

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Кафедра обладнання
харчових технологій

МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК
до виконання лабораторних робіт з курсу:
ОСНОВИ ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ
МАШИН

для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності
133 «Галузеве машинобудування»

Тернопіль
2021

УДК 620

Укладачі:

Вітенько Т.М., д.т.н., проф.

О.І. Кравець, к.т.н.

Рецензент

Шинкарик М.М., к.т.н., доц.

Розглянуто й затверджено на засіданні кафедри обладнання харчових технологій, протокол № 7 від 17 березня 2021р.

Схвалено й рекомендовано до друку на засіданні методичної комісії факультету інженерії машин, споруд та технологій, протокол № 6 від 31 березня 2021р.

Вітенько Т.М., Кравець О.І.

Методичний посібник до виконання лабораторних робіт з курсу:
Основи тертя і зношування машин. Тернопіль: ТНТУ, 2021.
– 65 с.

Посібник розроблено відповідно до навчальної програми і призначено для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

Вітенько Т.М.

Кравець О.І.

2021

ЗМІСТ

1. Лабораторна робота №1. Дослідження впливу величини навантаження на коефіцієнт тертя	4
2. Лабораторна робота №2. Визначення молекулярної складової коефіцієнту зовнішнього тертя	7
3.Лабораторна робота №3. Визначення параметрів шорсткості поверхні	18
4. Лабораторна робота №4. Експериментальне визначення висотних та крокових параметрів шорсткості поверхні	26
5. Лабораторна робота №5. Дослідження впливу змащувального середовища на коефіцієнти тертя і величину критичного навантаження	41
6. Лабораторна робота №6. Дослідження трибомеханічних параметрів при абразивному зношенні та пошкодженні	45
7. Лабораторна робота №7. Визначення видів зношування	49
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ТА РЕКОМЕНДОВАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	62

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВЕЛИЧИНИ НАВАНТАЖЕННЯ НА КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ

1.1. Мета і завдання:

- вивчити характер і закономірність впливу величини навантаження на коефіцієнт тертя контактуючих матеріалів;
- визначити зміну величини коефіцієнта тертя від величини навантаження.

1.2. Порядок виконання роботи

Для виконання роботи студенту видають деталі пари тертя, змащувальний матеріал, вказують матеріали, методи їх термічної обробки, механічні властивості.

До початку досліджень експериментальна установка повинна бути проградуйована. Після цього проводять притирання та припрацювання пари тертя.

Виконувати лабораторну роботу слід у такій послідовності. Увімкнути прилади контролю експерименту та установки. В зону тертя подати змащувальну рідину. При встановленій частоті обертання контртіла навантажити вузол тертя силою P_1 і здійснювати контроль величини моменту тертя. Коли момент тертя протягом певного часу ($t=10...15$ хв) є стабільним, довантажити вузол силою P_2 ($P_2 > P_1$). Контроль моменту тертя проводити аналогічно як і при навантаженні силою P_1 .

Навантаження вузла тертя здійснюється від сили P_1 до сили P_k - $P_1 < P_2 < P_3 < \dots < P_k$) критичної сили, при якій стрибкоподібно зростає момент тертя і настає схоплювання.

Опрацювання результатів досліджень включає статистичне опрацювання результатів вимірювання моменту тертя при навантаженні і визначення за градуовальним графіком величини коефіцієнта тертя. Результати опрацювання досліджень записати в таблицю 1.

Таблиця 1. Результати вимірювання коефіцієнта тертя залежно від величини навантаження

P, Н							
μ							

За даними таблиці побудувати графічну залежність функції $\mu = f(P)$, на якій позначити допустимі навантаження.

1.3. Запитання для самоконтролю

1. Фундаментальні закономірності зовнішнього тертя (залежності $f - p$ і $f - V$).
2. Коефіцієнт і сила тертя.
3. Класифікація видів зношування.
4. Класифікація методів вимірювання зносу.
5. Характерні ознаки пошкоджень поверхонь контакту при різних видах задиру.
6. Принцип роботи лабораторних вимірювальних пристроїв.

7. Фізико-хімічні проблеми, що виникають при пошкодженні пар тертя захоплюванням першого і другого роду.

8. Зношування, знос, інтенсивність зношування, пошкодження, пошкоджуваність тощо.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ВИЗНАЧЕННЯ МОЛЕКУЛЯРНОЇ СКЛАДОВОЇ КОЕФІЦІЄНТУ ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ

Мета роботи: ознайомитися з методикою експериментального визначення молекулярної складової коефіцієнту зовнішнього тертя ковзання і фрикційних параметрів молекулярної складової.

Теоретичні відомості

Особливістю сил тертя є їх дисипативний характер, тобто тертя супроводжується перетворенням механічної енергії у інші її види: нагрів поверхонь, їх спрацьовування, окислення та інші зміни у зоні контакту. Спільне між зовнішнім і внутрішнім тертям полягає в тому, що обидва види тертя є дисипативними процесами. Внутрішнє тертя характеризує взаємодію, яка відбувається в об'ємі одного об'єкту (твердого тіла, рідини або газу). Взаємодія відбувається по всій геометричній поверхні шару. Швидкість, з якою шари речовини переміщуються один відносно другого, змінюється безперервно і достатньо плавно. Тобто, внутрішнє тертя відбувається у всьому об'ємі деформованого тіла і обумовлено формозміною об'єму в цілому.

При зовнішньому терті взаємодія здійснюється, у загальному випадку, між різними за будовою тілами і має подвійну молекулярно-механічну природу. Ця взаємодія реалізується в окремих ізольованих один від одного зонах фактичного контакту. Швидкість ковзання у

цих зонах змінюється дискретно. Зовнішнє тертя обумовлено процесами, які відбуваються в найтонших приповерхневих шарах і на межі розподілу твердих тіл у зонах фактичного контакту; формозміною тільки приповерхневих шарів і подоланням молекулярних зв'язків, які виникають у точках реального контакту. Внаслідок цього сила зовнішнього тертя залежить від фізико-механічних властивостей поверхні.

Для здійснення зовнішнього тертя необхідна локалізація усіх процесів контактної взаємодії і розрив зв'язків у тонкому поверхневому шарі. Тому важливим фактором при зовнішньому терті є відмінна між міцністю поверхневих і нижче розташованих шарів речовини. Якщо опір зсуву поверхневого шару менше опору зсуву основи, то має місце додатний градієнт механічних властивостей по глибині:

$$\frac{d_t}{d_z} > 0 \quad (2.1)$$

де t - опір зсуву (зсувна міцність, дотичні напруження) у площині ковзання; z - координата, перпендикулярна цій площині.

При виконанні правила додатного градієнту відбувається зовнішнє тертя, коли усі деформації зосереджені у поверхневому шарі, а деформацією матеріалу основи можна знехтувати. Це правило є найважливішою умовою зовнішнього тертя, коли руйнування відбувається у зоні контакту за місцем утворення зв'язку (адгезійне руйнування), а не на деякій глибині (схоплювання, когезійне руйнування, від'ємний градієнт).

Дотримання правила додатного градієнту механічних властивостей при зовнішньому терті обумовлено формуванням у зоні фрикційного контакту третього тіла, опір зсуву якого менший за опір зсуву матеріалу основи. Схематичний розріз контакту двох твердих тіл наведено на рис. 2.1.

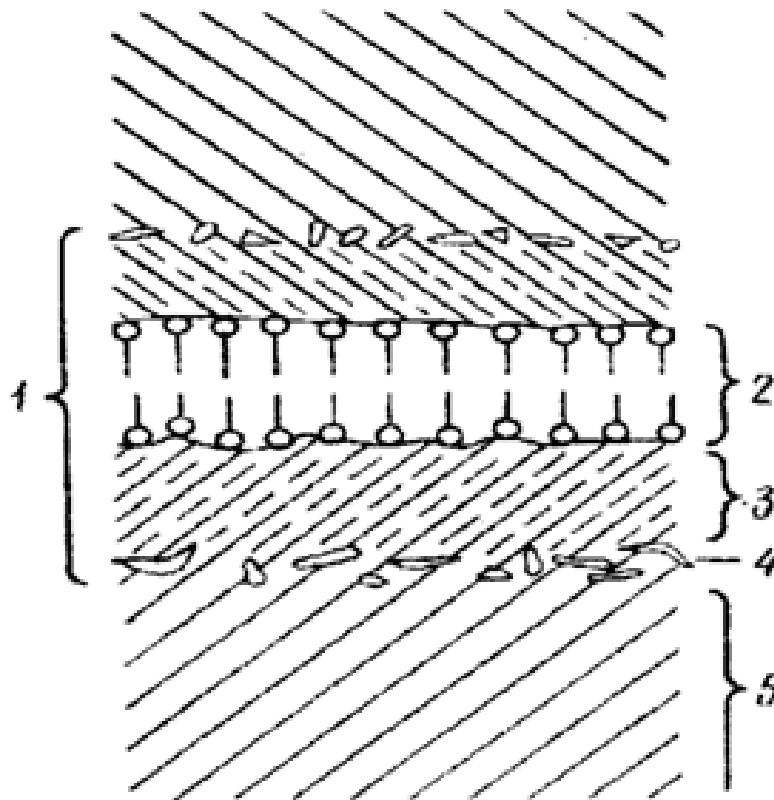


Рисунок 2.1. Будова контакту двох твердих тіл:

- 1 - третє тіло; 2 - адсорбований шар; 3 - окисли та інші хімічні сполучення; 4- деформований шар подріблених зерен;
- 5- основний матеріал

Третє тіло складається з кількох шарів. Верхній шар кожного тіла являє собою адсорбовану або хемосорбовану плівку газів, вологи і мастильно-охолоджувальної рідини. Під ним звичайно розташовуються шар оксиду металу або іншого хімічного сполучення

(сульфіду, хлориду тощо), а нижче - дуже деформований, роздрібнений при механічній обробці шар металу.

У зв'язку з подвійною молекулярно-механічною природою зовнішнього тертя силу і коефіцієнт тертя можна розділити на дві взаємозв'язані молекулярну (адгезійну) і механічну (деформаційну) складові:

$$T = T_m + T_{\text{мех}}, \quad (3.2)$$

$$f = f_m + f_{\text{мех}}, \quad (3.3)$$

Механічна складова сила тертя обумовлена об'ємним деформуванням поверхневого шару вдавненими мікронерівностями більш жорсткого з тіл пари тертя. Вдавнення більш жорстких мікронерівностей у поверхню менш жорсткого контртіла у зонах фактичного контакту пояснюється відміною механічних властивостей, їх неоднорідністю на окремих ділянках, відміною мікрогеометрії і структурною неоднорідністю у зонах фактичного контакту. В залежності від глибини вдавнення і форми нерівностей має місце різний характер руйнування фрикційних зв'язків (пружне або пластичне відтиснення, мікрорізання), що суттєво впливає на спрацьовування поверхонь.

Разом з деформуванням поверхневих шарів при зовнішньому терті у зонах фактичного контакту діють сили міжмолекулярної, а на окремих ділянках і міжатомної взаємодії, які проявляються навіть на відстані більшій, ніж міжатомна у кристалічній ґратці. Внаслідок цієї взаємодії виникають адгезійні зв'язки, тому що поверхнева енергія системи двох твердих тіл прагне до мінімуму. Наявність

міжмолекулярних сил, а відповідно і сил адгезії, викликає опір відносному ковзанню, який супроводжується деформацією зсуву, внаслідок неідеальної пружності матеріалу, і розривом адгезійних зв'язків. Таким чином, молекулярна адгезійна складова сили (коефіцієнту) тертя виникає як результат опору зсуву контактуючих тіл, обумовленого молекулярною взаємодією.

Дотичні напруження зрізу (опір зсуву) адгезійного зв'язку τ_n , які виникають в зонах контакту внаслідок міжмолекулярної взаємодії, діють на площі близькій до фактичної площі контакту A_r . Тому молекулярна складова сили зовнішнього тертя:

$$T_m = \tau_n \cdot A_r, \quad (2.4)$$

а молекулярна складова коефіцієнту зовнішнього тертя:

$$f_m = \frac{T_m}{N} = \frac{\tau_n \cdot A_r}{p_r \cdot A_r} = \frac{\tau_n}{p_r}, \quad (2.5)$$

де p_r - фактичний тиск на контакті.

Опір зсуву τ_n при вирішенні задачі для третього тіла є функцією нормальних напружень:

$$\tau_n = t_0 + b \times p_r, \quad (2.6)$$

де p_r , b - фрикційні параметри молекулярної складової коефіцієнту тертя, які залежать від умов роботи пари тертя і є характеристиками поверхневого шару. t_0 - опір зсуву адгезійного зв'язку при відсутності нормальних напружень. b - п'єзокоефіцієнт молекулярної складової тертя, який характеризує зміцнення адгезійного зв'язку із збільшенням фактичного тиску на контакті.

Згідно з (2.5), у загальному випадку, молекулярна складова коефіцієнту тертя розраховується за формулою:

$$f_m = \frac{r_0}{P_r} + \beta, \quad (2.7)$$

Експериментальні методи визначення молекулярної складової коефіцієнту зовнішнього тертя і фрикційних параметрів t_0 і b полягають у тому, що при визначенні опору відносному рухові мінімізують деформаційну складову сили тертя. Це можливо, наприклад, при використанні однокулькового трибометра (рис. 3.2), у якому твердий кульковий індентор 1 правильної геометричної форми з гладкою поверхнею ($R_a < 0.2$ мкм) обертають навколо осі симетрії.

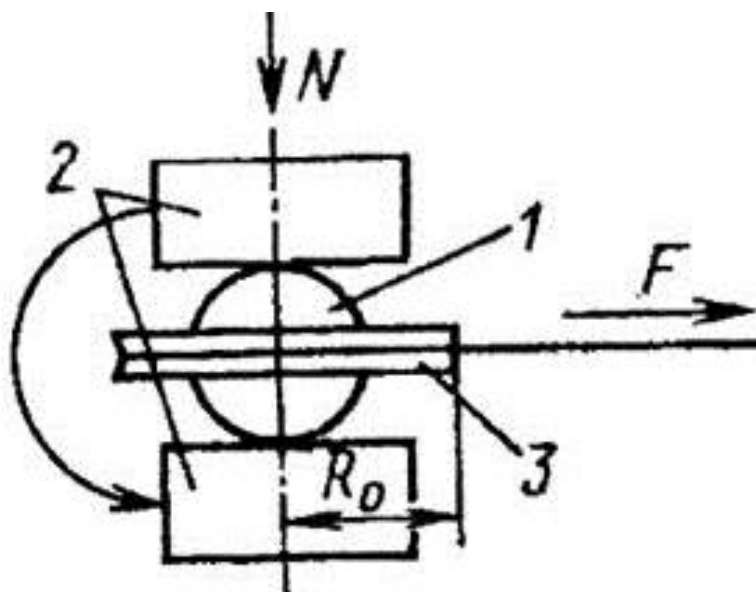


Рисунок 2.2. Схема визначення f_m :

1 - кульковий індентор із сталі ШХ-15; 2 - плоскопаралельні пластини; 3 оправка

Для зручності кульковий індентор запресовують у оправку 3, з'єднану ниткою з блоком для навантаження, яке викликає обертання

індентора під дією сили F . Момент, необхідний для обертання індентора, буде дорівнювати моменту опору, обумовленому молекулярною складовою сили тертя на контакті "індентор - пластина". Як кулькові індентори використовують кульки шарикопідшипників. Зразки для випробувань вибирають залежно від їх матеріалу і діаметру індентора. Робочу поверхню шлоскопаралельних зразків, якщо $HV > 50$, необхідно полірувати.

Оскільки абсолютно гладкі поверхні індентора і пластин отримати неможливо, опір обертанню деякою мірою залежить від деформування матеріалу пластин у зоні контакту вдавненими нерівностями, а також від об'ємного деформування внаслідок неправильної форми індентора або відхилення форми індентора під навантаженням. Крім того, похибка при визначенні t_n може виникнути через те, що площа, на якій виявляється міжмолекулярна взаємодія буде, відрізнятися від площі відбитка, утвореного індентором під навантаженням. Але всі ці фактори несуттєво впливають на похибку при визначенні дотичних напружень t_n .

Таким чином, дотичні напруження t_n розраховані по моменту опору обертанню:

$$M_{об} = \frac{4}{3} \pi \cdot r_B^3 \cdot t_n, \quad (2.7)$$

будуть практично співпадати з напруженнями, обумовленими міжмолекулярною взаємодією.

Так як момент обертання:

$$M_{об} = F \cdot R_{оп}, \quad (2.8)$$

то дотичні напруження t_n на підставі рівності моментів Моб і Моп розраховують за формулою:

$$\tau_n = \frac{3FR_0}{4\pi \cdot r_B^3}, \quad (2.9)$$

де R_0 - радіус оправки, мм; r_B - радіус відбитка, мм; F - сила, необхідна для обертання індентора, кг. Молекулярна складова коефіцієнту тертя, враховуючи (3.5), розраховується за формулою:

$$f_m = \frac{3FR_0}{4Nr_b}, \quad (2.10)$$

де N - нормальне навантаження, кг. Для інженерних розрахунків фрикційні параметри t_0 і b визначають за методом розвантаження. Спочатку визначають дотичні напруження t_{n1} при навантаженні нормальною силою N_1 . Потім зменшують навантаження на 20-30 % і розраховують t_{n2} за формулою:

$$P_r = \frac{N}{\pi \cdot r_B^2}, \quad (2.11)$$

За знайденими значеннями t_{n1} , t_{n2} , p_{r1} , p_{r2} будують графік $t_n = f(p_r)$ (рис. 3.3).

Кут нахилу прямої до осі абсцис дає п'єзоефіцієнт b ($b = \text{tg } \gamma$), а відрізок, який відсікається по осі ординат при екстраполяції до значення $p_{r0} = 0$ - параметр t_0 .

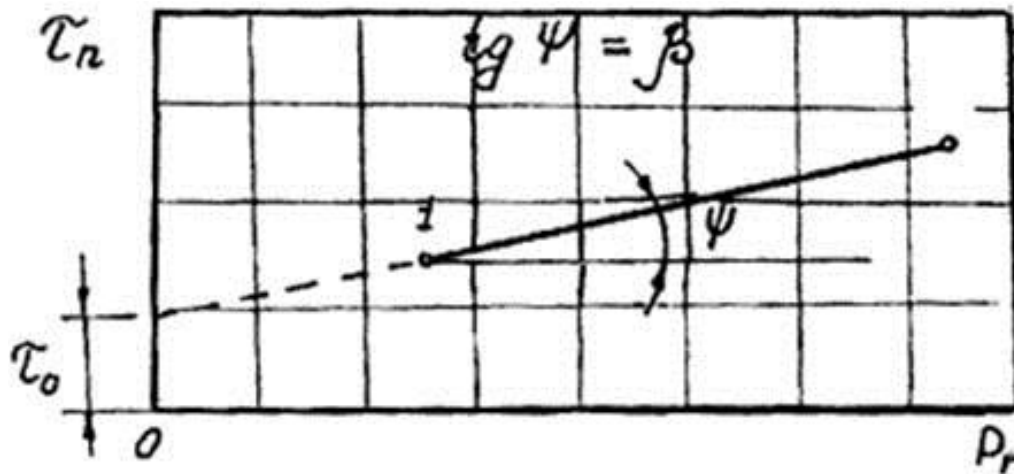


Рис. 2.3. Визначення параметрів t_0 і b за методом розвантаження

Аналітично фрикційні параметри t_0 і b можна розрахувати за формулами:

$$\tau_0 = \frac{(f_{M2} - f_{M1}) \cdot P_{r1} \cdot P_{r2}}{P_{r1} - P_{r2}}, \quad (2.12)$$

$$b_0 = f_{M2} - \frac{(f_{M2} - f_{M1}) \cdot P_{r1}}{P_{r1} - P_{r2}}, \quad (2.13)$$

Прилади і матеріали

1. Однокульковий трибометр.
2. Мікроскоп МПБ-2.
3. Терези аналітичні, штангенциркуль.
4. Зразки для випробувань.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з конструкцією однокулькового трибометра і мікроскопа МПБ-2. Переконайтесь у готовності обладнання до роботи.

2. Виміряти радіус індентора. Зважити на аналітичних терезах тягарці,

3. Встановити кульковий індентор між плоскопаралельними зразками і завантажити верхній зразок 4-5 тягарцями (N_1).

4. Навантажувати блок з ниткою доти, поки не відбудеться обертання кулькового індентора навколо своєї осі. Значення сили F_1 , занести до таблиці 3.1

5. Зняти 1-2 тягарці з верхнього зразка, зменшивши на 20-30 % нормальне навантаження. Значення N_2 занести до табл. 3.1.

6. Повторити п. 3. Значення сили F_2 занести до табл. 3.1.

7. Встановити радіус відбитка на нижньому зразку. Результати занести до табл.3.1.

Таблиця 2.1

R_0 , мм	N_1 , кг	N_2 , кг	F_1 , кг	F_2 , кг	r_B , мм	t_0 , кг/мм ²	b	F_{M1}	F_{M2}

Вимоги до звіту по роботі

1. Навести мету роботи.
2. Дати опис обладнання, яке було використано в роботі.
3. Детально записати порядок виконання роботи. Заповнити таблицю 3.1.
4. Виконати розрахунки значень t_{n1} , t_{n2} , p_{r1} , p_{r2} за формулами 2.9 і 2.11.

5. Побудувати залежність $t_n = f(p_r)$ і визначити значення фрикційних параметрів t_0 і b за методом розвантаження.

6. Розрахувати аналітичним методом молекулярну складову сили зовнішнього тертя і фрикційні параметри t_0 і b за формулами 3.10, 3.12 і 3.13.

7. Висновки по лабораторній роботі.

Контрольні запитання

1. Поясніть відміну і спільність зовнішнього і внутрішнього тертя.

2. Чим обумовлені складові сили (коефіцієнту) зовнішнього тертя?

3. Що таке правило додатного градієнту механічних властивостей?

4. Як забезпечити виконання додатного градієнту при зовнішньому терті?

5. Як визначається опір зсуву, обумовлений міжмолекулярною взаємодією при зовнішньому терті?

6. Чим пояснюється похибка при визначенні молекулярної складової тертя на однокульковому трибометрі?

7. Поясніть, як знайти t_0 і b за методом розвантаження?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ

МЕТА РОБОТИ: навчитися експериментально визначати відносну опорну довжину профілю і радіус кривизни вершин нерівностей, будувати опорну криву профілю і розраховувати параметри степеневої апроксимації.

Теоретичні відомості

Окрім висотних (R_a , R_z , R_{max}) та крокових (S , S_m) параметрів шорсткості стандартом визначається й такий параметр, як відносна довжина профілю t_p .

Опорна довжина профілю h_p - це сума довжин відрізків b_i , які відсікаються на заданому рівні у матеріалі профілю в межах базової довжини лінією, яка еквівалентна середній лінії, (рис. 3.1):

$$\eta_p = \sum_{i=1}^n b_i, \quad (3.1)$$

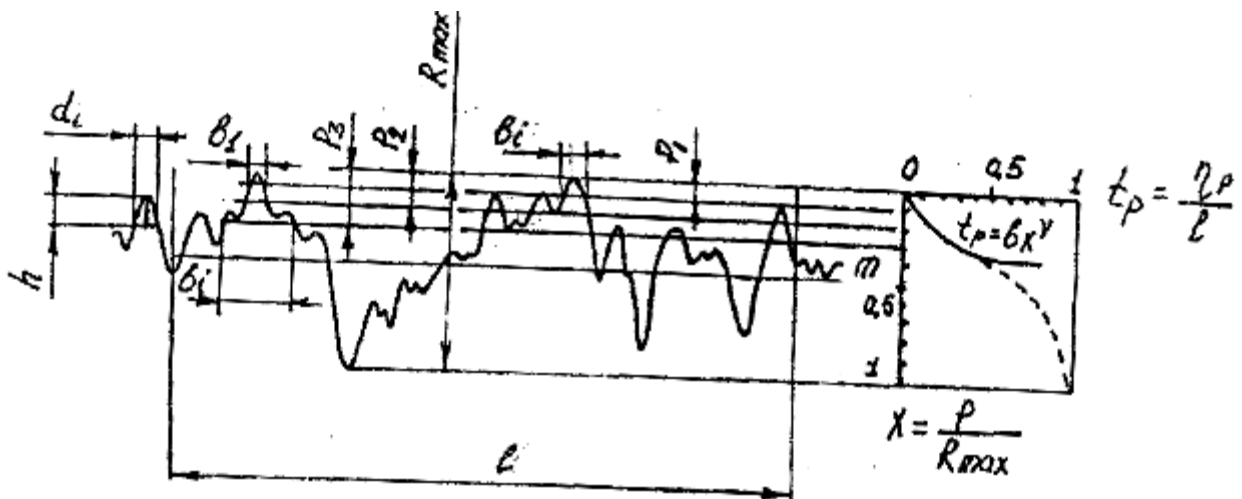


Рис. 3.1 Ділянка профілограми

Рівень перетину профілю p - це відстань між лінією виступів профілю і лінією, яка перетинає профіль еквідистантно лінії виступів профілю (або середній лінії).

Числові значення рівня перетину профілю вибирають із ряду 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 % від R_{\max} .

Відносна опорна довжина профілю - відношення опорної довжини профілю до базової довжини:

$$t_p = \frac{\eta}{l} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l}, \quad (3.2)$$

Графічне зображення залежності опорної довжини профілю від рівня перетину називається опорною кривою профілю. Опорна крива профілю характеризує розподіл матеріалу у шорсткому шарі й відіграє дуже важливу роль при розрахунках контактної взаємодії шорстких поверхонь.

Опорна крива поверхні будується таким чином. На профілограмі поверхні в межах базової довжини l проводять середню лінію профілю m , лінії виступів і западин. Паралельно (еквідистантно) середній лінії проводиться довільне число перетинів на різних рівнях профілю p . Потім будується графік, в якому по осі ординат відкладається рівень перетину профілю p , а по осі абсцис опорна довжина профілю, тобто сума відрізків b_i . Але найчастіше опорну криву профілю будують у відносних координатах $t_p = f(x)$, де t_p -

відносна опорна довжина профілю, а $x = \frac{p}{R_{\max}}$ - безрозмірна координата, яка є відношенням рівня перетину профілю p до

найбільшої висоти R_{\max} . Опорна крива профілю поверхні побудована таким чином, що не залежить від висоти нерівностей, а визначається тільки їх формою і характером розподілу вершин; вона завжди проходить через точки з координатами (0;0) та (1;1). Це дозволяє при побудові опорних кривих різних поверхонь у відносних координатах наочно порівнювати профілі між собою.

На опорній кривій профілю можливо визначити три ділянки. Перша з них відповідає $0 < x < 0.25 \dots 0.3$ - відрізок кривої, яка випукла вниз; друга - найбільш протяжний відрізок прямої, третя - відрізок кривої, зверненої випуклістю угору.

На першій ділянці при збільшенні рівня перетину p опорна довжина профілю (сумарна довжина перетину мікронерівностей Sb_i) збільшується не тільки за рахунок збільшення окремих значень b_i , але й за рахунок попадання у перетин нових мікронерівностей. Використання початкової частини опорної кривої виправдано, оскільки при взаємодії шорстких поверхонь деталей машин у контакті починають брати участь тільки найбільш високі виступи, які складають верхню частину опорної кривої. Крім того, ця ділянка опорної кривої відповідає пружному контакту, а при розплющенні виступів фізично неможлива деформація шорсткого шару $y=R_p$. На цій ділянці опорної поверхні відносну опорну довжину t_p можливо апроксимувати простою степеневою залежністю у вигляді:

$$t_p = bx^v, (2/3)$$

де b, n - параметри степеневі апроксимації опорної кривої, які залежать від виду механічної обробки матеріалу. Звичайно у машинобудуванні $v = 1.5 - 3$; $b = 1,15$.

Значення параметрів степеневі апроксимації опорної кривої b і n розраховують за формулами:

$$v = 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1, \quad (3.3)$$

$$b = t_m \left(\frac{R_{\max}}{R_p} \right)^v, \quad (3.4)$$

де R_p - висота згладження профілю; R_{\max} - найбільша висота профілю, $t_m = \frac{\sum b_{mi}}{l}$ - відносна опорна довжина профілю на рівні середньої лінії, b_{mi} - довжина основи i -го виступу профілю по середній лінії.

До додаткових топографічних характеристик шорсткості поверхні відноситься також розрахунковий радіус кривизни вершин нерівностей, який характеризує їх гостроту та форму і досить суттєво впливає на контактні властивості поверхні. Його визначають за формулою:

$$r = \sqrt{r_n \cdot r_{\text{non}}}, \quad (3.5)$$

де r_n, r_{non} - радіуси кривизни вершин нерівностей, визначені по повздовжній та поперечній профілограмам.

Для розрахунку беруть середній геометричний радіус, тому що форма виступів певною мірою наближається до еліптичної з

головними радіусами r_1 , і r_2 . Тоді на рівні p перетину еліпсоїд буде мати площу, що і сфера з радіусом r .

Дійсно, при умові $p \ll r$

$$\Delta A_{P \text{ сфери}} \approx 2\pi r p$$

$$i \Delta A_{p \text{ еліпс}} = \pi \sqrt{2r_1 \cdot p} \cdot \sqrt{2r_2 \cdot p} = 2\pi r p,$$

тобто площі рівні.

Повздовжній і поперечний радіус кривизни вершини нерівностей визначається відповідно, по профілограмам знятим у повздовжньому і поперечному напрямках за формулами:

$$r_{n_i} = \frac{d_i^2}{8h_i}, \quad (3.6)$$

де d_i , - довжина перетину виступу лінією, еквідестантною середній лінії на відстані h_i від вершини, яка дорівнює $h_i = 0.3R \text{ а } 0.05R_{\max}$.

Для розрахунків на кожній профілограмі вибирають не менше ніж п'ять найбільш високих виступів, проводять на відстані $h_i = 0.05R_{\max}$ від кожної вершини лінію еквідестантну середній лінії і знаходять перетин d_i кожного виступу. З урахуванням збільшення профілограми середній радіус кривизни вершин нерівностей розраховують за формулою:

$$r_n = \frac{V_B}{nV_\Gamma^2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{8h'} \cdot 10^3, \quad \text{мкм} \quad (3.7)$$

де V_B , V_Γ - відповідно вертикальне і горизонтальне збільшення;

$h\phi = 0.05R\phi_{\max}$ - рівень перетину виступів, мм; d_i - довжина хорди перетину i -го виступу, мм.

У випадках коли, потрібно визначити радіуси кривизни вершини, а усього виступу (наприклад, при моделюванні сферичним сегментом), ширину перетину виступів беруть по середній лінії профілю.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. На профілограмі провести середню лінію профілю, лінії виступів і западин.

2. Подовжити лінії виступів і западин, побудувати вісь tr на подовженій лінії виступів і вісь OX .

3. Розділити вісь OX на десять рівних відрізків і потім провести прямі на рівні $p_1=0,1R_{\max}(x_1 = 0,1)$; $p_2 = 0,2 R_{\max}(x_2=0,2)$; $p_3 = 0,3 R_{\max}(x_3=0,3)$.

4. Знайти довжину відрізків b_i на кожному рівні. Результати вимірювань занести до таблиці 2.1. Значення tr відкладати на подовженій лінії виступів.

5. Виміряти на профілограмі довжину основ виступів tm_i по середній лінії профілю. Дані вимірювань занести до таблиці 2.1.

6. Вибрати на профілограмі не менше ніж п'ять найбільш високих виступів і знайти для них ширину перетину d_i виступу на відстані $h = 0.05 R_{\max}$ від вершини. Дані вимірювань занести до табл. 2.2.

Таблиця 3.1

	b ₁ , мм	b ₂ , мм	b ₃ , мм	b ₄ , мм	b ₅ , мм	b ₆ , мм	b ₇ , мм	b ₈ , мм	b ₉ , мм	h _p , мм	t _p
x ₁ =0.1											
x ₂ =0.2											
x ₃ =0.3											
X _m											

п/п	1	2	3	4	5
d _i , мм					

Вимоги до оформлення звіту

1. Навести мету роботи.
2. Описати порядок виконання роботи. Заповнити таблицю 3.1 і 3.2.

3. Розрахувати опорну довжину профілю за формулою:

$$\eta_p = \frac{1}{V_\Gamma} \sum_{i=1}^n b_i, \text{ мм (3.8)}$$

і відносну опорну довжину профілю t_p.

4. Побудувати початкову ділянку опорної кривої профілю t_p для діапазону безрозмірної координати 0 < x < 0.3.

5. Розрахувати за формулами 3.3 і 3.4 параметри апроксимації b , n .
6. Розрахувати за формулою 3.7 середній повздовжній радіус кривизни вершин нерівностей.
7. Висновки по лабораторній роботі.

Контрольні запитання

1. Що характеризує опорна крива профілю?
2. Чому опорну криву профілю поверхні будують у відносних координатах?
3. Як розраховуються параметри апроксимації опорної кривої?
4. Як визначити по профілограмі радіус кривизни вершин нерівностей?
5. Що таке розрахунковий радіус кривини?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТНИХ ТА КРОКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ

Мета роботи: навчитися експериментально визначати основні висотні та крокові параметри шорсткості по профілограмі поверхні, яка досліджується. Ознайомитися з принципом роботи і будовою профілографа - профілометра Калибр-252.

Теоретичні відомості

Комплекс властивостей, наданих поверхні деталі, в результаті її обробки, у техніці характеризується поняттям якість поверхні. Якість поверхні визначається геометрією поверхні і фізико - механічними властивостями, обумовленими процесом обробки деталі. Якість поверхні впливає на такі властивості як зносостійкість, корозійна стійкість, пов'язана з такими властивостями сполучень як міцність посадок з натягом, щільність рухомих й нерухомих з'єднань.

У процесі виготовлення деталі внаслідок дефектів елементів системи "станок - пристрій - інструмент - деталь", вібрацій цієї системи, силових і температурних деформацій, зносу інструменту у процесі обробки тощо, на поверхні деталі виникають відхилення від номінального профілю, який задано у технічній документації. Відхилення від номінальної поверхні (профіля), які виникають під час процесу обробки, називають технологічними. Експлуатаційні

відхилення обумовлені нерівномірним спрацьовуванням річних ділянок поверхні тертя.

Відхилення реальної поверхні деталі від ідеальної геометричної форми (номінальної поверхні) називають похибками поверхні і, залежно від причин їх утворення та методів вимірювальної техніки, поділяють на три групи (рис. 4.1):

- 1) макровідхилення форми;
- 2) хвилястість;
- 3) шорсткість (мікронерівності).

До макровідхилень відносять нерегулярні, поодинокі відхилення реальної поверхні деталі від її номінального профілю. Наприклад, випуклість, увігнутість, конусність, корсетність тощо.

Хвилястість поверхні - це сукупність періодичних, що регулярно повторюються, відхилень номінального профілю деталі, які представляють собою близькі за розмірами виступи і западини з кроком l_B значно більшим її висоти H_B і більшим, ніж базова довжина l , яка використовується для оцінки шорсткості (рис. 4.1). Відстань між вершинами двох сусідніх хвиль (крокхвилі) l_B перевищує, відповідно до стандарту, висоту хвилі H_B більш ніж у 40 разів. Крок хвилі, залежно від виду обробки деталі, знаходиться у межах від 0.25 мм при чистовій обробці до 10 - 15 мм при грубій, а висота від 0.03 до 500 мкм.

Шорсткість поверхні - нерегулярні мікровідхилення від геометричного профілю хвилястої поверхні твердого тіла, які утворюють його реальний рельєф у вигляді сукупності нерівностей з

відносно малим кроком (рис. 4.1) і оцінюються у межах ділянки, довжина якої дорівнює певній базовій довжині l . Крок шорсткості (мікронерівностей) змінюється залежно від виду технологічної обробки та класу точності в межах від 2 до 1000 мкм, а висота від 0.03 до 400 мкм.

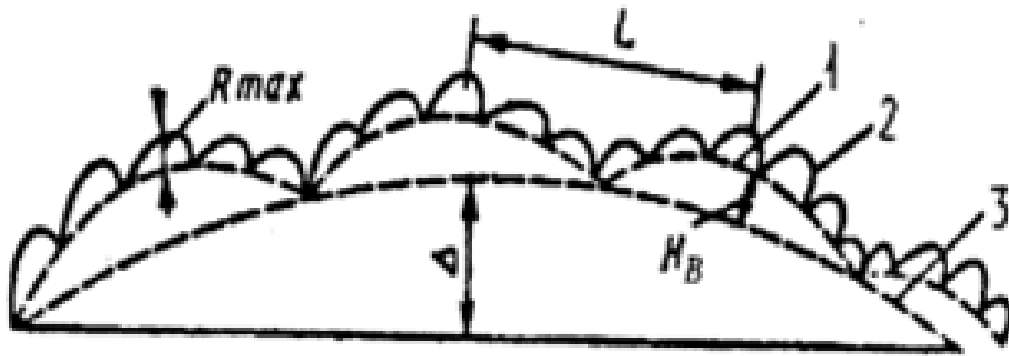


Рис. 4.1 .Схема мікрогеометрії поверхні.

1- хвилястість; 2- шорсткість; 3- макровідхилення

Шорсткість поверхні, також як і хвилястість, необхідно поєднувати з тим або іншим напрямком. Шорсткість обробленої поверхні в напрямку головного руху під час різання при обробці називають повздовжньою, а в напрямку подачі - поперечною шорсткістю. Оскільки на утворення поперечної шорсткості впливають такі фактори, як форма ріжучої кромки інструменту та величина подачі, які не впливають на повздовжню шорсткість, то звичайно розміри поперечної шорсткості у більшості випадках у 2 - 3 рази перевищують розміри повздовжньої шорсткості. Тому переважно шорсткість поверхні оцінюють за результатами вимірювання поперечної шорсткості у напрямку перпендикулярному до слідів обробки або слідів на поверхні тертя у результаті спрацьовування.

Оскільки шорсткість є розмірною характеристикою, яка визначає геометрію поверхні, то її кількісно оцінюють рядом параметрів у відповідності до ГОСТ 2789-73 та цілим рядом допоміжних характеристик. Для визначення характеристик шорсткості розроблено багато методів: щупових, оптичних (світлового перетину, тіньової проекції, інтерференційний та інші.), методів растрової електронної мікроскопії, електричних, пневматичних тощо. Найбільшого розповсюдження дістав метод визначення шорсткості поверхні за її профілем, реалізований у профілограмах. Профілограма - це отримане за даними вимірювань тим чи іншим способом, графічне зображення контуру реального профілю, який є перетином поверхні площиною перпендикулярної до номінальної поверхні і орієнтованої у певному напрямку.

Реалізується цей метод за допомогою профілографа - профілометра моделі Калибр, схема якого наведена на рис. 1.2.

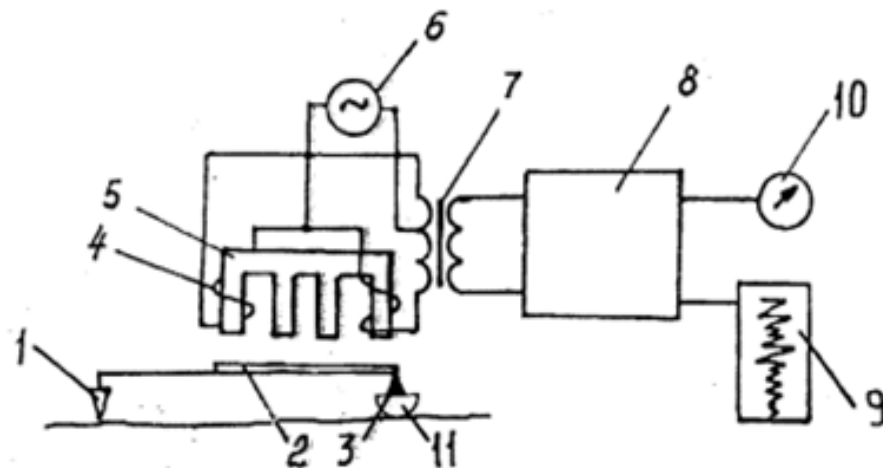


Рис. 4.2. Схема профілографа - профілометра Калибр - 252.

- 1-алмазна голка; 2.-якорь; 3-призма; 4-індуктивні котушки; 5-осердя;
 6-генератор звукової частоти; 7-трансформатор; 8-електронний блок;
 9-самопис; 10-реєструючий прилад; 11-опора

Метод полягає в тому, що по поверхні деталі переміщується датчик, робочим елементом якого є алмазна голка 1 з достатньо малим радіусом закруглення 2-10 мкм. Голка з'єднана з якорем 2 і може разом з ним повертатися відносно призми 3, змінюючи при цьому зазори між якорем 2 і осердям 5. Коливання голки 1 у вертикальному напрямку повторюють нерівності профілю поверхні і передаються якорю 2. Зміна повітряних зазорів між якорем 2 і осердям 5 спричиняє зміну змінного струму у котушках 4, що призводить до зміни напруги на виході диференційного трансформатора 7. Ці зміни напруги посилюються електронним блоком 8, на виході якого підключений записуючий прилад 9, який вимальовує на діаграмній стрічці профілограму, або поступають у інтегруючий пристрій, який безпосередньо реєструє значення параметрів; шорсткості у вигляді показів приладу 10. Призма 3 закріплена нерухомо відносно кульової опори 11, і оскільки куля має великий радіус кривизни, то вона ковзає по вершинам мікровиступів, піднімаючись і опускаючись відповідно до хвилястості поверхні. Завдяки цьому можливо записувати шорсткість поверхні, усунувши вплив хвилястості. Якщо кульова опора буде пересуватись по спеціально виготовленій дуже гладкій поверхні, то голка запише одночасно як шорсткість, так і хвилястість поверхні, яка досліджується.

Якість профілограми визначає точність отриманих параметрів шорсткості. Недоліками щупового методу вимірювання профілю

поверхні є викривлення, які виникають у результаті заглиблення алмазної голки у поверхню, оскільки у зоні контакту виникає значний тиск. Крім того, голка має радіус кінцевих розмірів 2-10 мкм, тому при ковзанні по виступу профіль скривлюється.

Звичайно профілограми знімаються з різними збільшеннями по горизонталі та вертикалі. Вибір горизонтального збільшення обумовлений необхідністю чіткого запису окремих мікронерівностей, а при виборі вертикального збільшення необхідно виходити із можливості більш повного використання ширини діаграмного паперу. І оскільки при запису профілограми вертикальне збільшення на два порядки перевищує горизонтальне, то профілограма обробленої поверхні має вигляд гострої пилки (рис. 4.3.а). В дійсності профіль поверхні при однакових вертикальному і горизонтальному збільшеннях виглядає по-іншому (рис. 4.3.б) й окремі нерівності мають пологі форму і кут між основою виступу профілю й дотичною до його бокової поверхні не перевищує 15-20.

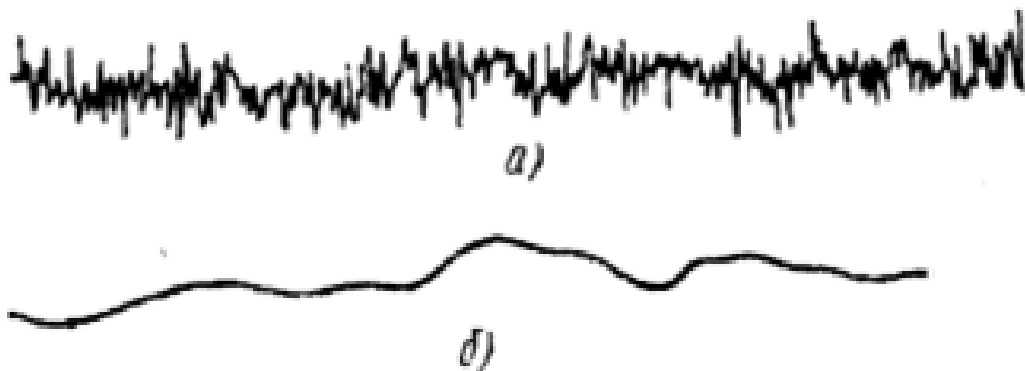


Рис. 4.3 Профілограма сталеві поверхні після шліфування:

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

Характеристики шорсткості оцінюють переважно в межах стандартизованої довжини l (рис. 4.4), яку вибирають таким чином, щоб на ній не виявлялись інші види відхилень форми (хвилястість і макровідхилення). Вибір базової довжини залежно від висоти нерівностей і класу шорсткості проводять згідно з ГОСТ 2789-73. При цьому треба вважати, що із збільшенням базової довжини збільшується вплив хвилястості на результаті вимірювань. При дослідженні поверхні на ній виділяють кілька базових ділянок, а параметри шорсткості визначають як середньоарифметичне значень, розрахованих як мінімум за п'ятьма профілограмами.

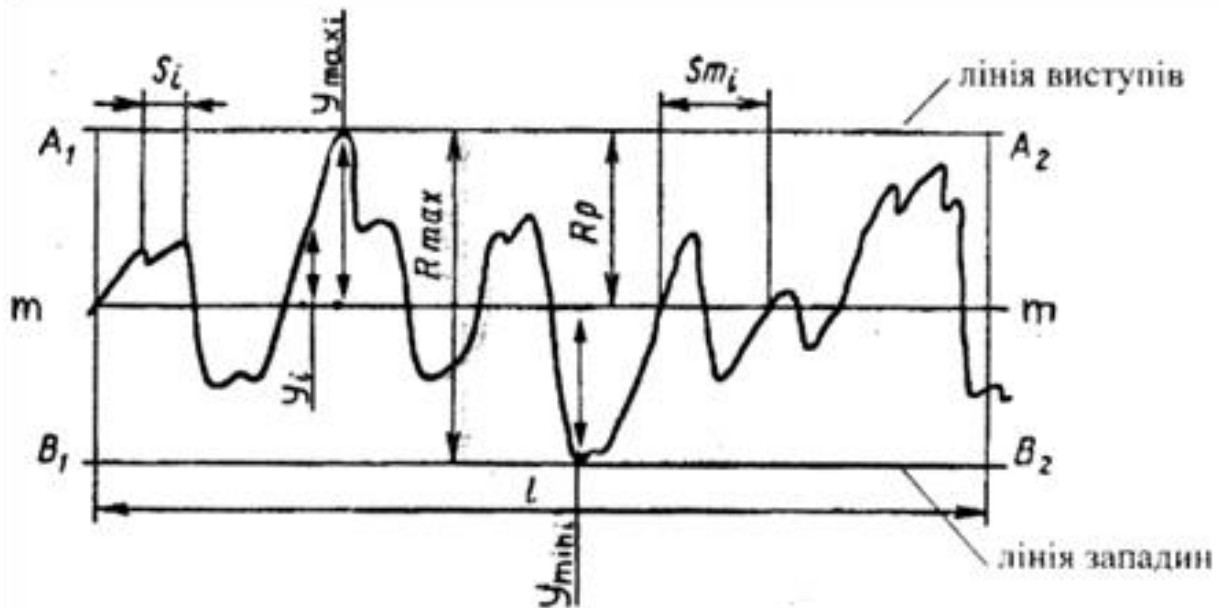


Рис. 4.4 Ділянка профілограми і характеристики профілю поверхні

Для визначення параметрів шорсткості на профілограмі проводять середню лінію m - m . Середня лінія - це базова лінія, яка має форму номінального профілю і проведена так, що в межах базової

довжини середнє квадратичне відхилення профілю до цієї лінії мінімальне.

На профілограмі положення середньої лінії профілю визначають так, щоб площі по обидві сторони від неї до контура, тобто площа виступів і площа западин, були рівними.

Частина реального профілю, яка з'єднує дві сусідні точки перетину його з середньою лінією і спрямована від тіла, називається виступом профілю. Частина профілю, яка з'єднує дві сусідні крапки перетину його з середньою лінією і спрямована у тіло, називається западиною профілю.

Нерівність профілю - це виступ профілю і сполучена з ним западина.

У межах базової довжини на профілограмі еквідистантно середній лінії, проводять лінію виступів через найвищу точку профілю і лінію западин - через найнижчу точку профілю. Для якісної оцінки і нормування шорсткості поверхні характеристики профілю відраховують відносно до цих ліній і середньої лінії профілю, яка є початком відліку (нулевою лінією).

Згідно з ГОСТ 2789-73 встановлені такі параметри шорсткості:

R_z - висота профілю по десяти точках;

R_{max} - найбільша висота профілю;

R_a - середньо арифметичне відхилення профілю;

S_m - середній крок нерівностей;

S - середній крок місцевих виступів профілю;

t_p - відносна опорна довжина профілю.

Перші з трьох наведених характеристик складають групу висотних параметрів шорсткості.

Висота нерівностей профілю по десяти точках R_z - сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів профілю і глибин п'яти найбільших западин профілю в межах базової довжини

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{\max i}| + \sum_{i=1}^5 |y_{\min i}|}{5}, \quad (4.1)$$

де $y_{\max i}$ - висота одного з п'яти найбільших виступів профілю;
 $y_{\min i}$ - глибина однієї з п'яти найбільших западин профілю.

При визначенні параметра R_z враховують усього десять точок профілю. Тому ця величина характеризує профіль досить умовно і використовується як параметр шорсткості для грубих класів точності.

Найбільша висота профілю R_{\max} - відстань між лінією виступів і лінією западин профілю у межах базової довжини. Параметр R_{\max} є повною висотою профілю, характеризує межі, в яких вона змінюється, і суттєво впливає на контактні властивості поверхні.

Найбільш повно характеризує висоту ділянки профілю і поверхні в цілому, параметр R_a , який має чіткий статистичний зміст.

Середнє арифметичне відхилення профілю R_a - це середнє арифметичне з абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y(x)| dx, \quad (4.2)$$

де $Y(x)$ - функція відхилення профілю до середньої лінії, l - базова довжина.

На практиці для приблизного розрахунку середнього арифметичного відхилення профілю використовують формулу

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (4.3)$$

де y_i - відхилення профілю поверхні від середньої лінії у довільному перетині, тобто відстань між будь-якою крапкою профілю і середньою лінією;

n - кількість вибраних точок профілю поверхні в межах базової довжини.

Параметри S та S_m дають в деякій мірі уяву про форму нерівностей і характерні точки перетину профілю з середньою лінією. У комплексі із висотними параметрами R_a , R_z , R_{max} крокові параметри S та S_m дозволяють визначити крім висоти нерівностей ще і їх нахил, що має значення для антифрикційних характеристик поверхонь тертя.

Середній крок нерівностей профілю S_m - середнє арифметичне значення кроку нерівностей профілю в межах базової довжини

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}, \quad (4.4)$$

де S_{mi} крок нерівностей профілю - відрізок середньої лінії профілю, який обмежує нерівність профілю.

Середній крок місцевих виступів профілю S - середнє значення кроку місцевих виступів профілю в межах базової довжини.

$$s = \frac{1}{n} \sum s_i, \quad (4.5)$$

де S_i крок місцевих виступів - довжина відрізка середньої лінії між проекціями на неї двох найвищих точок сусідніх місцевих виступів профілю.

Перерахованих вище характеристик недостатньо для того, щоб повністю охарактеризувати мікрогеометрію поверхні. Наприклад, при одному й тому ж значенні R_a форма нерівностей та їх розподіл на базовій довжині можуть бути зовсім різними, і різними будуть експлуатаційні властивості поверхонь. Тому при розрахунках контактної взаємодії шорстких поверхонь у триботехніці доводиться використовувати ряд додаткових нестандартизованих геометричних параметрів. Одним з таких додаткових висотних параметрів є висота згладжування.

Висота згладжування (нівелювання) R_p - відстань від лінії виступів до середньої лінії в межах базової довжини. Параметр R_p характеризує величину, на яку зменшиться висота профілю, поверхня стане гладкою.

Інтегральною характеристикою профілю є коефіцієнт заповнення профілю K_p - відношення площі фігури, яку утворює профіль і лінія западин, до площі, яка знаходиться між лінією виступів і лінією западин в межах базової довжини:

$$K_p = 1 - \frac{R_p}{R_{\max}}, \quad (4.6)$$

де $\frac{R_p}{R_{\max}}$ дорівнює відношенню площі, яку займають пустоти до площі, яка знаходиться між лініями виступів і западин в межах базової довжини.

При виконанні лабораторної роботи для визначення параметрів шорсткості надаються профілограми з базовими ділянками довжиною $l \times V_{\Gamma}$, де V_{Γ} - горизонтальне збільшення, і попередньо нанесеною діаграмною сіткою.

Необхідне обладнання, прилади і матеріали

1. Профілограф - профілометр Калибр - 252.
2. Деталі, оброблені шліфуванням, фрезеруванням, поліруванням тощо.
3. Профілограми поверхонь, лінійка.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з конструкцією профілографа - профілометра Калибр - 252, правилами техніки безпеки під час роботи на установці та переконатися в готовності обладнання до роботи.
2. Встановити на опорний стіл деталь, необхідні параметри (швидкість переміщення, горизонтальне і вертикальне збільшення), зняти профілограму поверхні.
3. На наданій для обробки профілограмі в межах базової ділянки, провести середню лінію, так щоб площа виступів приблизно дорівнювала площі западин.

4. Накреслити на профілограмі лінію виступів і лінію западин.

5. Провести вимірювання відхилень профілю y_i в кожній клітинці діаграмної сітки на профілограмі; дані занести до табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

п/п	$\frac{1}{2}y_i \frac{1}{2}$ мм	п/п	$\frac{1}{2}y_i \frac{1}{2}$ мм	п/п	$\frac{1}{2}y_i \frac{1}{2}$ мм	п/п	$\frac{1}{2}y_i \frac{1}{2}$ мм	п/п	$\frac{1}{2}y_i \frac{1}{2}$ мм	п/п	$\frac{1}{2}y_i \frac{1}{2}$ мм
1.		16.		31.		46.		61.		76.	
2.		17.		32.		27.		62.		77.	
3.		18.		33.		48.		63.		78.	
4.		19.		34.		49.		64.		79.	
5.		20.		35.		50.		65.		80.	
6.		21.		36.		51.		66.		81.	
7.		22.		37.		52.		67.		82.	
8.		23.		38.		53.		68.		83.	
9.		24.		39.		54.		69.		84.	
10.		25.		40.		55.		70.		85.	
11.		26.		41.		56.		71.		86.	
12.		27.		42.		57.		72.		87.	
13.		28.		43.		58.		73.		88.	
14.		29.		44.		59.		74.		89.	
15.		30.		45.		60.		75.		90.	

6. Позначити на профілограмі п'ять найбільших виступів і п'ять найбільших западин, виміряти відповідно їх висоти і глибини. Дані занести до табл. 4.2

Таблиця 4.2.

п/п	y_{max} , мм	$\frac{1}{2}y_{min} \frac{1}{2}$, мм	$R\phi_{max}$, мм	$R\phi_p$, мм
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				

7. Виміряти на профілограммі відстань між лінією виступів і лінією западин та відстань між лінією виступів і середньою лінією профілю. Дані занести до таблиці 1.2.

8. Позначити на профілограмі усі кроки нерівностей і один з кроків ліцевих виступів. Виміряти кроки нерівностей і дані занести до табл. 1.3.

Таблиця 1.3.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	14.	14.	15.
Smi, мм															

Вимоги до оформлення звіту

1. Навести мету роботи.
2. Дати опис обладнання, яке було використано в роботі.
3. Описати порядок виконання роботи. Заповнити таблиці 1.1, 1.2, 1.3.
4. Розрахувати середнє арифметичне відхилення профілю за формулою:

$$R_a = \frac{10^3}{nV_B} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad \text{мкм (4.7)}$$

де V_B - вертикальне збільшення, n - кількість вимірювань.

5. Розрахувати висоту профілю по десяти точкам:

$$R_z = \frac{10^3}{5V_B} \left(\sum_{i=1}^n |y_{\max i}| + \sum_{i=1}^n |y_{\min i}| \right), \quad \text{мкм (4.8)}$$

6. Розрахувати найбільшу висоту профілю за формулою:

$$R_{\max} = \frac{R'_{\max}}{V_B} \cdot 10^3, \quad \text{мкм (4.9)}$$

7. Розрахувати висоту згладжування за формулою:

$$R_p = \frac{R'_p}{V_B} \cdot 10^3, \quad \text{мкм (4.10)}$$

8. Розрахувати коефіцієнт заповнення профілю за формулою (4.6).

9. Висновки по лабораторній роботі.

Контрольні запитання

1. Що таке відхилення поверхні, їх основні групи ?
2. Що таке шорсткість поверхні ?
3. Які основні параметри шорсткості ?
4. Що характеризує висотні й крокові параметри шорсткості ?
5. Як провести середню лінію профілю ?
6. Чому шорсткість поверхні пов'язують з певним напрямком ?
7. Як визначити параметри Ra, Rz, Rmax, S та Sm .

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМАЩУВАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА НА КОЕФІЦІЄНТИ ТЕРТЯ І ВЕЛИЧИНУ КРИТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

1.1. Мета і завдання

1. Вивчити вплив змащувального середовища на коефіцієнт тертя та величину критичного навантаження матеріалів пар тертя.
2. Класифікація лабораторних машин для дослідження матеріалів на зношування.
3. Вивчити вплив змащувального середовища на діапазон і рівень нормального (окислювального) механіко-хімічного зношування.

1.2. Порядок виконання роботи

Для виконання роботи студенту видають деталі пари тертя, змащувальні матеріали та присадки до них, вказують матеріали, методи їх термообробки, механічні властивості.

До початку роботи експериментальна установка повинна бути проградуйована. Після цього провести притирання та припрацювання пари тертя.

Виконувати лабораторну роботу в такій послідовності. Увімкнути та прогріти прилади контролю експерименту. В зону тертя подати базову змащувальну рідину (наприклад, вазелінове м03) навантажувати вузол тертя силою P_i і контролювати величини

моменту тертя за показами приладів, а результати записати у журнал досліджень з фіксацією часу роботи. Через кожну хвилину в зону контакту подати змащувальну рідину. Якщо при P_1 моменти тертя протягом 15 хвилин стабільні, довантажити вузол послідовно силами P_1, P_2, \dots, P_k ($P_1 < P_2 < P_3 < \dots < P_k$) з контролем моменту тертя і постійним подаванням змащувальної рідини. Навантаження здійснювати до сили величиною P_k , при якій стрибкоподібно зростає момент тертя і настає пошкодження вузла тертя.

Після завершення даного етапу досліджень опрацювати результати досліджень. З градуєвальної кривої визначити коефіцієнт тертя для кожного ступеня навантаження, а значення його записати в журнал досліджень.

Наступний етап експерименту передбачає дослідження впливу складу змащувального середовища на величину коефіцієнта тертя і критичну силу навантаження. Це дослідження проводять аналогічно попередньому, тільки в базову змащувальну рідину додають певну кількість однієї зі встановлених присадок. Навантаження доводять до P_k і опрацьовують експериментальні дані.

Для виявлення впливу змащувального середовища на показники тертя дослідження проводять як у попередніх випадках, тільки з різними мастилами.

Статистично опрацьовані експериментальні дані записують у таблицю 1.

Після завершення експериментів та опрацьовання їх результатів необхідно зробити висновки про вплив відповідних присадок та

змащувальних рідин на величину коефіцієнта тертя, величину критичного навантаження вузла та діапазон нормального механіко-хімічного (окисного) зношування.

Таблиця 5.1

Дослідження впливу змащувального середовища на показники тертя

Мастило -										
Р, Н										
Мастило -										
Р, Н										
Мастило -										
Р, Н										

5.3. Запитання для самоперевірки

1. Вплив середовища на механізми процесу тертя та зношування матеріалів.
2. Класифікація мастил.
3. Склад мастил.

4. Вплив хімічно-активних речовин та присадок на фізико-хіміко-механічні процеси, що протікають у зоні контакту.
5. Класифікація присадок.
6. Ефект Ребіндера.
7. Адсорбція поверхнево-активних речовин і змащувальна дія.
8. Маслянистість змащувального матеріалу.
9. Тверді змащувальні матеріали.
10. Пластичні змащувальні матеріали.
11. Адсорбція і хемосорбція.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ АБРАЗИВНОМУ ЗНОШЕННІ ТА ПОШКОДЖЕННІ

6.1. Мета і завдання:

- вивчення впливу абразиву на величину коефіцієнта тертя при різних режимах навантаження.
- вивчення впливу абразиву на величину критичної сили навантаження вузла тертя.
- вивчення впливу ґрунтового і технологічного абразиву на величину коефіцієнта тертя і якість поверхонь контакту.

6.2. Теоретичні відомості

Абразивне зношування і пошкодження – процеси руйнування поверхонь деталей машин, які зумовлені наявністю абразивного середовища в зоні тертя. Вони широко розповсюджені в практиці. Абразивне зношування має місце при роботі робочих органів ґрунтообробних, будівельних і дорожніх машин, а також в інших вузлах тертя внаслідок проникнення твердих частинок з повітрям, змащувальними та горючими матеріалами, при обробці абразивним інструментом і т.п. Цей вид руйнування в багатьох випадках зумовлений утворенням у парах тертя в процесі зношування твердих частинок. Абразивну дію проявляють також тверді структурні складові спряжених поверхонь тертя.

Форми і механізми руйнування визначають взаємодією поверхонь тертя з абразивним середовищем, суть якої полягає в

ковзанні частинок, пластичному деформуванні металу, проникненні в матеріал, руйнуванні поверхневих об'ємів без виділення металу або зі зняттям мікростружки. Існує дві чітко виражені форми прояву абразивних процесів, які відрізняються характером взаємодії часток з поверхнею металу:

а) з переваженням механіко-хімічного руйнування (пластичне деформування поверхневих об'ємів, їх окислення і наступне руйнування утворених плівок). Ця форма є різновидністю механіко-хімічного зношування;

б) з переважанням механічного руйнування поверхневих шарів (проникнення абразивних часток і руйнування поверхневих шарів об'ємів металу без відділення часток основного металу або зі зняттям мікростружки). Ця форма відноситься до недопустимих при зовнішньому терті процесів пошкодження.

6.3. Порядок виконання роботи

Для виконання роботи студенту видають деталі пари тертя, вказують матеріали, методи їх термічної обробки, механічні властивості, змащувальну рідину, абразив ґрунтовий (глобулярної форми, з заокругленими гранями) і технологічний (з гострими різальними гранями різної дискретності); вказують матеріали абразивних часток.

До початку досліджень експериментальна установка повинна бути проградуйована, а контактуючі деталі пари тертя необхідно притерти і припрацювати.

Виконання лабораторної роботи проводити в такій послідовності. Увімкнути прилади контролю експерименту та установку. В зону тертя подати змащувальну рідину. При встановленій частоті обертання контртіла проводити навантаження вузла тертя силою P_1 і здійснити контроль величини моменту тертя. Після стабілізації моменту тертя проводити довантаження силою $P_2 (P_1 > P_2)$, знімати покази стабілізованого моменту тертя й аналогічно здійснити довантаження до критичної сили P_k , коли момент тертя стрибкоподібно зростає.

Результати експерименту записати в журнал досліджень; побудувати графічну залежність коефіцієнта тертя від сили навантаження та зняти профілограму з поверхні тертя зразка. На горизонтальній ділянці кривої залежності вибрати силу навантаження P_v (за погодженням з викладачем) для подальших досліджень.

Після цього змінити пару тертя, притерти і припрацювати. В зону тертя подати змащувальну рідину з певним умістом ґрунтового абразиву відповідної дисперсності. При навантаженні на вузол тертя, що дорівнює P_a , зняти покази та зробити профілограму поверхні тертя зразка.

Наступний етап досліджень проводити з технічним абразивом, який має гострорізальні кромки. Послідовність експерименту така ж, як і з ґрунтовим абразивом.

Після проведення дослідів заповнити таблицю досліджень, проаналізувати результати та зробити висновки з проведеної роботи. Необхідно узагальнити вплив відповідних концентрацій та

дискретності ґрунтового та технологічного абразиву на триботехнічні показники та якість поверхні контакту в порівнянні з результатами, отриманими при терті без абразиву в змащувальній рідині, а також порівняти вплив ґрунтового і технологічного абразиву на величину коефіцієнта тертя при однакових силах навантаження і якість поверхонь контакту.

Таблиця 6.1. Результати вимірювання коефіцієнта тертя залежно від величини фракції абразивного матеріалу

Фракція абразивного матеріалу D, мкм	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-110	110-120	120-140	140-150	150-160
Коефіцієнт тертя											

6.4. Запитання для самоперевірки

1. Вплив абразиву на фізико-хіміко-механічні властивості поверхонь контакту при терті.
2. Роль абразиву при нормальному механіко-хімічному зношуванні.
3. Шляхи підвищення надійності вузлів тертя при абразивному зношуванні.
4. Механізм руйнування матеріалів при абразивному зношуванні.
5. Різновиди абразивного зношування.
6. Механізми абразивного зношування полімерних матеріалів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7.

ВИЗНАЧЕННЯ ВИДІВ ЗНОШУВАННЯ ЕКСПОРТ МАТЕРІАЛУ ЗМІНИТИ ЦЮ СТОРІНКУ

Мета роботи: систематизувати знання про види зношування та причини їх виникнення, отримати практичні навички визначення видів зношування.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Зношування - процес руйнування і відокремлення матеріалу з поверхні твердого тіла і (або) збільшення його залишкової деформації, який виявляється у поступовій зміні розмірів і (або) форми тіла внаслідок дії на нього середовища або іншого тіла. Якщо механічна дія виявляється у вигляді сили тертя, то кажуть про спрацьовування під час тертя. Формування поверхні, яка спрацьовується, відбувається як результат додавання різних за інтенсивністю і видами елементарних актів руйнування і зміни механічних і фізико-механічних властивостей матеріалу під дією зовнішніх факторій (середовище, температура, тиск, вид тертя, швидкість переміщення поверхонь тощо). Сукупність явищ під час процесу тертя визначає вид спрацьовування та його інтенсивність.

Внаслідок різноманітності матеріалів пар тертя і умов їх експлуатації види спрацьовування надзвичайно різноманітні, але їх класифікація необхідна для розробки відповідних методів підвищення зносостійкості. Оскільки деталь, як правило, одночасно

спрацьовується від дії різних видів спрацьовування, важливе значення у питанні класифікації має положення про провідний і супутні види спрацьовування. Провідний вид - це процес, який переважає за своїм якісним і кількісним виявленням у загальній сукупності з іншими (супутніми) процесами спрацьовування поверхонь тертя.

Вид спрацьовування у першому наближенні можливо визначити за такою зовнішньою ознакою, як вигляд поверхні тертя (натир). Для більш детального визначення необхідні аналіз складу, фізичних і механічних властивостей поверхневого шару.

Класифікація видів спрацьовування згідно з ГОСТ 27674-88 наведена у табл. 7.1.

Таблиця 7.1. Класифікація видів спрацьовування.

Ознака класифікації	Види зношування
Види механічного зношування	Абразивне зношування; гідроабразивне (газоабразивне) зношування; гідроерозійне (газоерозійне) зношування; кавітаційне зношування; зношування від втоми; зношування при фретінгу; зношування при заїданні
Види корозійно-механічного зношування	Окислювальне зношування, зношування при фретінг-корозії
Види зношування при дії електричного струму	Електроерозійне зношування

Абразивним називається механічне зношування деталей внаслідок дряпання поверхні твердими частками при наявності їх відносної швидкості.

Абразивні частки можуть бути природного або штучного походження і повинні мати геометричну форму і твердість достатню для дряпання (різання) поверхні. Те, що зерно випуклою поверхнею або гострим ребром може бути вдавненим, навіть без пошкоджень, у плоску поверхню більш твердого тіла, пояснює спрацьовування металу абразивними частками з меншою твердістю. Абразивне спрацьовування викликають ґрунт, руда, вугілля, зола, пил, які потрапили на поверхню тертя, металева стружка, нагар, продукти спрацьовування, особливо частки твердих структур і оксидних плівок, так як твердість оксидів для більшості-металів перевищує твердість самого металу.

Абразивними частками можуть бути:

1) нерухомо закріплені тверді зерна, які входять у контакт по дотичній або під невеликим кутом атаки до поверхні деталі (наприклад, шаржування твердими частками м'яких антифрикційних матеріалів);

2) незакріплені частки, які входять у контакт з поверхнею деталі (наприклад, абразивні частки у ґрунті);

3) вільні частки у зазорі сполучених деталей;

4) вільні абразивні частки, які переносяться потоком рідини або газу.

Основна дія абразивних часток полягає у дряпанні (пластичному відтисненні) металу поверхні. Вдавлена частка при ковзанні відтискує перед собою і убоки, підминає під себе матеріал, залишаючи подряпину (рису). Остання обривається при виході із зони фактичного контакту, коли частка роздробиться або вирве тверду складову; коли частку буде винесено із зони тертя. Дно канавки при цьому наклюпується. Повторення процесу по одній трасі у парах тертя відбувається рідко. Найчастіше відбувається дряпання, при якому зона пластичного відтиснення перекриває раніш утворену подряпину. Поверхня тертя вкрита подряпинами у напрямку ковзання, а між подряпинами розташовується наклепаний матеріал, який витримав багаторазову пластичну деформацію, вичерпав здатність до пластичного деформування і схильний до крихкого руйнування. При ударно-абразивному спрацьовуванні час взаємодії поверхні з абразивною часткою дуже малий і теплота внаслідок пластичного деформування не встигає розповсюдитися у глибину металу. Значний місцевий нагрів змінює механічні властивості матеріалу, не виключені також структурні перетворення, а удари абразивних часток розхитують зерна поверхні і сприяють руйнуванню. Для ударно-абразивного спрацьовування характерно утворення на поверхні тертя лунок внаслідок локальної пластичної деформації.

Абразивне зношування зазнають деталі сільськогосподарських, дорожньо-будівельних, транспортних машин, вузли металургійного

обладнання, металорізальних верстатів, бурове обладнання нафтової і газової промисловості тощо.

Гідроабразивне (газоабразивне) зношування - це абразивне спрацьовування внаслідок дії твердих часток, які переносяться потоком рідини або газу. Воно характерно для робочих коліс і напрямних апаратів гідравлічних турбін, лопаток газових турбін, парових котлів, труб і насосів земснарядів, підшипників гребних валів, обладнання нафтової і газової промисловості та інших.

Гідроерозійне (газоерозійне) зношування - це спрацьовування поверхні матеріалу внаслідок механічної дії високошвидкісного потоку рідини (газу). Кожен вид ерозії має підвиди, які є комбінацією окремих видів. Наприклад, гідроерозія може бути гідроабразивною, кавітаційно-ерозійним спрацьовуванням тощо.

Ерозійний вплив високошвидкісного потоку рідини або газу складається із тертя суцільного потоку та його ударів по поверхні. Тертя веде до розхитування і вимивання окремих об'ємів матеріалу, але швидкість спрацьовування у цьому випадку дуже мала. Більша роль належить динамічній дії потоку. Залежності від властивостей матеріалу можливі видриви окремих об'ємів або груп зерен з несприятливою орієнтацією до діючих сил. У пластичних матеріалах спочатку накопичуються мікропластичні деформації окремих ділянок, а коли здатність до зміцнення вичерпується, ці ділянки руйнуються і вимиваються. Рідина (пар) під час ударів в утворенні мікротріщини розсовує її стінки подібно до клину. Ерозія

посилюється внаслідок вихроутворення біля поверхневих пошкоджень та ударної дії потоку.

Ерозійне зношування відбувається на поверхнях елементів гідравлічних і парових систем, поршневих кілець авіаційних двигунів, лопатках компресорів газотурбінних двигунів тощо.

Кавітаційне зношування виникає тоді, коли у потоці рідини разом із зонами підвищеного тиску виникають зони розрядження і відбувається явище кавітації. Це явище полягає в тому, що при звуженні або наявності перешкод швидкісному потоку тиск може впасти до значення, яке відповідає тиску пароутворення при даній температурі. При цьому, залежно від опору рідини розтягненню, можливі розриви суцільного потоку. Утворена порожнина (каверна) заповнюється паром і газами, які розчинені у рідині. Утворені бульбашки переміщуються разом із потоком і попадають у зони високого тиску. Пар конденсується, гази розчиняються і бульбашки зхлопуються. В утворенні порожнини з великим прискоренням спрямовується рідина і відновлення суцільності потоку супроводжується гідроударом. Якщо каверни зхлопуються у поверхні деталі, то рідина з великою швидкістю б'є об стінку, утворюючи великі тиск і температуру. Кавітаційні бульбашки можуть вирости за 0,002 с до 6 мм у діаметрі і зруйнуватись за 0,001с . Багаторазові повторні удари на окремих мікроділянках ведуть до наклепу, місцевого руйнування і утворення заглиблень.

При відносних коливаннях твердого тіла і рідини тиск у рідині на межі розподілу може також зменшуватись, що призведе до дії вібраційної кавітації.

Гідродинамічна кавітація спостерігається у лопаток гідравлічних турбін і насосів, гребних гвинтів, гідромоніторах тощо; вібраційна - наприклад, на зовнішніх поверхнях гільз двигунів внутрішнього згоряння.

Зношування від втоми виникає внаслідок багаторазової пластичної і пружної деформації матеріалу. Цей процес має прихований (латентний) період, на протязі якого відбувається накопичення пошкоджень. Тріщини від втоми виникають на недосконалостях структури і, внаслідок повторної дії на поверхню тертя, вони збільшуються кількісно і по глибині на окремих ділянках поверхні. Достатньо 10⁸ - 10⁹ циклів для руйнування матеріалу навіть при дуже малих напругах. Первинні осередки можуть розташовуватись на деякій відстані від поверхні контакту у зоні максимальних дотичних напружень. Поверхня тертя при спрацьовуванні від втоми має вигляд глибоких борозд (ямок) з крутими стінками.

Багато деталей тертя, які працюють при достатньому змащуванні і помірних температурах, мають гладку поверхню без подряпин, відсутні помітні сліди переносу металу із сполученої поверхні. В цих умовах руйнування поверхні відбувається внаслідок диспергування (подрібнення) окремих ділянок контакту. Інтенсивність цього механізму спрацьовування невелика, а

шорсткість поверхні деталі мала. У мікроскопі помітні риси у напрямку руху, як результат взаємного вдавнення на ділянках контакту сполучених поверхонь. Процес спрацьовування відбувається таким чином: на ділянках фактичного контакту матеріал зазнає багаторазову пружну і пластичну деформацію, що веде до розрихлення в окремих місцях структури матеріалу з наступним відокремленням невеликих блоків.

Зношування від втоми внаслідок диспергування зазнають валки різних агрегатів і сполучені з ними підшипники, поршневі пальці шатунів, пари тертя паливної апаратури, добре змащованні шарнірно-болтові з'єднання тощо.

Зношування при заїданні - це зношування внаслідок схоплювання, глибинного виривання матеріалу, переносу його з однієї поверхні на іншу і дії нерівностей, які виникають, на сполучену поверхню. Схоплювання (явище місцевого з'єднання двох твердих тіл) відбувається внаслідок когезії, молекулярної взаємодії поверхонь, не захищених плівкою, коли не виконується правило додатного градієнту дотичного опору матеріалу поверхні. При цьому утворюються міцні металеві зв'язки, вузли схоплювання. Необхідною умовою глибиного виривання при наявності мастила є розрив мастильної плівки. Це відбувається під дією високої температури при пружній деформації поверхневих шарів, при наявності значної пластичної деформації або при сумісній дії підвищеної температури і пластичної деформації.

Схоплювання від мікроскопічних пошкоджень поступово переходить до локалізованого руйнування поверхневого шару і до глибинного виривання. При експлуатації машин для якісної оцінки ступеню пошкоджень поверхонь використовують такі терміни.

Задир - утворення внаслідок схоплювання помітних оком борозн з відтисненням матеріалу убоки і в напрямку ковзання. Може утворюватись і група борозн.

Заїдання - найбільша форма виявлення схоплювання, коли утворюються широкі і глибокі борозни з нерівними краями, великі нарости, можливе сплавлення поверхні. Може відбутись повне заклинювання деталей. Заїдання спостерігається у важко навантажених підшипниках ковзання, зубчатих передачах, у золотникових парах, шарнірних з'єднаннях, деталях циліндропоршневої групи двигунів, у напрямних верстатів, різьбових з'єднаннях тощо. Спрацьовування внаслідок пластичної деформації полягає у зміні розмірів або форми деталі через пластичну деформацію (зминання) її мікрооб'ємів. Це відбувається внаслідок надмірних напруг або випадкових значних перенавантажень і характерно для деталей, які входять у контакт з ударом. Цей вид спрацьовування спостерігається у шпоночних, шлицевих, штифтових і різьбових з'єднаннях, рійках і бандажах коліс рухомого складу залізничних колій, підшипниках ковзання (видавлювання бабітного шару) тощо.

Ударні, а також особливо важкі навантаження, ведуть до локальної деформації кілець підшипників кочення у контакті з

шариками або роликками з утворенням ум'ятин і заглиблень на поверхнях тертя. Цей особливий вид пластичної деформації називається бринелюванням.

Корозійно - механічне спрацьовування - спрацьовування внаслідок механічної дії, яка супроводжується хімічною взаємодією матеріала із середовищем.

Окислювальне спрацьовування відбувається в тому випадку, коли на сполучених поверхнях утворюються плівки оксидів, які в процесі тертя руйнуються і знову утворюються. Продуктами спрацьовування є оксиди. Таким чином, окислювальне спрацьовування - це спрацьовування окисних плівок, які знову відновлюються. В деяких випадках тертя суттєво прискорює інтенсифікує процес окислення, чому сприяють деформування матеріалу і високі температури.

Інтенсивність спрацьовування може бути високою, але поверхні тертя мають малу шорсткість, достатньо блискучі, оскільки оксиди заважають схоплюванню поверхонь.

Від інших видів корозійно-механічного спрацьовування окислювальне відрізняється відсутністю агресивного середовища. Воно відбувається при нормальних і підвищених температурах при сухому терті або недостатній кількості мастила. Для окислювального спрацьовування потрібен циклічний характер роботи пари тертя, при якому проміжок часу між послідовними руйнуваннями оксидних плівок буде достатнім для утворення плівки відносно великої

товщини. У випадку циклічного руйнування оксидів значної твердості спрацьовування може носити характер абразивного.

Окислювального спрацьовування зазнають калібри, деталі шарнірно-болтових з'єднань механізмів керування, підшипники сухого тертя; з'єднання фрикційних передач, що працюють без мастила тощо.

Спрацьовування при фретінг-корозії - корозійно-механічне спрацьовування сполучених тіл при малих відносних коливальних переміщеннях з амплітудою вад 0.025 мкм до 2.5 мм. Руйнування полягає в утворенні на сполучених поверхнях невеликих вибоїн і продуктів корозії у вигляді нальоту, плям і порошку. Цього виду спрацьовування зазнають не тільки вуглецеві сталі, але й, корозійно-стійкі матеріали. Продукти фретінг-корозії сталей і чавунів мають колір від світло-коричневого до темно-коричневого залежно від марок матеріалів, тиску, вологості і частоти циклів мікроколивань. Оксиди, нітриди й гідрати утворюються при руйнуванні практично усіх металів.

Механізм фретінг-корозії полягає в тому, що внаслідок дії сил тертя кристалева гратка поверхневих шарів при циклічних мікроколиваннях розхитується і руйнується. Процес руйнування відбувається як диспергування поверхні без видалення продуктів спрацьовування через малу амплітуду коливань. Відірвані частки металу окислюються. Додатковим джерелом пошкоджень може бути місцеве захоплення. Тобто спрощена схема процесу фретінг-корозії у початковій фазі така: деформація поверхні - корозія руйнування

оксидних та інших плівок - оголення чистого металу і місцями схоплювання - руйнування вузлів схоплювання - адсорбція кисню на оголених ділянках і окислення продуктів спрацьовування.

Таким чином при фретінг-корозії у зонах фактичного контакту утворюються невеликі каверни, заповнені оксидами. А так як окислення металу супроводжується збільшенням об'єму ($V_{OK} > V_{MET}$), то зростає тиск окислених часток металу, утворюються тріщини. Деякі тріщини з'єднуються і відбувається відколювання окремих об'ємів металу. Частки оксидів призводять до абразивної дії, тому плями у зонах фретінг-корозії вкриті ризиками у напрямку коливань. Пошкодження від фретінг-корозії є концентраторами напруг і знижують межу втоми. Фретінг - корозія відбувається на сполучених поверхнях валів і напресованих на них дисках, колесах, муфтах, підшипниках; на поверхнях шпонок і їх пазів; на поверхнях шліцевих, заклепкових і болтових з'єднань тощо.

Водневе спрацьовування обумовлено наступними процесами, які відбуваються у зоні тертя:

1) інтенсивним відділенням водню внаслідок трибодеструкції (розкладу) мастильних матеріалів, а також біографічного водню сталевих і чавунних деталей тертя;

2) адсорбцією водню на поверхнях тертя;

3) дифузією водню і його концентрацією у зоні найбільших температур, яка при терті розташована на деякій глибині від поверхні;

4) особливим характером руйнування поверхні, внаслідок одночасного розвитку великої кількості зародків тріщин з миттєвим утворенням дрібнодисперсного порошку матеріалу. Вплив водню призводить до збільшення швидкості (інтенсивності) спрацьовування того або іншого виду, а також до самостійного руйнування поверхонь тертя.

При водневому зношуванні диспергуванням водень посилює (залежно від його кількості у поверхневому шарі) диспергування сталі або чавуну. На поверхнях тертя відсутні вириви, задири, переноси металу. Вони можуть мати блиск і непомітні неозброєним оком риски у напрямку руху. Це характерно для деталей, які працюють в умовах доброго змащування.

Водневе зношування руйнуванням має специфічну особливість: поверхневий шар сталевий або чавунний деталі миттєво руйнується на глибині до 1-2 мкм. Це відбувається, коли поверхневий шар накоплює велику кількість водню, що характерно для поверхонь роторів і золотників керосинових насосів, дисків і барабанів пристроїв гальмування.

Порядок виконання роботи

1. На стенді із зразками деталей провести їх візуальний огляд .
2. Визначити види зношування за ознаками поверхонь тертя.

Заповнити табл.

Таблиця 7.2.

Деталь	Умови роботи	Характерні ознаки поверхні тертя	Висновки про види спрацьовування

Контрольні запитання

1. Що таке зношування?
2. Що таке провідний та супутній види зношування?
3. Дати характеристики:
 4. абразивного зношування;
 5. гідроабразивного (газоабразивного) зношування;
 6. гідроерозійного зношування;
 7. кавітаційного зношування;
 8. зношування від втоми;
 9. зношування при заїданні;
 10. зношування внаслідок пластичної деформації;
 11. корозійно-механічного зношування;
 12. окислювального зношування;
 13. зношування при фретінг-корозії;
 14. водневого зношування.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ТА РЕКОМЕНДОВАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дмитриченко М.Ф. Основи тертя та зношування / М.Ф. Дмитриченко, Р.Г. Мнацаканов, О.О. Мікосянчик // К.: Інформавтодор, 2006 – 216с.
2. Канарчук В. Є. Надійність машин / В. Є. Канарчук, С. К. Полянський, М. М. Дмитрієв // К.: Либідь, 2003 – 424с.
3. Афтаназів І. С. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням / І. С. Фтаназів, А. П. Гавриш, П. О. Киричок, П. П. Мельничук, Є. С. Попов, В. В. Третько // Житомир: ЖІТІ, 2001 – 516с.
4. Васілевський О. М. Нормування показників надійності технічних засобів / О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко // Вінниця: ВНТУ, 2010 – 129с.
5. ДСТУ 2862-94. Методи розрахунку показників надійності, 40 с.
6. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки, 90с.
7. Бардило А.П. Основи теорії надійності / А.П. Бардило, Г.Г. Тріщ // К.: НМК ВО, 1991 – 100с.
8. Решетов Д. Н. Работоспособность и надежность деталей машин / Д. Н. Решетов // М.: Высшая школа, 1974 – 206с.
9. Єріна А.М. Методологія наукових досліджень / А.М. Єріна, В.Б. Захожай, Д.Л. Єрін // К.: Центр навч. літ-ри, 2004 – 212с.
10. Арсенюк І. Р. Математичні методи дослідження об'єктів та систем / І. Р. Арсенюк, О. М. Роїк, Г. О. Лосєв // Вінниця: ВНТУ, 2004 – 96с.
11. Обертюх Р. Р. Триботехніка / Р.Р. Обертюх // Вінниця: ВНТУ, 1999 – 78с.
12. Царинник О.Ю. Металеві конструкції / О.Ю. Царинник // Львів: "Бескид Біт", 2004 – 304с.

13. Біліченко В. В. Основи технічної діагностики колісних транспортних засобів / В. В. Біліченко, В. Л. Крещенецький, Ю. Ю. Кукурудзяк, С. В. Цимбал // Вінниця: ВНТУ, 2012 – 118с.
14. Нагорный В. М. Техническая диагностика машин / В. М. Нагорный // Суми: СумГУ, 2006 – 231с.
15. Скрипник В.М. Альтернативные испытания малых выборок на надежность / В.М. Скрипник, А.Л. Гречин // Минск: Наука и техника, 1986 – 240с.
16. Рудавський Д. В. Залишковий ресурс металевих елементів конструкцій у водневмісних середовищах / Д. В. Рудавський // К.: Наукова думка, 2011 – 207с.

Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Кафедра обладнання харчових технологій

Вітенько Тетяна Миколаївна

Кравець Олег Ігорович

МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

до виконання лабораторних робіт з курсу:

“ОСНОВИ ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ МАШИН”

для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності

133 «Галузеве машинобудування»

Папір офсетний. Гарнітура «Таймс». Умов.друк.арк.

Наклад 10 прим.

