікротвердоміром типу ПМТ-3 «Мікротвердомір Віккерса Мікротех HVA-1» вираховувати масштаб оптичного збільшення та визначати мікротвердість по середньому значенню діагоналі відбитка за номограмами або таблицями;
- 2) визначити глибину проведення вимірів мікротвердості за кутом «косого» шліфа;
- 3) визначити параметри наклепу, такі як глибина залягання та величина наклепу, залежність $S_H = f(h_n)$.

2.2 Короткі теоретичні відомості

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 алмазної пірамідки під навантаженням менше 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. 2.1) забезпечує можливість вибору ділянки мікроструктури, де буде зроблено втискування; 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.



Рисунок 2.1 – М-400-Н
фірми «LECO»

Вимірювання мікротвердості проводять відповідно до вимог ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» за методом відновленого відбитка.

Для вимірювання мікротвердості застосовують сучасні програми аналізу мікротвердості.

Прикладом такої програми є аналізатор мікротвердості *ImageExpertTM MicroHardness 2*. При необхідності проведення множинних вимірювань мікротвердості продуктивність може бути істотно підвищена за рахунок автоматизації апаратно-програмного комплексу. 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.

Наклеп – локальне зміцнення поверхневих шарів матеріалу (зміна структури і відповідно властивостей металів і сплавів в результаті пластичної деформації), який визначають по глибині за допомогою замірів мікротвердості на скошеній поверхні «косого» шліфа за формулою:

$$S_H = \frac{H_\mu^e - H_\mu^c}{H_\mu^c} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

де H_μ^e – середнє значення вимірної мікротвердості, МПа;

H_μ^c – мікротвердість серцевини, МПа.

При досягненні деякої глибини заміри мікротвердості дають постійне значення – це ознака серцевини металу. І це – значення мікротвердості серцевини H_μ^c .

Для прискореної оцінки зміцнюючих методів поверхнево-пластичного деформування ступінь наклепу визначають на поверхні без виготовлення «косого» шліфа і розраховують за формулою:

$$S_H = \frac{H_\mu^{нов} - H_\mu^{вих}}{H_\mu^{вих}} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

де $H_\mu^{вих}$ – вихідна мікротвердість поверхні, МПа;

$H_\mu^{нов}$ – мікротвердість поверхні після обробки, МПа.

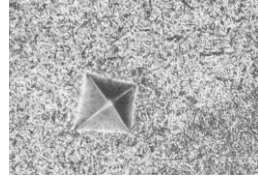


Рисунок 2.2 – Відбиток алмазної пірамідки

Наклеп металу буває результатом дії зовнішніх деформуючих сил (деформаційний наклеп) або фазового перетворення (фазовий наклеп). Структура наклепаного металу характеризується наявністю переважно орієнтованих кристалів (текстур) і підвищеною щільністю дислокацій. Наклеп супроводжується збільшенням міцності і твердості і пониженням пластичності і в'язкості.

У техніці наклеп використовується для поверхневого зміцнення деталей. Крім того він призводить до виникнення у поверхневому шарі деталі сприятливої системи залишкових напружень, вплив яких головним чином і визначає високий зміцнюючий ефект поверхневої пластичної деформації, що виражається в підвищенні втомної міцності, а іноді і зносостійкості.

2.3 Порядок виконання роботи

2.3.1 Підготувати пристрій ПМТ-3 до роботи. Вага навантаження – 100 Гс. Помити та протерти поверхню шліфа.

2.3.2 Відмітити рівні замірів відмітками по глибині шару на скошений (робочій) поверхні «косого» шліфа.

2.3.3 Зробити по 15 замірів діагоналі відбитку алмазної пірамідки d_{ki} (де k – номер рівня по глибині, i – порядковий номер заміру) на кожному з відмічених рівнів робочої поверхні шліфа.

2.3.4 Визначити кут скосу досліджуваної поверхні шліфа. За допомогою кута визначити глибину шару h_k під поверхнею для кожного з рівнів замірів.

2.3.5 Визначити середньоарифметичне значення замірів $\bar{d}_k$ діагоналі по кожному з k рівнів у відносних одиницях (кількості відсічок окуляра мікроскопу).

2.3.6 Розрахувати значення оптичного збільшення мікроскопу. Перерахувати середнє значення діагоналі по кожному з рівнів в мікрметри (з відносних одиниць).

2.3.7 За допомогою таблиць або номограм [2] визначити значення мікротвердості $H\mu_k$ по кожному з k рівнів глибини шару.

2.3.8 Побудувати графік залежності мікротвердості від глибини поверхневого шару $H\mu = f(h)$. Визначити загальну глибину дефектного або зміцненого шару і глибину початку серцевини матеріалу.

2.3.9 Визначити ступінь поверхневого наклепу на поверхні та по глибині поверхневого шару. Побудувати графік залежності $S_H = f(h)$.

2.3.10 Виконуючи пункти 2.5-2.9 бажано використовувати математичні комп'ютерні пакети Excel, MathCAD тощо.

2.4 Зміст звіту

- короткі теоретичні відомості;
- протокол замірів діагоналі відбитків;
- перерахунок для отримання значень глибини;
- мікротвердості та ступеня наклепу;
- отримані графіки;
- висновок.

2.5 Контрольні питання

1. В чому полягає відмінність мікротвердості від твердості.
2. Чому необхідно робити 15 замірів на одному рівні.
3. Етапи визначення мікротвердості. Яким чином знаходять величину діагоналі відбитку.
4. З якою метою використовують «косий» шліф. Яким чином його отримують. Який кут скосу зазвичай забезпечують, від чого він залежить.
5. Як за допомогою кута скосу шліфа визначають глибину проведення замірів мікротвердості.
6. Як визначити границю (по глибині) між дефектним шаром і серцевиною матеріалу.
7. Поняття поверхневого наклепу, його параметри і методи їх визначення.

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

3.1 Мета роботи

- 1) ознайомитись з методом Давіденкова М.М. визначення залишкових напружень за допомогою пошарового з травлювання досліджуваної поверхні зразків на пристрої для визначення залишкових напружень «ПВЗН-2» та з складами розчинів для різних матеріалів;
- 2) отримати стрічку самопишучого пристрою залежності вигину консольного закріпленого зразка від часу травлення;
- 3) навчитися визначати глибину видаленого травленням шару за допомогою стрічки самопишучого пристрою, часу травлення (інтенсивності) та різниці ваги зразка до початку експерименту і після нього;
- 4) розрахувати за формулами Біргера І.А. значення всіх складових залишкових напружень кожного рівня та отримати епюру розподілу залишкових напружень по глибині поверхневого шару.

3.2 Короткі теоретичні відомості

Залишковими напруженнями прийнято називати такі напруження, які існують і врівноважуються всередині твердого тіла, збірної або зварної конструкції після усунення причин, що спричинили їх появу. Ці напруження завжди внутрішні, і їх виникнення завжди пов'язано з неоднорідними лінійними або об'ємними деформаціями в суміжних об'ємах матеріалу.

Залишкові напруження ділять на три роди, класифікуючи їх за дожиною створюваного ними силового поля:

- І роду – врівноважуються в макрооб'ємах (у межах деталі);
- ІІ роду – врівноважуються в мікрооб'ємах (в межах кристалітів структури або блоків зерен металу);
- ІІІ роду – врівноважуються в субмікрооб'ємах (в межах кристалічної решітки). Такі визначення залишкових напружень вперше в 1935 році дав Давіденков М.М.

Найменшу похибку вимірювання залишкових напружень дає метод пошарового травлювання металу (метод Давіденкова). Найчастіше для цього метода використовують зразки прямокутної форми (рис.3.1), отримані електроерозійним розрізанням, щоб не наводити додаткові напруження від механічної обробки. Іноді такі зразки вирізають з деталей більш складної конфігурації.

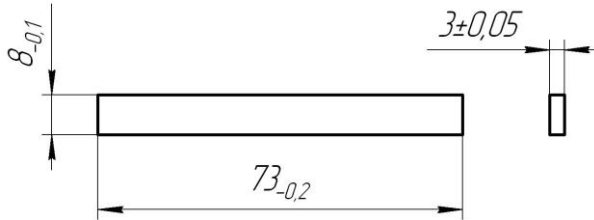


Рисунок 3.1 – Ескіз зразка для досліджень залишкових напружень

Поверхню для дослідження залишають незмінною, інші – покривають лаками і воском. В якості електроліта для нікелевих сплавів використовують суміш, що складається з H_3PO_4 (50%), H_2SO_4 (30%), H_2O (20%). Після стравлювання напруження «вивільнюються», зразок вигинається. 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 зразок перед випробуванням та після нього. Стравлено шар прямокутного перерізу, різність мас поділяють на щільність, отримують об'єм, а з нього і з відомих довжини і ширини зразка знаходять глибину видаленого шару. По стрічці 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 (приклад див. рис. 3.2).

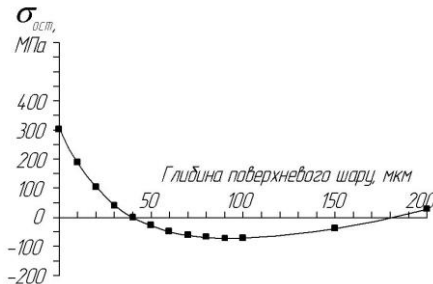


Рисунок 3.2 – Епюра залишкових напружень поверхні після протягання

3.3 Порядок виконання роботи

3.3.1 Вивчити принцип дії прибору для дослідження залишкових напружень ПИОН-2 та метод Давіденкова М.М.

3.3.2 Ознайомитись із складом розчинів, що розтравлюють різні метали та сплави, а також з технікою безпеки під час роботи з розчинами.

3.3.3 Підготувати зразки, зважити їх. Покрити лаком Цапон, висушити. Зняти лак ацетоном з поверхні, що буде досліджуватись.

3.3.4 Закріпити в зняте з пристрою затискне пристосування хвостовик зразка. Покрити воском відкриті поверхні нижньої частини затискного пристрою, що буде занурено в розчин разом із зразком.

3.3.5 Отримати стрічку прогину зразка від часу травлення.

3.3.6 Видалити з поверхонь зразка віск та лак, промити їх та знову зважити. Визначити вагу стравленої частини зразка, її об'єм, і з цього – глибину знятого шару. Перерахувати довжину отриманої стрічки у відповідності до глибини травленого шару. Розрахувати значення залишкових напружень по глибині 2,5,10,20,30...80,90,100,150,200 мкм.

3.3.7 Викреслити епюру розподілу залишкових напружень по глибині поверхневого шару. Проаналізувати її.

3.4 Зміст звіту

- короткі теоретичні відомості;
- копія отриманої стрічки;
- розрахунок глибини стравленої частини шару;
- залежності довжини стрічки по глибині значень $\sigma_{ост}$;
- епюра залишкових напружень; висновок.

3.5 Контрольні питання

1. Методи визначення залишкових напружень. Класифікація, залишкові напруження I, II та III роду, їх ознаки.

2. Визначення глибини стравленого шару.

3. Мета покриття зразка лаком, а затискача – воском.

4. Чому температура розчину під час проведення експерименту не повинна перевищувати 50...53 °C.

5. Чому залишкові напруження стиснення підвищують експлуатаційні властивості деталей.

6. Яким чином переводять значення вигину зразка під час травлення в значення залишкових напружень.

Лабораторна робота 4

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИТРИВАЛОСТІ ПЛОСКИХ ЛАБОРАТОРНИХ ЗРАЗКІВ З КОНСТРУКТИВНИМ КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРУЖЕНЬ

4.1 Мета роботи

1) провести серію експериментальних досліджень на витривалість методом «сходинок» партії плоских лабораторних зразків на п'єзоелектричному вібростенді «Micad-4», заповнити протокол досліджень;

2) за допомогою методу найменших квадратів розрахувати коефіцієнти лівої частини лінії кривої втомленості;

3) визначити границю витривалості, як критерія опору втомленості, накреслити праву горизонтальну лінію кривої втомленості для базової кількості циклів $2 \cdot 10^7$ цикл;

4) за графіком тарування визначити рівень напруження в небезпечному перерізі для кожного зразка партії, враховуючи масштаб оптичного збільшення при вимірі амплітуди коливань торця зразка.

4.2 Короткі теоретичні відомості

Втомленість – процес поступового накоплення пошкоджень матеріалу під дією перемінних напружень, що призводять до зміни його властивостей, зародженню та розвитку тріщин та до руйнування.

Опір втомленості – властивість матеріалу протистояти втомленості.

Тріщина – порушення цілісності матеріалу об'єкта у вигляді щілинного розриву.

Втомна тріщина – частковий розділ матеріалу під дією перемінних напружень. Швидкість росту втомної тріщини – відношення приросту довжини втомної тріщини до інтервалу часу (час можна вимірювати кількістю циклів навантаження).

Руйнування – розділ матеріалу об'єкта на частини з повною втраченою міцності та працездатності.

Втомне руйнування – руйнування матеріалу навантаженого об'єкта до повної втрати його міцності або працездатності через ріст втомної тріщини.

Втомний злом – поверхня розділу, що виникає при втомному руйнуванні об'єкта.

Долом – частина втомного злому, що виникає в останній стадії руйнування через недостатню міцність перерізу по тріщині.

Випробування на втомленість – випробування, під час яких визначають кількісні характеристики опору втомленості.

Незруйнований зразок – випробуваний зразок, циклічна довговічність якого вище бази випробувань.

Тривалість випробувань – час витримки навантаженого зразка в режимі випробувань (можна вимірювати кількістю циклів навантаження або інтервалом часу).

Випробування виконують відповідно ГОСТ 25.502-79 «Методы механических испытаний. Методы испытания на усталость». Перед проведенням випробувань виконують динамічне тарирування зразків при кімнатній температурі для встановлення залежності напружень в досліджуваному перерізі зразка від амплітуди коливань. В зоні концентратора напружень зразка встановлюють попередньо відкалібровані тензодатчики з базою $L = 3$ мм и опором 200 Ом, які підключають до тензометричного підсилювача ТУП-5У, що з'єднано з цифровим вольтметром В7-27.

Лабораторні зразки (рис. 4.1) в даному випадку взяті з концентратором напружень, що локалізує місце появи тріщини. Ознаки зародження та росту тріщини визначають по інтенсивності зниження частоти власних коливань зразка. База випробувань $N_0 = 2 \cdot 10^7$ цикл.

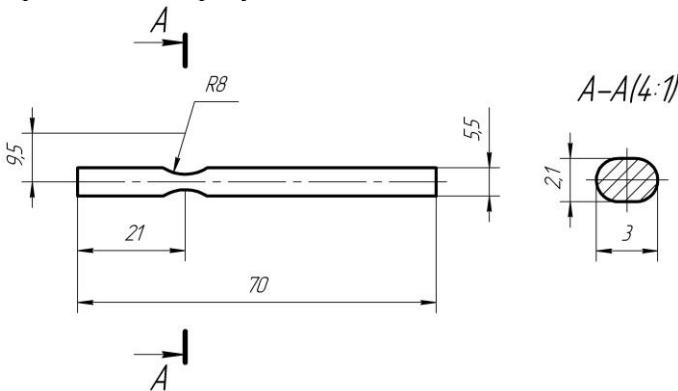


Рисунок 4.1 – Ескіз лабораторного зразка для випробувань на втомленість

Заповнюють протоколи випробувань (табл. 4.1). Результатом випробувань є крива втомленості, що складається з двох частин – лівої та правої (рис. 4.2). Для отримання лівої лінії випробують зразки при напру-

женнях, набагато вищих очікуваної границі витривалості. Криву втомленості креслять в напівлогарифмічних координатах $\sigma - \lg(N)$. Ліву частину кривої втомленості описують рівнянням (в напівлогарифмічних координатах):

$$\sigma(N) = b - k \cdot \lg(N) \quad (4.1)$$

де N – кількість циклів;

k – кутовий коефіцієнт;

b – лінійний коефіцієнт.

Таблиця 4.1 – Протокол випробувань на втомленість (при 20°C) партії №1 зразків з сплаву ЗІІ698-ВД після протягування

№ зразка	σ , МПа	Кількість циклів, млн	Примітка
1	210	20,0	не зруйнувався
2	210	12,2	зруйнувався
3	190	18,5	зруйнувався
4	190	15,6	зруйнувався
5	170	20,0	не зруйнувався
6	330	0,28	зруйнувався
7	230	1,37	зруйнувався
8	170	20,0	не зруйнувався
9	170	20,0	не зруйнувався
10	290	0,36	зруйнувався

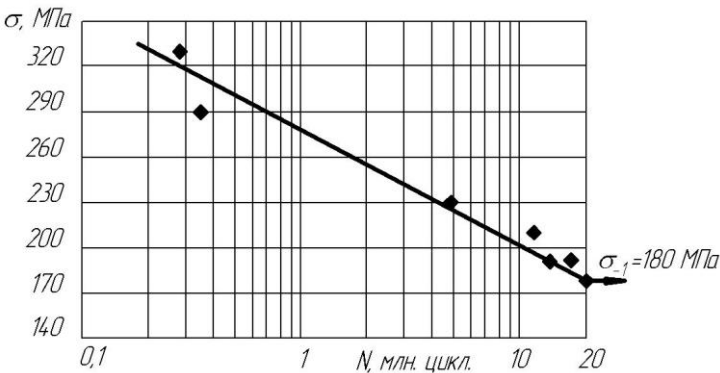


Рисунок 4.2 – Крива втомленості партії зразків №1 після протягування

Коефіцієнти k та b розраховують за довговічністю зруйнованих зразків партії методом найменших квадратів [7].

Границю витривалості σ_{-1} на базі N_0 (права частина кривої втомленості) визначають для трьох незруйнованих зразків при заданому рівні напружень циклу σ_a .

4.3 Порядок виконання роботи

4.3.1 Ознайомитись з конструкцією і принципом дії віброелектростенду ВЕДС-100 та електронним забезпеченням автоматичної підтримки режиму резонансних коливань.

4.3.2 Провести розрахунок в комп'ютерному міцностному пакеті ANSYS – створити трьохвимірну модель зразка (модель матеріалу, що відповідає жароміцному нікелевому сплаву ЭИ698-ВД), прикласти граничні умови і, змінюючи амплітуду вигину зразка, визначити залежність величини максимальних напружень в концентраторі (місці з найбільшою вірогідністю появи втомної тріщини); накреслити графік залежності $\sigma = f(2A)$; порівняти з графіком тарирування, отриманому за допомогою тензодатчиків.

4.3.3 Закріпити зразок за хвостовик в ложемент, ложемент – в тискне пристосування, а його, в свою чергу, встановити в головку вібратора та закріпити за допомогою болта.

4.3.4 Провести випробування на втомленість партії лабораторних зразків методом «сходинок» на базі $2 \cdot 10^7$ циклів, заповнюючи протокол випробувань; визначати момент зародження втомної тріщини по різкому падінню частоти резонансних коливань.

4.3.5 Амплітуду перерахувати в міліметри, враховуючи коефіцієнт оптичного збільшення мікроскопу.

4.3.6 По зруйнованим зразкам за методом найменших квадратів визначити коефіцієнти b і k нахилу лівої лінії кривої втомленості.

4.3.7 По незруйнованим зразкам визначити границю витривалості σ_{-1} партії зразків та накреслити криву втомленості в напівлогарифмічній системі координат $\sigma - \lg(N)$.

4.3.8 Проаналізувати параметри витривалості даної партії зразків.

4.4 Зміст звіту

- короткі теоретичні відомості;

- ілюстрація з результатом розрахунку в ANSYS;
- ескіз закріплення зразка;
- протокол досліджень;
- графічне зображення метода «сходинок»;
- розрахунок амплітуди та коефіцієнтів;
- роздруківка комп'ютерного розрахунку;
- тарировальний графік;
- крива втомленості;
- висновок.

4.5 Контрольні питання

1. Основні поняття – надійність, витривалість, довговічність, опір втомленості.
2. Основні функціональні елементи обладнання для випробувань на витривалість. ВЭДС-100, ВЭДС-200.
3. Суть метода «сходинок». Проілюструвати.
4. Визначення границі витривалості – критерія опору втомленості.
5. Яку інформацію несе ліва частина кривої втомленості, накресленої в логарифмічній або напівлогарифмічній системі координат, яку – її права частина.
6. Яким чином проводять парировання зразків, його мета.
7. Принцип дії тензодатчиків. Що означає термін «припарировання» тензодатчиків, база тензодатчиків.
8. Яким чином визначають момент зародження і початку росту тріщини під час випробувань.
9. Допоміжне обладнання, що використовується при дослідженнях витривалості.
10. Етапи отримання кривої втомленості.

Лабораторна робота 5

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ПОВЕРХОНЬ ЗРАЗКІВ ЗЛОМІВ МАТЕРІАЛІВ ДЕТАЛЕЙ ПІСЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ЗРАЗКІВ ПІСЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ВТОМЛЕНІСТЬ

Частина 5.1. МІКРОСТРУКТУРИ ПОВЕРХОНЬ ЗРАЗКІВ

5.1.1 Мета роботи

1) при різних оптичних збільшеннях навчитися аналізувати структуру поверхонь зразків (величину зерен, їх текстуру; наявність міжзерених виділень, наприклад, карбідів, або скупчення часток однієї з фаз; морфологію однієї з фаз, наприклад жароміцної інтерметалідної γ' -фази: форму часток фази, їх розмір та кількість на різній глибині під поверхнею); визначати масштаб збільшення фотографій, отриманих на металографічному мікроскопі "ММТ-5Ц;

2) проаналізувати текстуру зерен при невеликих рівнях збільшення $\times 100 \dots 200$ разів;

3) при збільшенні $\times 5000 \dots 10000$, дослідити морфологію γ' -фази в шліфі зразка із сплаву ЭИ698-ВД.

5.1.2 Короткі теоретичні відомості

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 складки 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 (ААЗ). Хоча єдиного стандарту на ці методи поки немає, проте автоматичні аналізатори зображення вдосконалюються з кожним днем.

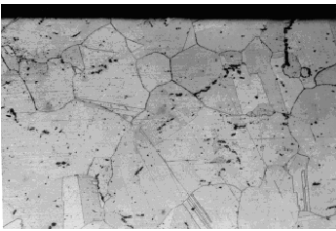
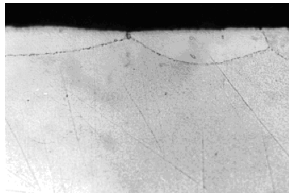
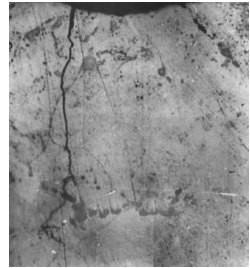
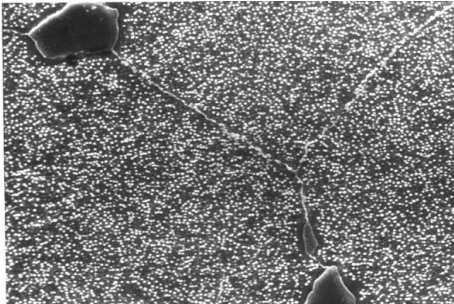
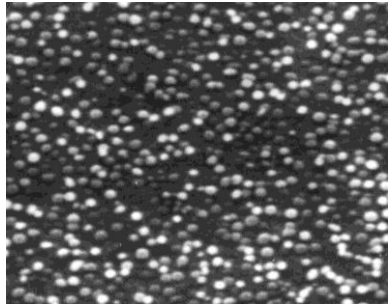
а) $\times 50$ б) $\times 300$ в) $\times 30$ з) $\times 1200$ д) $\times 5000$

Рисунок 5.1 – Мікроструктура поверхневого шару зразків з нікелевого жароміцного сплаву ЭИ698-ВД (а,б,в – отримано на ПЕМ; в,з – наРЕМ)

5.1.3 Порядок виконання роботи

5.1.3.1 Ознайомитись з принципом дії растрового електронного мікроскопу, його допоміжними функціями.

5.1.3.2 Підготувати зразки до досліджень, промити шліфи.

5.1.3.3 Встановити зразки в герметичну камеру, відкачати повітря.

5.1.3.4 Визначити коефіцієнт збільшення, або масштаб за отриманими фотографіями.

5.1.3.5 При невеликих збільшеннях $\times 100 \dots 200$ дослідити величину зерен, їх текстуру; форму тріщини, її розповсюдження (міжзеренне, магистральне тощо).

5.1.3.6 При збільшенні $\times 5000 \dots 10000$ дослідити морфологію γ' -фази в сплаві ЭИ698-ВД; форму часток, їх розмір, розподіл в матриці сплаву по глибині.

5.1.3.7 Розбити знімок на декілька «полів зору» і в кожному вирахувати кількість часток жароміцної фази, розділених по різним діапазонам розмірів – малі, середні, великі; за середнім розміром отримати відсоток площини (як порівняльний параметр, що характеризує кількість і розмір часток фази), яку займає досліджувана фаза.

5.1.4 Зміст звіту

- короткі теоретичні відомості;
- аналіз мікроструктури шліфів за фотографіями з невеликим та великим збільшенням,
- таблиця з результатами розрахунку кількості часток різного розміру по полях зору, відсотка площини, що займає фаза, від поверхні шліфа;
- висновок.

5.1.5 Контрольні питання

1. Методи дослідження мікроструктури металів і сплавів. Їх особливості, переваги та недоліки.
2. Основні елементи конструкції растрового мікроскопу JSM T300, принцип дії. Його додаткові можливості.
3. Яким чином готують шліфи під різні дослідження: дослідження текстури зерен, морфології поверхні, розподілу фаз, мікроструктури по глибині підповерхневого шару, морфологію фаз.
4. Додаткові етапи підготовки зразків, такі як травлення, декорування тощо. Їх мета.
5. Що таке «поле зору» при порівняльному дослідженні вмісту фази в матриці сплаву. За яким принципом обирають кількість полів зору.
6. Етапи визначення відсотка площини, яку займає досліджувана фаза на ділянці шліфа, що вивчається.
7. Які складові параметри входять до поняття «морфологія» фази.

8. Переваги та недоліки растрових електронних мікроскопів.

Частина 5.2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЛОМІВ МАТЕРІАЛІВ ДЕТАЛЕЙ ПІСЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ЗРАЗКІВ ПІСЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ВТОМЛЕНІСТЬ

5.2.1 Мета роботи

- 1) навчитись на фрактограмах визначати масштаб оптичного збільшення растрового електронного мікроскопу;
- 2) навчитись визначати місце розташування очага руйнування та можливу причину руйнування даного зразка або деталі;
- 3) розрізнати на фрактограмах зони крихкого, в'язкого та змішаного руйнування; границі долому.

5.2.2 Короткі теоретичні відомості

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 просвічуючих (ПЕМ) і растрових (РЕМ) електронних мікроскопів. Світлова фрактографія зламу передбачає використання світлових мікроскопів із збільшенням $\times 200 \dots 1000$. 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. 6.1).

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.

5.2.3 Порядок виконання роботи

5.2.3.1 Повторити правила роботи з растровим електронним мікро-

скопом JSM T300.



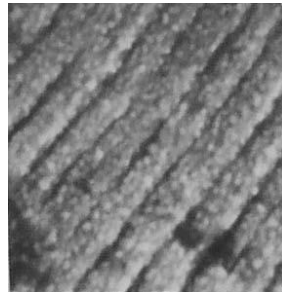
а) $\times 5$



б) $\times 200$



в) $\times 2500$



г) $\times 3500$

а – загальний вид злому, б – очаг руйнування, в – змішане руйнування, г – втомні бороздки

Рисунок 5.2 – Поверхня руйнування:

5.2.3.2 Підготувати зруйновані зразки для досліджень. При необхідності доламати зразки із нерозвиненою тріщиною, що зародилась і почала рости під час випробувань на втомленість, але не була доведена до повного руйнування. Долом необхідно зробити ретельно, не зачепивши області вже існуючої тріщини та її очага.

5.2.3.3 Отримати фрактограми різних зон тріщини із необхідним збільшенням.

5.2.3.4 Визначити фактичний коефіцієнт збільшення.

5.2.3.5 Знайти на фрактограмах очаг (або кілька очагів) – місце зародження тріщини. З'ясувати можливу причину появи тріщини саме в цьому місці.

5.2.3.6 Визначити різні зони і види руйнування: крихке, в'язке, змішане; наявність бороздок або площин руйнування, їх розміри із врахуванням коефіцієнту збільшення фрактограм.

5.2.3.7 Знайти границю долому зразка при її наявності.

5.2.3.8 Проаналізувати подібність зародження та розповсюдження тріщини деталей під час експлуатації і натурних зразків після випробувань на втомленість з забезпеченням максимально можливих еквівалентних експлуатаційних навантажень.

5.2.4 Зміст звіту

- короткі теоретичні відомості;
- фрактограма з позначенням місця зародження тріщини;
- аналіз зон руйнування;
- розрахунок величини борідок або площин руйнування;
- висновок.

5.2.5 Контрольні питання

1. Поняття «фрактографія», «фрактограма».
2. Мета проведення фрактографії.
3. Що мають на увазі під поняттям «очаг» при дослідженні фрактограм. Поняття небезпечного перерізу.
4. Можливі причини початку руйнування, зокрема втомного руйнування. Поняття «живучості» конструкції.
5. Види руйнування, їх відмінності та ознаки.
6. Яким чином визначають розмір борідок, або площинок руйнування.
7. Як отримати масштаб фрактограми.
8. З якою метою роблять долом початкової нерозвиненої тріщини.
9. Відмінність втомного і статичного руйнування зразків на відповідних фрактограмах.
10. Відмінність зломів ударного руйнування.

Лабораторна робота 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЬНОЇ ТРИБОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ МАТЕРІАЛІВ *

6.1 Мета роботи

- 1) навчитися проводити випробування на зношування за схемою "диск-колодка" на машині для дослідження тертя та знос СМЦ-2;
- 2) визначити коефіцієнт тертя пари тертя (трибологічної системи матеріалів) при різних навантаженнях та швидкостях ковзання;
- 3) побудувати залежності інтенсивності зношування від питомого тиску $I_m = f(p)$ та від швидкості ковзання $I_m = f(v)$ та залежності динамічного коефіцієнта тертя $\mu = f(p)$, $\mu = f(v)$;
- 4) дослідити продукти зношування методами оптичної та електронної мікроскопії, визначити механізм зношування;
- 5) оцінити вплив змащувально-охолоджувального технічного середовища (ЗОТС) на триботехнічні характеристики досліджуваної пари.

6.2 Короткі теоретичні відомості

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;

* –практична робота №6 розроблена в співавторстві з доцентом кафедри «Автомобілі, теплові двигуни та гібридні енергетичні установки» Кубічем В.І.

- *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.

Основні характеристики процесів тертя і зношування:

Коефіцієнт тертя визначається за формулою:

$$f = F_{\text{тер}} / N \quad (6.1)$$

де $F_{\text{тер}}$ – сила тертя, Н;

N – нормальна сила, Н.

Інтенсивність зношування за лінійним зносом розраховується за формулою:

$$I_h = \Delta h / S \quad (6.2)$$

де Δh – лінійний знос зразка, мм;

S – шлях тертя, м.

Інтенсивність зношування за втратою маси матеріала розраховується за формулою:

$$I_m = \Delta m / S \quad (6.3)$$

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:

$$I_v = \Delta V / S = (\Delta m / \rho) / S \quad (6.4)$$

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):

$$I_0 = \Delta V / (N \cdot S) \quad (6.5)$$

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

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

Випробування на зношування проводяться відповідно до ДСТУ 7787:2015 "Забезпечення зносостійкості виробів. Метод випробування матеріалів на зношування під час фретингу та фретинг-корозії". Окрім цього, термін зношування згадується у ДСТУ 2823-94 "Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення", ДСТУ 2860-94 "Надійність техніки. Терміни та визначення" та ДСТУ 2962-94 "Організація промислового виробництва".

6.3 Порядок виконання роботи

6.3.1 Ознайомитися з конструкцією та принципом роботи машини СМЦ-2. Вивчити системи вимірювання опору обертання при відного валу, нормального навантаження та порядку визначення коефіцієнту тертя, лінійного та масового зносу.

6.3.2 Підготувати зразки до випробувань:

- зважити зразки на аналітичних вагах з точністю $\pm 0,1$ мг;
- виміряти геометричні розміри;
- очистити поверхні від забруднень ацетоном або спиртом;
- визначити шорсткість контактних поверхонь.

6.3.3 Встановити зразки в машині тертя, відрегулювати систему навантаження (рисунки 6.1,а).

6.3.4 Провести припрацювання пари тертя при мінімальному навантаженні $P = 50$ Н протягом 15-20 хвилин для стабілізації процесу тертя.

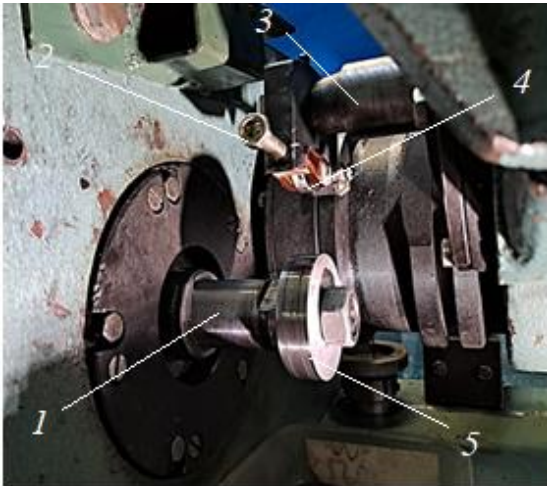
6.3.5 Провести основні випробування при різних навантаженнях 25 Н, 45 Н, 70 Н, 90 Н, 115 Н, 140 Н, 160 Н, 180 Н та постійній швидкості ковзання $v = 0,785$ м/с, що відповідає частоті обертання зразка-диска $n_1 = 300$ хв⁻¹ при радіусі диска 0,025 м. Тривалість кожного режиму – 5 хвилин. Опір обертанню зразка-диска від притискної

сили колодки автоматично фіксується на трибограмі самописця (рисунок 6.1,б). За трибограмою визначається динамічний коефіцієнт тертя для кожного швидкісного та силового режиму взаємодії.

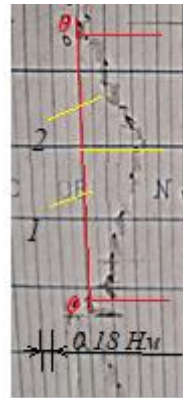
Динамічний коефіцієнт тертя визначається розрахунково-експериментальним способом при розшифруванні трибограм (рисунок 6.1,б) за виразом:

$$\mu = M_T / (r \cdot N) \quad (6.6)$$

де M_T – момент тертя, Н·м; r – радіус тертя, $r=0,025$ м; N – нормальна (притискна) сила, Н.



а



б

Рисунок 6.1 – Методичне забезпечення дослідів:

- а - зразки, які встановлені на валах машини тертя СМЦ-2
(1 – нижній вал; 2 – гвинт тримача; 3 – верхній вал; 4 – нерухомий зразок-колодка; 5 – рухомий зразок-диск); б – трибограма

6.3.6 Провести серію випробувань при постійному навантаженні $P = 100$ Н та різних швидкостях ковзання $1,83$ м/с і $2,61$ м/с, що відповідає частоті обертання зразка-диска $n_2=700$ хв⁻¹ і $n_3=1000$ хв⁻¹.

6.3.7 Провести випробування з мастильним матеріалом (олива

трансмійна 75W80, або моторна олива 5W30, або інший рідкий (пластичний) експлуатаційний матеріал при режимі постійного навантаження $P = 100 \text{ Н}$, $v = 0,785 \text{ м/с}$.

6.3.8 Після кожного режиму випробувань:

- зважити зразки для визначення втрати маси. Для цього використовуються аналітичні ваги Radwag AS 220.R2 (рисунок 6.2). Визначити інтенсивність зношування зразків за втратою маси зразка-колодки.
- виміряти лінійний знос. Визначити інтенсивність зношування за лінійним зносом зразка-диска;
- зібрати продукти зношування для подальшого аналізу.

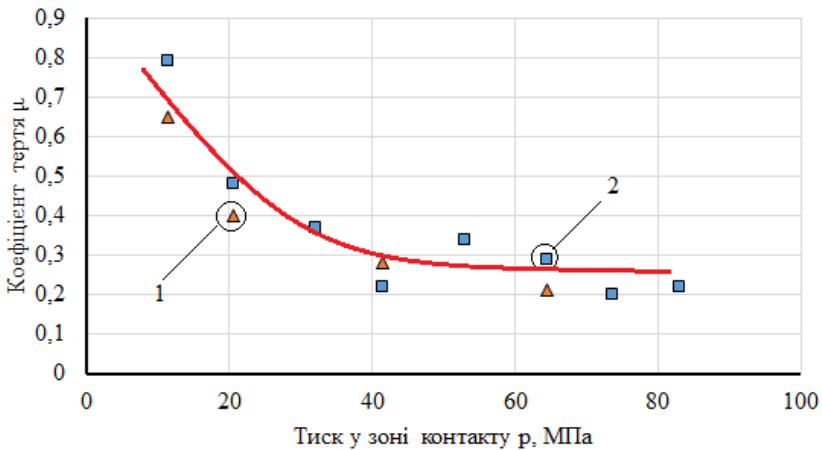
6.3.9 Дослідити поверхні тертя на оптичному мікроскопі при збільшенні $\times 50 \dots \times 200$ для визначення характеру руйнування поверхні.

6.3.10 Провести аналіз продуктів зношування.



Рисунок 6.2 – Аналітичні ваги Radwag AS 220.R2

Приклад побудування залежності динамічного коефіцієнта тертя від тиску у зоні контакту для модельної трибологічної системи матеріалів «38X2МЮА - 15W40 - 40X», наведений на рисунку 6.3. Диск виготовлений із сталі 40X, колодка виготовлена із сталі 38X2МЮА. Змащувально-охолоджувальне технологічне середовище (ЗОТС) – моторна олива Lubex 15W40.



1 – дослід №1, 2 – дослід №2

Рисунок 6.3 – Графічна апроксимація зміни динамічного коефіцієнта тертя від тиску у зоні контакту модельної трибологічної системи матеріалів «38Х2МЮА - 15W40 - 40Х» за середніми значеннями

6.4 Зміст звіту:

- короткі теоретичні відомості;
- схема установки та опис методики випробувань;
- протокол випробувань з результатами вимірювань;
- розрахунки коефіцієнтів тертя та інтенсивності зношування;
- графіки залежностей $\mu = f(p)$, $\mu = f(v)$, $I_m = f(p)$, $I_m = f(v)$;
- аналіз механізму зношування досліджуваних матеріалів;
- висновки про триботехнічні властивості досліджуваної пари.

6.5 Контрольні питання

1. Основні види зношування металевих матеріалів та їх характерні ознаки.
2. Фізична суть динамічного коефіцієнта тертя. Від яких факторів він залежить.
3. Методи визначення інтенсивності зношування. Одиниці вимірювання.
4. Характерні значення динамічних коефіцієнтів тертя для різних пар матеріалів.

5. Вплив швидкості ковзання на інтенсивність зношування.
6. Роль ЗОТС у процесах тертя і зношування.
7. Методи дослідження продуктів зношування та їх інформативність.
8. Особливості зношування конструкційних сталей та кольорових сплавів.
9. Способи підвищення зносостійкості деталей машин.
10. Зв'язок між твердістю матеріалу та його зносостійкістю.

Додаткове заняття

Додатково, при можливості, планується екскурсія для магістрів наприкінці семестру, або у День відкритих дверей – ознайомлення з обладнанням різноманітних досліджень підприємств авіадвигунобудівної галузі, а саме ПАТ «Мотор Січ» та ЗМКБ «Івченко-Прогрес».

Планується відвідати наступні відділи.

1. Відділ контролю середньопересічного механічного цеху, зокрема, звернути увагу на методи визначення шорсткості поверхонь деталі.

2. ЛПН (лабораторія міцності та надійності) – звернути увагу на методи дослідження напружено-деформованого стану деталей: залишкових напружень, наклепу; дослідження витривалості, проведення тензометрування зразків.

3. Відділ УГМет (управління головного металурга) – ознайомитись з методами досліджень макро- і мікроструктури та фрактограм; сучасним обладнанням; етапами підготовки шліфів, з інформаційною базою сталей і сплавів, деякими інформаційними звітами.

4. Відділ міцності – для ознайомлення з областями використання комп'ютерних міцностних пакетів.

Рекомендована література

Базова

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. Shajer, Gary S. Practical residual stress measurement methods. Wiley, 2013.
3. ДСТУ 2860–94 Надійність техніки. Терміни та визначення.
4. ДСТУ 2413-94 Основні норми взаємозамінності. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення.
5. ДСТУ ISO 4287:2012 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури.
6. ДСТУ ISO 6507-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом. Метод випробування.
7. ДСТУ 2494-94 Метали. Оброблення зміцнювальне. Терміни та визначення.
8. ДСТУ 2824-94 Розрахунки та випробування на міцність. Види і методи механічних випробувань. Терміни та визначення.
9. ДСТУ 2825-94 Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять.
10. ДСТУ 7787:2015 "Забезпечення зносостійкості виробів. Метод випробовування матеріалів на зношування під час фретингу та фретинг-корозії".
11. ДСТУ 2823-94 "Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення".
12. ДСТУ 2860-94 "Надійність техніки. Терміни та визначення".
13. ДСТУ 2962-94 "Організація промислового виробництва".
14. ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT + ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT)
15. ISO 468:1982 Surface roughness - Parameters, their values and general rules for specifying requirements.
16. Colás, Rafael, and George E. Totten, eds. Encyclopedia of iron, steel, and their alloys (Online version). CRC Press, 2016.

17. Dr. Mark Krieg. Chemical, thermal or mechanical processes. International Surface Technology. 2008. №1. P. 52-54.

18. 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.

19. 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.

Допоміжна (методична).

20. 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.

21. Методичні рекомендації до самостійної роботи з вивчення дисципліни «Дослідження фізичних та механічних властивостей конструкцій» для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» галузі знань G «Механічна інженерія» всіх форм навчання / Укл. Н.В. Гончар, Е.В. Кондратюк – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025.- 21 с.