

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В. П. Шеремет, С. Ж. Боду

**Методичні рекомендації з курсу
"ОСНОВИ ТРИБОТЕХНОЛОГІЇ"
до виконання лабораторних робіт**

Частина 1

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв 2006

Шеремет В.П., Боду С.Ж. Методичні рекомендації з курсу "Основи триботехнології" до виконання лабораторних робіт: В 2 ч. – Миколаїв: НУК, 2006. – Ч. 1. – 32 с.

Кафедра технології суднового машинобудування

Курс триботехнології передбачає проведення шести лабораторних робіт.

У першій частині містяться вказівки щодо особливості виконання трьох робіт, наведені загальні відомості методики вимірювання шорсткості, залишкових напружень та величин зносу поверхонь вузлів тертя та фрикційних з'єднань. Подано необхідний довідковий матеріал, а також викладено основні положення та рекомендації щодо методики лабораторних робіт.

Призначено для студентів спеціальності "Технологія суднового машинобудування".

Рецензент канд. техн. наук, доцент В.О. Мозолюк

Лабораторна робота №1

МЕТОДИ ОЦІНКИ ТА ВИМІРЮВАННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ І ФРИКЦІЙНИХ З'ЄДНАНЬ

Мета й задачі роботи – вивчити існуючі методи контролю шорсткості поверхонь вузлів тертя; ознайомитись з технічними можливостями апаратури для контролю шорсткості поверхонь; оволодіти навиками обґрунтованого вибору апаратури й способів для визначення шорсткості поверхонь; практично закріпити навик використання окремих видів приладів і способів визначення шорсткості поверхонь.

Методичні вказівки

Геометрична якість поверхонь тертя, поряд із точністю розміру й форми, характеризується шорсткістю поверхні як після її обробки, так і після експлуатації у визначений час в конкретних умовах.

Шорсткість поверхні – це сукупність мікронерівностей поверхні з відносно малими кроками на базовій довжині (рис. 1.1). ДСТУ 2413-94 встановлює шість параметрів шорсткості поверхні: Ra , Rz , $R_{\max}$, Sm , S , t_p .

Параметр Ra характеризує середню висоту всіх нерівностей профілю; Rz – середню висоту найбільших нерівностей; $R_{\max}$ – найбільшу висоту профілю. Крокові параметри Sm , S , t_p введено для обліку різної форми і взаємного розташування характерних точок нерівностей. Ці параметри дозволяють також нормувати спектральні характеристики профілю.

Параметри шорсткості, пов'язані з властивостями нерівностей у напрямку довжини профілю

Середній крок нерівностей профілю Sm – середнє значення кроку нерівностей профілю в межах базової довжини

$$Sm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Sm_i,$$

де n – число кроків у межах базової довжини l ; Sm_i – крок нерівностей профілю, дорівнює довжині відрізка середньої лінії, що перетинає профіль у трьох сусідніх точках і обмежений двома крайніми точками.

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

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i,$$

де n – число кроків нерівностей відносно вершин у межах базової довжини l ; S_i – крок нерівностей профілю вершин, дорівнює довжині відрізка середньої лінії між проекціями на неї найвищих точок сусідніх виступів профілю.

Числові значення параметрів шорсткості Ra , Rz , $R_{\max}$, Sm і S приведені в ДСТУ 2413–94.

Рекомендується використовувати переважно значення параметрів Ra , тому що еталони порівняння шорсткості поверхні за ДСТУ 2409–94 виготовляють саме з цими значеннями.

Параметри шорсткості, пов'язані з формою нерівностей

Опорна довжина профілю η_p – сума довжин відрізків b_i , що відтинаються на заданому рівні p у матеріалі профілю лінійкою, еквідистантною середній лінії m у межах базової довжини:

$$\eta_p = \sum_{i=1}^n b_i.$$

Відносна опорна довжина профілю t_p – відношення опорної довжини профілю до базової довжини, $t_p = \eta_p / l$.

Опорну довжину профілю η_p визначають на рівні перетину профілю p , тобто на заданій відстані між лінією виступів профілю й лінією, що перетинає профіль еквідистантно лінії виступів профілю. Лінія виступів профілю – лінія, еквідистантна середній лінії, що проходить через вищу точку профілю в межах базової довжини. Значення рівня перетину профілю p відраховують від лінії виступів і вибирають із ряду: 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 % від $R_{\max}$. Відносна опорна довжина профілю t_p може дорівнювати: 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 %.

Перевірка шорсткості поверхні проводиться якісно або кількісно.

Якісний контроль шорсткості відбувається візуально чи на дотик шляхом порівняння з еталоном або зі зразками шорсткості, виготовленими за ДСТУ 2409–94. На кожному зразку з набору зазначені величини параметрів Ra і вид обробки. Візуально можна оцінити шорсткості поверхні лише починаючи з $Ra = 0,6 \dots 0,8$ мкм і більш грубі.

Кількісний метод оцінки є найбільш інформативним для оцінки стану поверхні і дозволяє використовувати отримані їм фактичні значення параметрів в розрахунках кількісної оцінки, несучої здатності вузлів тертя і фрикційних з'єднань. Він так само може бути використаний для документального підтвердження якості поверхні.

Кількісні методи оцінки шорсткості поділяються, у свою чергу, на контактні й безконтактні.

Безконтактні (оптичні) методи здійснюються приладами світлового перетину й інтерференційними приладами. Принципова схема приладу світлового перетину наведена на рис. 1.2.

Мікроскоп МИС-11 призначений для вимірювання шорсткості поверхні, що має Rz і $R_{\max}$ від 40 мкм до 0,8 мкм.

Освітлена вузька щілина проектується мікроскопом на східчасту поверхню P_1 і P_2 . Напрямок падіння світла показано стрілками. При такому падінні світла зображення освітленої щілини на східчастій поверхні займе положення S_2 на нижній частині східця P_2 і положення S_1 – на верхній частині східця P_1 . У поле зору мікроскопа, розташованого під кутом 90° до осі проектуючого мікро-

скопа, видно не висоту виступу H , вимірювану перпендикулярно до поверхонь P_1 і P_2 , а її проекцію b .

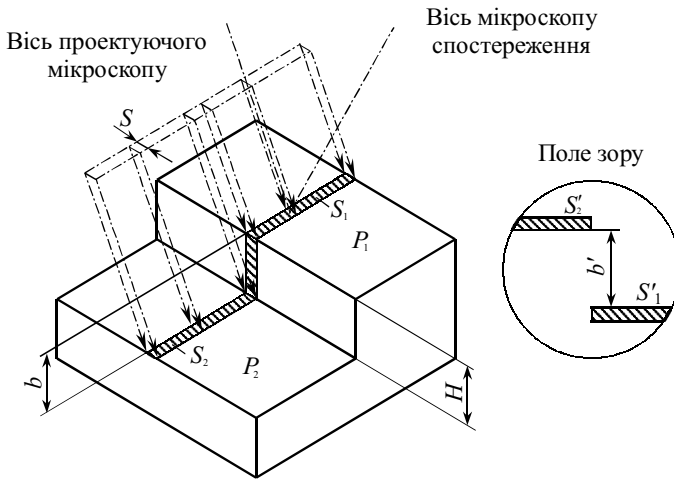


Рис. 1.2. Схема приладу світлового перетину

Прилад (рис. 1.3) складається з двох частин: мікроскопа $M_{\text{пр}}$ для висвітлення досліджуваної поверхні і мікроскопа $M_{\text{сп}}$ для спостереження і виміру профілю поверхні. Вісі обох мікроскопів нахилені під кутом 45° до досліджуваної поверхні зі збігом точок перетину вісі із предметними точками об'єтивів.

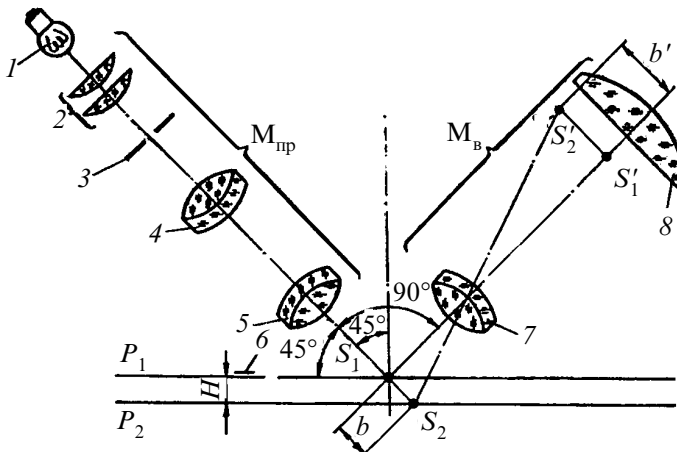


Рис. 1.3. Оптична схема подвійного мікроскопу МІС-11

Пучок світла від джерела 1 через конденсор 2 і вузьку щілину діафрагми 3 проходить у систему лінз 4 і 5, що проєктують зображення S_1 щілини діафрагми на поверхню, яка перевіряється, 6 (P_1) у виді вузької освітленої лінії.

Якщо на досліджуваній поверхні 6 відсутні мікронерівності, то об'єктив 7 мікроскопа $M_{\text{сп}}$ у площині сітки окуляра 8 дає зображення S'_1 тієї ж вузької освітленої лінії.

При наявності мікронерівностей H частина пучка світла, відбита від ділянки поверхні P_2 , при спостереженні буде здаватися вихідною з точки S_2 . Тоді зображення точки S'_2 на сітці окуляра 8 буде знаходитись на відстані b' від осі мікроскопа $M_{\text{сп}}$; $b'x$, де x – збільшення об'єктива 7.

Але тому, що $b = H / \cos 45^\circ = H\sqrt{2}$, то $b' = \sqrt{2}xH$, де H – дійсна висота нерівностей перпендикулярна поверхні.

Для вимірювання висоти нерівностей у мікроскопі $M_{\text{сп}}$ установлений окулярний мікрометр.

Подвійний мікроскоп В.П. Лінніка дозволяє також фотографувати досліджувану поверхню з висотою нерівностей від 0,9 до 60 мкм.

Мікроскоп МІІ-4 призначений для вимірювання шорсткості поверхні в межах R_z і R_{max} від 0,8 мкм до 0,1 мкм.

На рис. 1.4 наведено оптичну схему інтерференційного мікроскопа МІІ-4. Від джерела білого світла 5 світловий пучок, пройшовши конденсор 4, попадає на

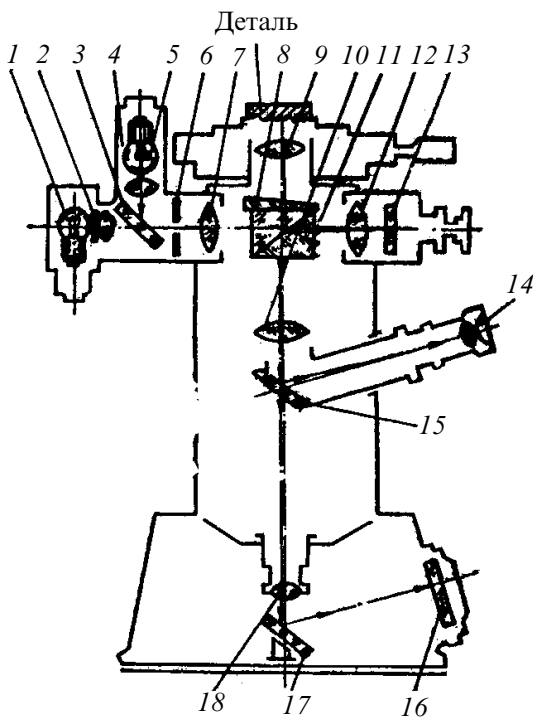


Рис. 1.4. Оптична схема інтерференційного мікроскопа МІІ-4

дзеркало 3, від якого через діафрагму 6 і об'єктив 7 направляється до розподіляючої призми 11, яка склеєна з двох призм. Діагональна площина однієї з цих призм посріблена, що робить її напівпрозорою. Це необхідно для поділу пучка світла на два. Один пучок проходить через призму без переломлення, а потім, пройшовши через об'єктив 12, попадає на дзеркало 13, що служить зразковою поверхнею. Відбившись від дзеркала 13, пучок світла повертається на призму 11, відбивається її діагональною площиною і направляється через об'єктив 10 на дзеркало 15.

Другий пучок світла відбивається діагональною площиною призми 11 і направляється через клин 8 і об'єктив 9 на контрольовану поверхню деталі, поміщену у фокусі цього об'єктива. Відбившись від контрольованої поверхні, пучок світла знову проходить через призму 11 і далі через об'єктив 10 на дзеркало 15, де інтерферується з першим пучком. Отриману інтерференційну картину спостерігають через окуляр 14. Компенсаційний клин 8 служить для рівняння різниці ходу променів у склі призми.

При вимірюванні шорсткості поверхні з регулярно розташованими нерівностями рекомендується працювати з монохроматичним світлом, при якому інтерференційна картина розміщується по всьому полю зору. Для отримання монохроматичного світла користуються ртутною лампою 1 і світлофільтром 2. У цьому випадку дзеркало 3 прибирається зі шляху проходження монохроматичного світла.

Коли вимірюються хаотично розташовані нерівності (при доведенні або шабруванні), більш доцільно працювати з білим світлом, при цьому в полі зору мікроскопа буде видно білу смугу, а по сторонах від неї – дві темні і кілька кольорових.

Найбільше число видимих у полі зору смуг полегшує при хаотичному розташуванні нерівностей оцінку ступеня їх вигину і, отже, підвищує надійність результатів вимірювань. При вимірюванні у білому світлі звичайно орієнтуються на чорні смуги.

При фотографуванні інтерференційної картини контрольованої поверхні дзеркало 15 (див. рис. 1.4) відводиться у бік, а промені світла від об'єктива 10 направляються через фотооб'єктив 18 на дзеркало 17 і від нього на матове скло або фотопластинку 16.

На приладі можна робити вимірювання інтерференційних смуг для подальшого визначення висот нерівностей контрольованої

поверхні. У цьому випадку звичайний окуляр 14 замінюється окуляром-мікрометром.

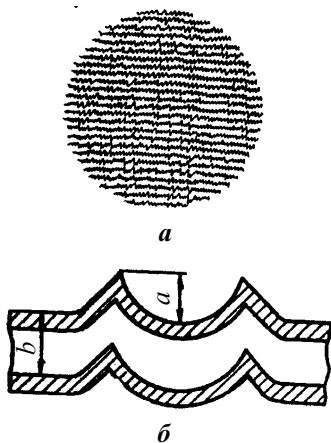


Рис. 1.5. Інтерферограма і схема вимірювання мікронерівностей

Інтерферограма контрольованої поверхні наведена на рис. 1.5,*а*, а схема вимірювання нерівностей – на рис. 1.5,*б*. Кожна інтерференційна смуга є геометричним місцем точок з однаковою різницею ходу двох променів від одного джерела. Якби контрольована поверхня була ідеально гладкою, то інтерференційна картина представляла б собою ряд рівнобіжних прямих смуг. Викривлення смуг спричинено мікронерівностями контрольованої поверхні.

Висоту мікронерівностей визначають за формулою

$$Rz = \frac{a}{b} \cdot \frac{\lambda}{2},$$

де a – величина викривлення інтерференційних смуг (див. рис. 1.5,*б*); b – інтервал між однойменними смугами; λ – довжина світлової хвилі (для зеленого світла $\lambda = 0,55$ мкм).

Вимірювання на мікроскопі параметрів a і b можна робити за допомогою окулярного мікрометра. Відносні погрішності вимірювання на мікроскопі при відліку за допомогою окулярного мікрометра не перевищують 5 %.

Контактними методами контроль шорсткості здійснюється за допомогою щупових приладів (профілографів, профілометрів та профілографів-профілометрів). Профілографи також можуть використовуватись для визначення величини лінійного зносу поверхонь у лабораторних іспитах на визначення зносостійкості.

У щупових приладах контактної дії для вимірювання висоти нерівностей використовують вертикальні коливання голки, яка переміщується по контрольованій поверхні. Коливання перетворюються в електричну напругу за допомогою індуктивних, механотронних, п'єзоелектричних та інших перетворювачів. Так, профілограф-профілометр–252, у якому використаний індуктивний перетворювач, дозволяє записувати профіль нерівностей в збіль-

шеному масштабі у вигляді профілограми чи вимірювати параметри шорсткості в цифровому вигляді за шкалою приладів (рис. 1.6). Прилад постачаний перетворювачем, електронним вимірювальним блоком 7 з лічильно-вирішувальним блоком 8 і записуючим пристроєм 9. Індуктивний перетворювач представлений у вигляді зведеного сердечника 5 із двома котушками 6. Котушки і дві половини первинної обмотки диференціального вхідного трансформатора включені за мостовою схемою, живло якої проходить від генераторів 4 і 10 із частотою 10 кГц. При переміщенні по контрольованій поверхні алмазна голка 3 перетворювача разом із якорем 1, підвишаним на опорі 2, робить крутильні коливання. Повороти якоря перерозподіляють індуктивності котушок, змінюючи тим самим вихідну напругу диференціального трансформатора. Зміни амплітуди напруги характеризують висоту мікронерівностей, а зміна частоти (при роботі приладу в режимі профілометра) – їх крок. Числові значення параметрів визначають за допомогою цифрового відлікового пристрою. При роботі приладу зміни напруги подаються на записуючий пристрій.

У цехових умовах виникає потреба в оперативному визначенні параметрів шорсткості поверхні, а не в записі профілограм. З цією метою випускають цехові профілометри – 253 і 283, принцип дії яких заснований на перетворенні коливань голки за допомогою

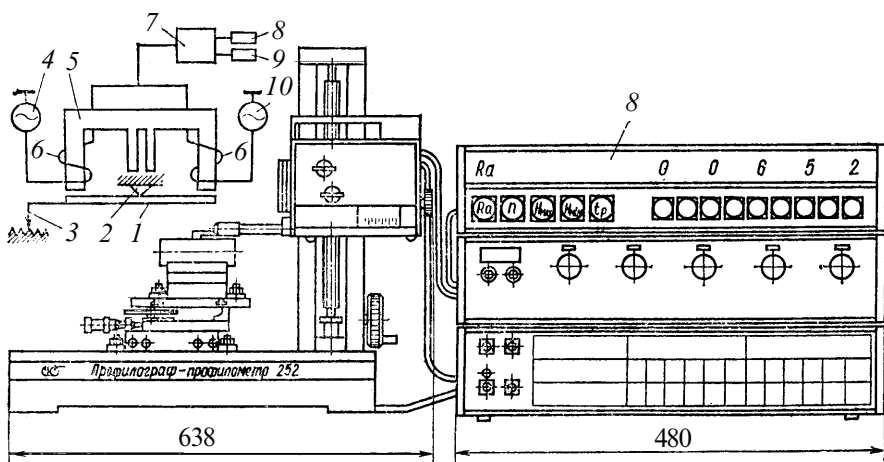


Рис. 1.6. Профілограф-профілометр: загальний вигляд і принципова схема

механотронного перетворювача (рис. 1.7). Алмазна голка 3 закріплена на кінці щупа 2, що через тонку мембрану пов'язаний з рухливим анодом механотрона 1. Кріплення механотрона за допомогою кільця й пружини дозволяє здійснювати його швидку заміну і чітке регулювання положення голки щодо передньої твердосплавної опори. Голка переміщується з постійною швидкістю. З механотрона сигнал подається на підсилювач, лінійний випрямлювач, інтегратор та стрілочний прилад, шкала якого проградуєрована в значеннях параметра Ra .

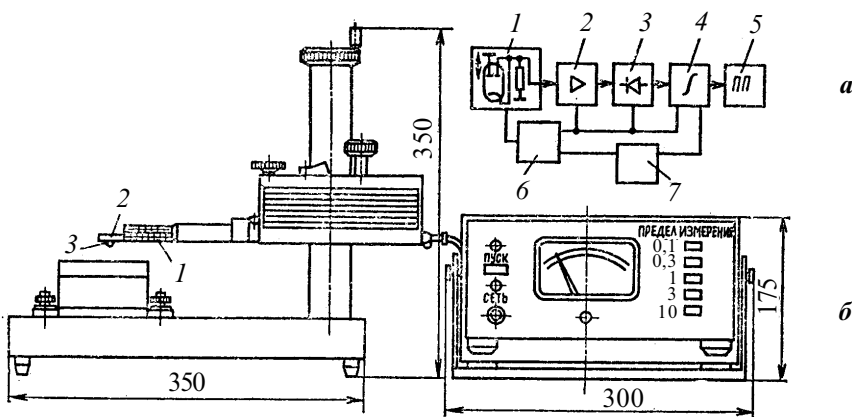


Рис. 1.7. Механотронний профілометр:

а – загальний вигляд; *б* – принципова схема: 1 – перетворювач; 2 – підсилювач; 3 – випрямлювач; 4 – інтегратор; 5 – показувальний прилад; 6 – джерело живлення; 7 – реле часу

Профілометр–283 має діапазон вимірювання Ra від 0,02 до 10 мкм, найменший вимірюваний діаметр внутрішнього циліндра 6 мм при глибині 20 і 18 мм при глибині 130 мм. Довжина траси складає відповідно 1,5 і 4,5 мм. Для вимірювання шорсткості великогабаритних деталей і у важкодоступних місцях спочатку знімають відбиток поверхні – її репліку, за якою оцінюють параметри шорсткості. Як репліки застосовують гіпсові і гутаперчеві суміші, а також самотвердкі пластмаси.

При виборі методу вимірювання шорсткості і типу приладу необхідно враховувати можливість контролю запропонованого кресленням параметра, межі виміру, припустимі відхилення контролюваного параметра, погрішність вимірювання й приладу,

продуктивність вимірювань, форму, розміри й матеріал деталі та інші фактори.

Характеристики основних приладів для кількісної оцінки шорсткості наведені в таблиці.

Таблиця 1. Характеристики приладів для контролю шорсткості

Тип приладу		Контрольовані параметри	Межі вимірювання	Базові довжини, мм
Профілограф-профілометр-201	Профілометр	Ra	8,0–0,02 мкм	0,08; 0,25; 0,8; 2,5
	Профілограф	Ra $Rz, R_{\max}$ S, Sm t_p	20–0,008 мкм 100–0,025 мкм 12,5–0,003 мкм 90–10 %	Весь ряд
Профілометр-253		Ra	2,5–0,04 мкм	0,25; 0,8; 2,5
Профілометр-283		Ra	10–0,02 мкм	0,25; 0,8
Профілограф-профілометр-252 (с цифровим відліком)	Профілометр	Ra $R_{\max}$ Sm t_p	100–0,02 мкм 200–0,1 мкм 12,5–0,003 мкм 100–0 %	2,5; 0,8; 0,25; 0,08
	Профілограф	$Rz, R_{\max}$ Ra S, Sm t_p	250–0,02 мкм 60–0,05 мкм 12,5–0,003 мкм 100–0 %	Весь ряд
Прилади світлового перетину	ПСС-2 (МИС-11)	$Rz, R_{\max}$ S, Sm	40–0,08 мкм 20,5–0,002 мкм	2,5; 0,8; 0,25; 0,08; 0,03; 0,01
ОРИМ-1		$Rz, R_{\max}$ S, Sm	40–0,04 мкм 20,5–0,002 мкм	2,5; 0,8; 0,25; 0,08; 0,03; 0,01
ПТС-1		$Rz, R_{\max}$ S, Sm	320–40 мкм 6,3–0,02 мкм	8,0; 2,5; 0,8; 0,25
ТПС-4М		$Rz, R_{\max}$ S, Sm	1600–63 мкм 6,3–0,1 мкм	8,0; 2,5
Мікроінтерферометр МИИ-4		$Rz, R_{\max}$ S, Sm	0,8–0,1 мкм 0,25–0,02 мкм	0,25; 0,08; 0,03; 0,01

Матеріальна база

1. Зразки шорсткості.
2. Профілограф-профілометр.
3. Зразки поверхонь різної шорсткості.
4. Креслення деталей з поверхнями різної чистоти.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з інструкцією роботи на профілографі-профілометрі.
2. Ознайомитися з методикою використання зразків шорсткості.
3. Визначити за допомогою зразків шорсткість поверхонь виданих деталей.
4. Виміряти за допомогою профілографа-профілометра шорсткість поверхонь виданих деталей.
5. Зробити запис однієї профілограми.
6. Зробити висновки про відповідність шорсткостей визначених за зразками шорсткості та вимірюванням профілографом-профілометром.
7. Ознайомитися з виданим кресленням деталі та підібрати відповідний метод і прилади для контролю.

Контрольні питання

1. Дайте визначення параметрам шорсткості (Ra , Rz , $R_{\max}$, Sm , S , t_p).
2. Назвіть методи контролю шорсткості й сфери застосування.
3. Назвіть засоби визначення шорсткості поверхні.
4. Чим відрізняється шорсткість поверхні від хвилястості й похибки форми?
5. Принцип роботи приладів світлового перетину.
6. Принцип роботи інтерференційних мікроскопів.
7. Принцип роботи профілографа-профілометра.
8. Як визначається шорсткість великогабаритних деталей та у важкодоступних місцях?

Рекомендована література

1. ДСТУ 2413–94 ОНВ. Основні норми взаємозалежності. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення. – Введ. 01.01.05. – К.: Держспоживстандарт України, 1997.
2. Якушев А.И., Воронцов Л.Н., Федотов Н.М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М.: Машиностроение, 1987. – 352 с.

ВИЯВЛЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУГ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ ТА ФРИКЦІЙНИХ З'ЄДНАНЬ

Мета й задачі роботи – ознайомитись з існуючими методами визначення залишкових технологічних напруг; вивчити експериментальні методи визначення залишкових напруг; набути практичні навички визначення величини залишкових напруг.

Методичні вказівки

Технологічні залишкові напруги класифікуються за протяжністю силового поля та фізичною сутністю.

Напруги 1-го роду – макронапруги, що охоплюють зони, співрозмірні з розмірами деталі; ці напруги мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі; *напруги 2-го роду* – мікронапруги, що поширюються на окремі зерна металу чи групу зерен; *напруги 3-го роду* – субмікроскопічні, що відносяться до перекручувань атомних ґраток кристала, їх орієнтація пов'язана зі структурою атомних ґраток.

Макронапруги в деталі виникають у результаті дії різних технологічних факторів при її виготовленні.

Технологічні фактори (методи і режими обробки, стан інструмента, ЗОР, а також умови виконання заготівельних операцій і термообробки) являються сильним джерелом впливу на величину й показники залишкових напруг. Точіння зазвичай викликає появу розтягувальних напруг, що можуть досягати величини до 700 Н/мм^2 ; глибина їх поширення знаходиться в межах $50\ldots 200 \text{ мкм}$ залежно від умов обробки. При фрезеруванні виникають як розтягувальні, так і стискувальні напруги залежно від умов фрезерування. При шліфуванні дуже рідко виникають розтягувальні напруги. Величина і знак макронапруг після механічного полірування деталей залежать від попередньої обробки, але в більшості випадків полірування сприяє появі незначних стискуючих напруг (до 30 Н/мм^2).

Залишкові напруги впливають на метал так само як і напруги, викликані робочим навантаженням.

Залишкові напруги впливають на опір пружної та пластичної деформації, втому матеріалів, зносостійкість і опір корозії.

Теоретичне прогнозування залишкових напруг дуже складне через велику кількість впливаючих факторів, тому їх експериментальне визначення відіграє дуже важливу роль.

Основними методами визначення залишкових напруг є механічні і рентгенівські. Перспективними для промислового застосування є електрофізичні методи, при яких залишкові напруги визначаються за зміною електромагнітних властивостей поверхневого шару.

Механічні методи визначення залишкових напруг одержали найбільше поширення через свою простоту і внаслідок того, що в них використовуються такі ж уявлення про напруги, як і при розрахунках деталей на міцність, твердість та стійкість.

Механічні методи засновані на припущенні, що розрізання чи видалення частини деталі з залишковими напругами еквівалентні додатку до основної деталі на знов утворених поверхнях напруг, зворотних залишковим. Ці зворотні напруги викликають деформацію деталі чи зусилля в пристроях, що перешкоджають процесу деформації. Вимірюючи деформації, що виникають (деформаційними методами) чи сили реакції (силовими методами), можна обчислити залишкові напруги.

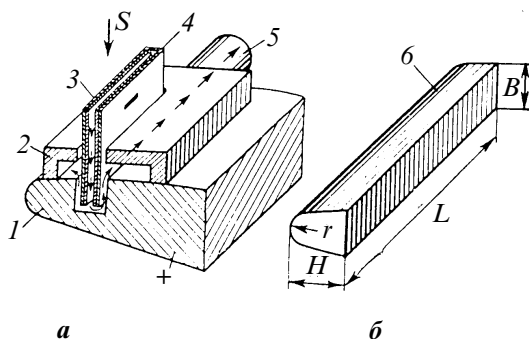


Рис. 2.1. Схема (а) електрохімічного вирізання зразку (б) для визначення залишкових напруг в нарізку лопатки:

1 – відрізуваний зразок; 2 – місцева електролізна ванночка; 3 – катод із латуні ЛС 59-1; 4 – ізоляція неробочих ділянок катоду; 5 – відвід електроліту; 6 – відрізаний зразок; S – напрямок подачі електроду

Використання механічних методів визначення залишкових напруг пов'язане з вирізанням зразків із досліджуваних деталей. Методи вирізання не повинні вносити додаткових напруг на досліджувані поверхні. Найбільше поширення має електроерозійне й електрохімічне прошивання (рис. 2.1).

Для вирізки зразків з великих деталей чи деталей із пластмас застосовують механічну розрізку на чистових режимах

обробки при інтенсивному охолодженні. Після механічної вирізки металевих зразків рекомендується стравлювати зі знов утворених поверхонь шар товщиною 0,2 мм для видалення напруг, що виникають при вирізці.

Для визначення глибини залягання залишкових напруг і їх розподілу по глибині застосовують методики поступового стравлювання шару із залишковими напругами і послідовним вимірюванням зміни деформації зразку.

Для визначення величини залишкових напруг на поверхнях великогабаритних деталей довільної форми застосовують методику вирізаних стовпчиків.

Для цього на досліджувану поверхню наклеюють 3 тензодатчики відповідно до схеми (рис. 2.2).

Після цього ділянка з тензодатчиками вирізається повністю або біля неї утворюється порожнина у формі циліндра. При вирізанні не повинні виникати додаткові напруги, а зона їх впливу не повинна сягати тензодатчиків. Вимірюють деформації тензодатчиків і розраховують залишкові напруги за такими залежностями:

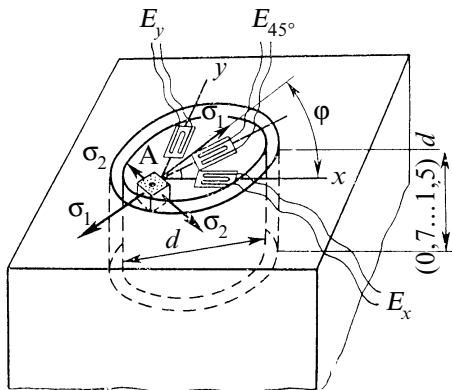


Рис. 2.2. Визначення головних залишкових напруг σ_1 й σ_2 на поверхні великогабаритних деталей методом вирізаних стовпчиків

$$\sigma_{\tau} = -\frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_{\tau} + \mu\epsilon_{oc}); \quad \sigma_{oc} = -\frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_{oc} + \mu\epsilon_{\tau}),$$

де ϵ_{τ} і ϵ_{oc} – відносні деформації в тангенціальному й осьовому напрямках.

Наявність залишкових напруг у полікристалічних тілах, якими є метали, призводить до різних інтерференційних ефектів рентгєнівських променів, відбитих від поверхні зразків в залежності від розмірів зони, де ці напруги врівноважуються. Проводячи відповідні вимірювання можна обчислити величину залишкових напруг.

Через особливості методу рентгенівського виміру залишкових напруг і складності його методик можуть бути розбіжності між величинами напруг, розрахованих рентгенівським і механічним методом.

Оцінка залишкових напруг відповідно до змін електромагнітних властивостей поверхневого шару завдяки своїй простоті, високій продуктивності, можливості визначати напруги в тонких шарах і відсутності у необхідності руйнувати робочі поверхні, може бути застосована у виробничому контролі.

Але через низьку точність методу, оскільки електромагнітні властивості залежать не тільки від залишкових напруг, він не може бути застосований у дослідницьких роботах.

Матеріальна база

1. Заготівка-викуванець (попередньо оброблений).
2. Токарно-гвинторізний верстат.
3. Мікрометр і мікрометричний нутромір.

Порядок виконання роботи

1. Зробити розмітку торців викуванця згідно рис. 2.3.
2. Зовнішню й внутрішню поверхні викуванця під вирізку кільця обробити до шорсткості $\sqrt{Ra0,63} \dots \sqrt{Ra0,32}$.

3. Вирізати кільця розмірами 15×15 на мінімальних режимах різання ($v = 8 \dots 10$ м/хв, $S = 0,05 \dots 0,1$ мм/об) при інтенсивному охолодженні. Відрізані кільця обережно відокремити від деталі й покласти на торець щоб уникнути жолоблення від власної ваги.

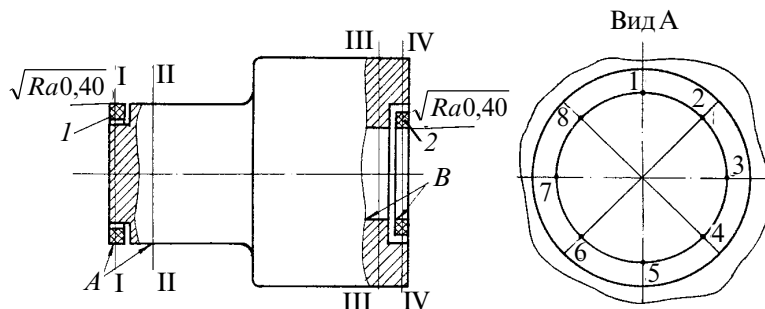


Рис. 2.3

4. Заміряти діаметри вирізаних кілець до і після вирізання (у конкретних перетинах).

5. Обчислити деформації у кожному перетині і підрахувати середню деформацію кожного кільця.

6. Обчислити залишкові напруги на зовнішній і внутрішній

поверхні викування: $\sigma_{\tau} = \frac{E \cdot \delta}{D_{cp}}$, де σ_{τ} – тангенціальні залишкові

напруги; E – модуль Юнга ($E = 2,06 \cdot 10^5$ Н/мм²); δ – середнє значення деформації кільця, мм; D_{cp} – середнє значення вимірів діаметрів до відрізки кілець.

Залишкові напруги для заготовок діаметром до 550 мм повинні бути не більш 30 Н/мм², заготовок діаметром 550...1000 мм не більш 40 Н/мм², заготовок діаметром більш 1000 мм – не більш 50 Н/мм².

7. Зробити висновки щодо відповідності залишкових напруг допустимим.

Контрольні питання

1. Назвіть причини виникнення залишкових напруг.
2. Назвіть види залишкових напруг.
3. Дайте характеристику методам визначення залишкових напруг.
4. Принцип механічного методу визначення залишкових напруг.
5. Назвіть заходи для зменшення залишкових напруг.
6. Приведіть приклади корисного використання залишкових напруг.

Рекомендована література

1. Технологические остаточные напряжения / Под ред. А.В. Подзея. – М.: Машиностроение, 1973. – 215 с.
2. Соловьев С.Н. Основы технологии судового машиностроения. – Л.: Судостроение, 1992. – 350 с.

МЕТОДИ ОЦІНКИ ТА ВИМІРЮВАННЯ ЗНОСУ ПОВЕРХОНЬ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ

Мета і задачі роботи – вивчити основні характеристики існуючих методів контролю зносу та зони їх застосування; навчитися обґрунтовано підбирати метод контролю зносу для конкретних умов роботи та випробувань; ознайомитись з основними інструментами й приладами для контролю зносу та їх технічними характеристиками.

Методичні вказівки

Одержати достовірну інформацію про технічний стан виробу або його окремого вузла та динаміку змін неможливо без наявності надійних методів контролю зносу робочих поверхонь. Через велику розмаїтість вихідних вимог, конструкцій виробів і умов їх роботи не досить використати один чи два методи визначення зносу.

Основні вимоги до застосовуваного методу контролю зносу:

1. Контроль за зносом повинен вестися безперервно без зупинки машини чи механізму.

2. Метод не повинен вимагати розбір досліджуваних вузлів.

3. Час роботи машини, протягом якого вимірюється знос, повинен бути мінімальним.

4. У процесі зносу має бути точно відомо, яка деталь і в якому місці зношується.

5. Методи мають бути простими, цілком доступними й застосовуваними як для дослідження зносу в процесі стендових випробувань серійних і знову створюваних машин, так і для контролю за зносом у процесі експлуатації.

6. Витрати на дослідження й контроль мають бути мінімальними.

Жоден з існуючих методів не задовольняє усіх перерахованих вимог.

В даний час відомі наступні методи визначення зносу деталей машин і механізмів: оцінка зносу відповідно до змін технічних параметрів машин; мікровимірювання; ваговий метод; метод хімічного аналізу; метод спектрального аналізу; метод профілографування; метод штучних баз; радіоізотопні методи.

Кожний із зазначених методів не є універсальним, має свої позитивні й негативні сторони. Викладемо коротко суть кожного з них.

Оцінка зносу за зміною технічних параметрів машин

Цей метод найчастіше застосовується в процесі експлуатації машин і механізмів. Наприклад, знос поршневого кільця двигуна внутрішнього згоряння визначається за зміною вихлопу та підвищень витраті мастила. Відомо, що при підвищеному зносі кільця втрачається потужність машини. Однак, коли працює велика кількість циліндрів двигуна, локалізувати причину зносу стає досить важко. У випадку роботи насоса знос окремих деталей визначається за втратою його продуктивності, витіканням рідини між циліндром та плунжером.

Зазначений метод є інтегральним і не дозволяє судити про розподіл зносу однієї зі сполучених деталей та місце зносу. Тому в дослідженнях процесів зношування при визначенні впливу різних параметрів (виду палива, змащення, режиму роботи) він застосований бути не може. Крім того, такий метод пов'язаний із тривалою експлуатацією машин та механізмів.

До зазначеного методу найбільш близькі вібро-акустичні методи, тому що зміна вібро-акустичних характеристик є у більшості випадків наслідком зносу механізму, а загальний рівень шуму, виробленого механізмом, можна розглядати як інтегральний показник для оцінки стану механізму. У деяких випадках гранично допустиме значення цього показника може розглядатися як критерій відмови. Загальний рівень шуму чи вібрацій є результатом додавання шумів чи вібрацій, створюваних окремими елементами машини. У багатьох випадках частоти цих складових цілком визначені, тому що залежать від швидкості обертання, періоду взаємодії та інших факторів. Це дає можливість методом частотного аналізу виділити з загального спектра шумів певні гармоніки і, аналізуючи їх зміни в часі, оцінювати стан окремих елементів машини.

Цікаву інформацію можна одержати також в результаті амплітудного аналізу спектра коливань: існує цілком визначене співвідношення між амплітудою коливань сили тертя й видом зношення. Аналізуючи спектр коливань, можна установити переважний вид зношування в даний момент, а також установити моменти

переходу від одного виду зношування до іншого. Це дає змогу розглядати вібро-акустичні методи дослідження як самостійну групу методів, що дозволяє якісно оцінювати процеси зношення на відміну від кількісної оцінки, характерної для більшості інших методів дослідження зносу.

Мікровимірювання

В даний час для визначення зносу деталей машин порівняно часто застосовується метод мікровимірювання, заснований на вимірюванні за допомогою мікрометра чи іншого приладу з індикатором тих самих розмірів деталі до і після випробувань на зношення. За різницею лінійних розмірів судять про величину лінійного зносу, причому він може бути виявлений у різних місцях поверхні тертя. Слід зазначити, визначення зносу вимірюванням у всіх випадках пов'язано зі значними погрішностями, причини яких полягають у наступному:

1. При визначенні зносу за діаметром отвору циліндра (втулки) чи зовнішньою поверхнею вала фактично встановлюється зміна діаметра, що може бути наслідком не тільки зносу поверхні, але і змін діаметра шляхом деформації деталі (особливо це стосується циліндрів двигунів внутрішнього згоряння).

2. Повторне вимірювання мікрометричним інструментом того самого діаметра деталі може забезпечити лише наближене вимірювання величини місцевого зносу.

3. При вимірюванні контактними приладами неминучі погрішності, що залежать від фактично непостійного контакту вимірювального наконечника приладу з поверхнею деталі.

4. Метод пов'язаний з можливою помилкою вимірювання внаслідок мінливості температури, при якій робляться виміри, і неоднакової температури інструмента та вимірюваного предмета. Так, при діаметрі циліндра 100 мм і різниці в 1°C між циліндром й інструментом похибка буде близько 1 мкм.

Для проведення вимірювання потрібне повне або часткове розбирання з'єднань, що збільшує трудомісткість операції і призводить до додаткових похибок за рахунок вторинного прироблення після зборки вузла. Результати виміру зносу, одержані при мікровимірюванні, включають зміну розмірів деталі не тільки від зносу, але і від деформації в процесі збирання, роботи й вимірювання, причому іноді деформація може мати зворотній зносу напрямок і за своїм значенням перевищувати величину зносу. Тому

навіть при використанні вимірювальних приладів високого класу точності похибка в результаті визначення зносу складає ± 5 мкм.

Таким чином, підвищення точності вимірів пов'язане з необхідністю створення постійних температурних умов при першому й другому вимірюванні; потребою відтворення геометричних умов виміру та ретельного очищення поверхні та ін. Тому достовірні результати мікровимірювання дає тільки при досить великій величині зносу.

Відзначимо, що в результаті мікровимірювання встановлюється лише кінцева величина зносу за визначений період роботи механізму. При цьому не можливо визначити характер наростання (динаміку) зносу в процесі випробувань. Збільшення числа вимірювання призводить до збільшення числа процедур розбирання-зборки, що вносить істотні спотворення в загальну картину процесу зношування.

Ваговий метод

Одним з найвикористовуваних методів визначення зносу деталей невеликої маси є їх зважування до і після випробувань.

Визначення лінійного зносу за нелінійною втратою маси відбувається за допомогою обчислення, заснованого на припущенні про рівномірний розподіл зносу по поверхні тертя. Може бути прийнята заздалегідь розроблена закономірність розподілу лінійного зносу в залежності від умов роботи деталі. Якщо ж відомий закон розподілу зносу по поверхні, то іноді відмовляються від обчислення лінійного зносу і ваговий знос (наприклад, поршневого кільця) приймають за безпосередню характеристику поведінки деталі при випробуванні.

Ваговий метод визначення зносу є інтегральним, тому що фактично визначається сумарна втрата маси за всією поверхнею тертя.

Слід, однак, відзначити, що сучасні прецизійні ваги забезпечують досить високу точність визначення маси. Наприклад, ваги, що випускаються швейцарською фірмою "Меттлер", можуть забезпечити точність, яка відповідає вимірюваній величині маси.

Вантажопідйомність, г	100	200	1300	2500	5000	7500	13000
Точність, мг	0,002	0,05	10	100	200	500	1000

Як видно з наведеного співвідношення, точність методу погіршується зі збільшенням маси деталі. Тому метод застосовують,

головним чином, для дослідження невеликих деталей: поршневих кілець, вкладишів, втулок, зразків для випробувань на машинах тертя і т.п.

Застосування цього методу вимагає розбирання з'єднань і ретельного очищення деталі від різного роду налипань і відкладень масла, продуктів зносу, нагару, смоли, лаку. Недотримання цієї умови, наприклад, при визначенні зносу підшипників колінчатого вала двигуна, може викликати значні похибки внаслідок проникнення продуктів зносу шийки вала в антифрикційний шар.

Ваговий метод може виявитися взагалі непридатним, коли знос, що викликав зміну розмірів деталі, відбувається внаслідок не тільки відділення часток, але і пластичного деформування.

Складно цим методом користуватися також у випадку дослідження зносу деталей, виготовлених з пористих матеріалів (металокераміка, бронзографіт, залізографіт). Ці матеріали здатні утримувати в собі різні об'єми масла при нагріванні й охолодженні, а, отже, змінювати в залежності від цього характеристику маси деталей.

Хімічний аналіз

Розбирання машини, необхідне для визначення зносу ваговим методом чи шляхом мікровимірювання, у більшості випадків небажане, тому що після кожного розбирання і наступного збирання взаємне розташування деталей дещо змінюється, що спричиняє додаткове прироблення. Це особливо відноситься до двигунів внутрішнього згоряння. У таких випадках застосовується засіб оцінки інтегральної величини зносу по збагаченню мастила продуктами зносу.

Від мастила відбирається проба, спалюється, і в золі визначається зміст металу за допомогою хімічного аналізу чи полярографічного методу. Оцінка зносу деталей циліндро-поршневої групи двигунів автотракторного типу на основі визначення зміни вмісту заліза в мастилi набула застосування при дослідженнях впливу мастил на знос двигунів, зокрема, на їх прироблення.

Цей метод визначення зносу є також інтегральним, тому що продукти зносу одночасно відокремлюються від декількох тертових поверхонь. Основним показником зношування тут служить швидкість, з якою відбувається зміна концентрації заліза в маслі. Цим методом вимірюється саме швидкість, з якою відбувається зношування, а не сам процес зносу, не його абсолютна величина.

Саме тому він в основному застосовується при порівняльній оцінці впливу на зношування деталей таких факторів, як сорт мастила, температура охолодження рідини і т.п.

Слід зазначити, що даний метод є високочутливим. Наприклад, вміст заліза в межах 5...100 частин на 1 млн частин масла визначається з точністю 5...10 %, а при полярографічному способі вимірювання чутливість визначення вмісту заліза в маслі ще вище.

Головним недоліком цього методу є складність і тривалість проведення аналізу проби мастила. Незважаючи на високу чутливість, він не гарантує включення до складу проб усіх продуктів зносу. Частина з них, особливо великі частки, як правило, осідають на стінках картера й трубопроводів, а отже, не беруть участь в аналізі. У цьому випадку збагачення мастила продуктами зносу не відповідає зносу деталі і результат виходить заниженим.

Спектральний аналіз

Метод спектрального аналізу вмісту механічних домішок у мастилі успішно застосовується для вимірювання зносу двигунів внутрішнього згоряння, різних коробок передач. Чутливість спектрографічного методу визначення вмісту металевих домішок в маслі досягає 10^{-6} , а для деяких елементів 10^{-8} г на 1 г мастила. Така чутливість дозволяє, наприклад, визначити через декілька годин роботи двигуна зміст в маслі легуючих елементів матеріалу колінчатого вала, циліндричних втулок, вкладишів, поршневих кілець. Недоліками методу є висока вартість устаткування для спектрального аналізу, необхідність залучення висококваліфікованого персоналу, тривалість проведення аналізу й обробки результатів, а також неможливість конкретно оцінити місце найбільшого зносу.

Метод профілографування

У нашій країні визначення величини зносу за допомогою профілографа почалося в 30-х роках XX століття. Спочатку профілограф був застосований для визначення зносу, що відбувається в межах висоти початкових мікронерівностей поверхні. Потім його пристосували для визначення величини більшого зносу; для цього тільки потрібно вибрати так звану постійну базу, якою може служити частина поверхні, що не зношується. Постійна база може бути створена штучно у вигляді поглиблення на досліджуваній поверхні тертя, дно якого часто виявляється нижче досліджуваної поверхні.

До недоліків цього методу варто віднести порівняльну складність самої операції профілографування. Профілограми зняті до і після випробувань неминуче відносяться до різних, хоча і близьких перетинів поверхні. З цим пов'язана похибка у визначенні лінійної величини зносу. При проведенні на металі подряпини по її краях утворюються завали, що порушують початкову шорсткість поверхні.

Іноді для визначення величини зносу на деталях малого розміру користуються оптичними приладами, такими як подвійний мікроскоп, мікроінтерферометр Лінніка та інтерференціальний мікроскоп, які дозволяють оцінювати мікронерівність поверхні. За допомогою таких приладів, як правило, вимірюють знос на робочих поверхнях вимірювальних інструментів, кінцевих мір, а також деталей приладів.

Профілографування найбільш доцільно застосовувати для деталей, що мають нерівномірний знос по поверхні. Профілографи-профілометри, що випускаються заводом "Калібр", призначені для визначення шорсткості й хвилястості поверхонь, дозволяють визначити знос з точністю до ± 1 мкм. Основним недоліком цього методу є обмеженість номенклатури досліджуваних деталей через форму, розміри й розташування досліджуваної ділянки поверхні. Внаслідок цього профілографування використовують для визначення зносу відносно невеликих деталей, що мають досить чисту й просту поверхню. При оцінці зносу методом профілографування, так само як при мікрометріруванні та зважуванні, потрібне розбирання припрацьованих з'єднань.

Метод штучних баз

В основі методу штучних баз лежить визначення кількісної величини лінійного зносу по зміні розмірів поглиблення заздалегідь відомого профілю, виконаного на досліджуваній поверхні. Іншими словами, якщо відомі геометрична форма поглиблення і його розмір на поверхні деталі, то нескладно визначити глибину, а, отже, знос. Для цього необхідно, щоб подряпина мала в перетині геометрично правильну, заздалегідь відому форму. Тоді про величину зносу можна судити за шириною подряпини, яку бачимо на випробуваній поверхні. Поглиблення може бути не тільки у вигляді подряпини, але і мати будь-яку форму для того, щоб один який-небудь її розмір закономірно зменшувався по глибині.

Положення дна поглиблення при зносі поверхні залишається незмінним, тому воно є тією штучною базою, від якої можна вести вимірювання відстані до поверхні. Знаючи заздалегідь співвідношення довжини й глибини відбитка, та спостерігаючи за його зміною, можна визначити величину лінійного зносу.

Поглиблення визначеного профілю може бути отримане в результаті вдавнення наконечника у вигляді піраміди чи конуса, висвердлювання конічного поглиблення, вирізання різцем гострокутної лунки, випилювання чи вишліфовування диском. Розмір діагоналі лунки вибирається в залежності від матеріалу, призначення деталі та передбачуваної величини зносу (звичайно не більш 1 мм).

Найчастіше в якості індентора застосовують квадратну піраміду з кутом при вершині між протилежними гранями 136° чи ромбічну з кутом між ребрами $\beta = 172^\circ 30'$ і $j = 130^\circ$. Виготовляються вони не тільки з алмазу, але і з твердих сплавів, а для відбитків на металах невисокої твердості – із загартованої інструментальної сталі.

В залежності від застосовуваного індентора і способу його використання розрізняють лунки, отримані на поверхні видавлюванням чи вирізанням. Якщо, наприклад, за допомогою квадратної піраміди виконати відбиток на плоскій поверхні пластичного матеріалу (рис. 3.1, *а*), то величина лінійного зносу Δb може бути підрахована за формулою $\Delta b = b_1 - b_2 = (c_1 - c_2) / Z$, де b – глибина відбитка; c – діагональ проекції відбитка на випробуваній поверхні (індекси 1 і 2 відповідають вимірюванням діагоналі до і після випробування); Z – коефіцієнт пропорційності, постійний на всій глибині від-

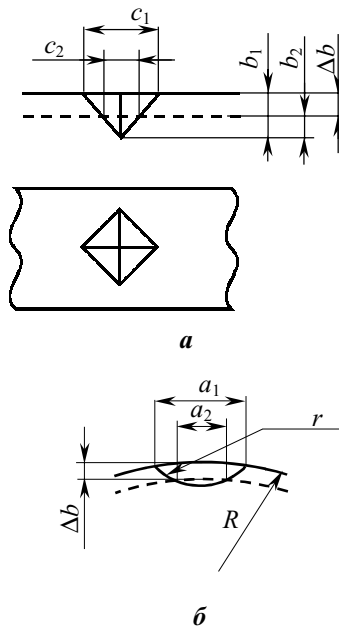


Рис. 3.1. Вимірювання зношення способом штучних баз:

а – для лунки, що отримана вдавлюванням квадратної піраміди; *б* – лунка отримана методом вирізання (опукла поверхня)

битка, якщо відбиток виконаний пірамідною правильною геометричною формою. Наприклад, для кута $\alpha = 136^\circ$ і $Z = 7$, тоді $\Delta b = (c_1 - c_2)/7$.

Одержання відбитків за допомогою кульок призводить до великої похибки, тому що в цьому випадку форма відбитків унаслідок пружного відновлення виходить відмінної від форми кульки, а необхідні виправлення робити важко, тому що вони залежать не тільки від властивостей випробуваного матеріалу, але й від величини відбитка.

Метод відбитків широко використовувався при дослідженні зношування направляючих металорізальних верстатів. Найчастіше в якості індентора використовувалася алмазна піраміда з квадратною основою й кутом при вершині між протилежними гранями 136° . Навантаження на наконечник коливалися від 35 до 75 кг, розміри відбитків – від 350 до 800 мкм. Для вимірювання довжини діагоналі відбитка застосовувався спеціальний прилад з відліковим мікроскопом.

У тих випадках, коли відсутні спеціальні прилади для нанесення відбитків, у якості індентора застосовують конічний керн. При визначенні зносу цим методом мають місце великі неточності через неперпендикулярність розташування осі конічного вістря до поверхні деталі, особливо у тому випадку, коли керн чи ударник, за допомогою якого наноситься удар, притримується рукою. Застосування керна не дає можливості забезпечити відбитки однакового розміру.

Основними негативними явищами при будь-якому вдавненні варто вважати пружне відновлення досліджуваного металу і видавлювання його частини, що утворює підвищення на поверхні навколо відбитка. Ці явища спотворюють вихідну шорсткість поверхні і перше визначення діагоналі відбитка, а тому вимагають з'ясування величини спучування й деформації для того, щоб установити, наскільки велика буде помилка при визначенні зносу різних матеріалів, якщо не враховувати ці явища. Спучування металу найчастіше видаляють вручну, дрібнозернистим наждаковим бруском, а іноді спеціальним інструментом чи припрацюванням.

Не можна не враховувати при визначенні величини зносу також і похибку, викликану відхиленням осі відбитків перпендикулярно до поверхні. У цьому випадку відбиток отримує неправиль-

ну форму і, щоб уникнути похибки, необхідно вводити виправлення, отримані експериментальним шляхом.

Метод відбитків може взагалі виявитися неприйнятним, якщо поверхневий шар у місці зносу пластично деформуються (м'які антифрикційні сплави, високі контактні напруги і т.п.).

Інша справа, якщо лунки на поверхні отримані не видавлюванням, а вирізанням. У цьому випадку на випробуваній поверхні вирізається лунка за допомогою обертового різця. Знаючи геометричні розміри різця й глибину лунки, можна обчислити її глибину.

Іноді застосовують метод висвердлених поглиблень, що наносяться на поверхню за допомогою свердлів зі спеціальним заточенням під визначеним кутом. Застосування цього методу вимагає розташування кінцевого поглиблення перпендикулярно досліджуваній поверхні. Якщо вісь кінця отвору буде відхилена і це не буде враховано при обчисленні зносу, то неминучі похибки. При зношуванні поверхні зменшується довжина лунки і скорочується відстань до дна. По різниці відстаней до і після зношування визначається величина зносу.

Відхилення при нанесенні лунок можуть бути внаслідок пружних деформацій механізму для нарізування лунок, переміщення в межах зазору деяких деталей механізму, пружних деформацій металу, на поверхні якого наноситься лунка. Щоб деякою мірою зменшити це явище, рекомендується прорізати лунки за кілька проходів, при цьому мати добре заточений інструмент і для зменшення на нього навантаження робити мінімальну подачу.

Слід зазначити, що вирізання лунки завжди супроводжується пластичною деформацією невеликого шару металу, що безпосередньо прилягає до стінок лунки. Хоча у вирізаних лунок немає того помітного спучування по краях поглиблення, що характерно для відбитків, однак майже у всіх випадках утвориться тонка задирка, що спрацьовується на початку випробовувань.

На відміну від методу відбитків метод вирізаних лунок вимагає спеціальних приладів, має свої особливості й істотні недоліки.

При нанесенні лунки на поверхню потрібно уважно стежити, щоб середня лінія дна лунки мала мінімальні відхилення від дійсної форми середньої лінії, описуваної різцем. Ці відхилення призводять до помилки в обчисленні глибини лунки, а, отже, і величини зносу.

Порівняльні дані показують, що теоретично розрахована глибина лунки, виконана в сталі й чавуні, відрізняється від дійсної приблизно на 5 %, при цьому форма середньої лінії лунки несуттєво відрізняється від кола. При обчисленні зносу лунки, розташованої уздовж кола, необхідно враховувати кривизну поверхні.

У випадку застосування вирізаної лунки для опуклої й увігнутої поверхонь (рис. 3.1,б) величина радіального зносу підраховується в такий спосіб:

$$\text{для увігнутої поверхні} \quad \Delta b = 0,125 (a_1^2 - a_2^2) \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right);$$

$$\text{для опуклої поверхні} \quad \Delta b = 0,125 (a_1^2 - a_2^2) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right),$$

де R – радіус циліндричної поверхні; r – радіус, що описує різець при вирізанні лунки; a_1, a_2 – початкова і кінцева довжина лунки.

Радіоізотопні методи

Більш пізніми методами визначення швидкості зношування є методи радіоактивних індикаторів і активаційного аналізу, засновані на використанні радіоактивних ізотопів. Сутність їх полягає в тому, що в матеріал досліджуваної деталі вводиться радіоактивний ізотоп чи інший індикатор. Разом із продуктами зносу в масилі буде осаджуватися пропорційна їм кількість індикатора. Якщо брати періодично пробу масла, то кожний раз можна по концентрації індикатора судити про кількість металу, що потрапив у масло. Існує кілька способів включення радіоактивних атомів у метал випромінюваної деталі. Можна, наприклад, у сплав, з якого складається деталь, ввести в невеликій кількості радіоактивний ізотоп елемента, що входить до складу сплаву, при цьому основні механічні властивості сплаву не зміняться. Іноді радіоактивний ізотоп уводиться як штучна домішка до сплаву, що теж практично не змінює його властивості.

Головне, щоб падіння інтенсивності випромінювання відбувалося повільно та вся маса введенного ізотопу рівномірно розподілялася у металі деталі.

Можна застосовувати вставки у виді дроту зі сплаву, що містить радіоактивний ізотоп. Ці вставки впресовуються перпендикулярно до поверхні тертя. По мірі зношування деталі буде зно-

шуватися і матеріал вставки. За інтенсивністю випромінювання продуктів зносу, які осаджуються в маслі, можна судити про знос тієї ділянки, на якій розташована вставка.

Різниця між методом радіоактивних індикаторів і активаційним аналізом полягає в тому, що в першому випадку радіоактивні частки, які потрапили в масло, реєструються за допомогою спеціальної апаратури, а потім визначають ваговий чи лінійний знос. Активаційний аналіз відповідає спектральному аналізу, але наявність зношених часток металу в маслі визначається за радіоактивністю, яка створюється шляхом опромінення потоком нейтронів продуктів зносу в пробах.

Перевага першого методу полягає в тому, що він дозволяє визначати не сумарний знос усіх одночасно третюх деталей, а тільки тих, котрі заздалегідь намічені для дослідження і були піддані відповідній обробці радіоактивними елементами. Обидва методи більш чутливі в порівнянні з іншими методами. Можливо безупинне спостереження за зміною інтенсивності випромінювання масла, що містить радіоактивні продукти зносу, а, отже, безупинний запис ходу зношування. До переваг цих методів варто віднести також і ту обставину, що вони дозволяють вести спостереження за зносом без розбирання машини. Метод радіоактивних індикаторів не вимагає значного часу для виконання лабораторних аналізів.

Разом з тим визначення швидкості зношування радіометричними методами вимагає спеціальної складної підготовки досліджуваних деталей, спеціальної апаратури для вимірювання інтенсивності випромінювання, створення особливих умов і застосування необхідних запобіжних заходів для охорони здоров'я персоналу, що бере участь у проведенні досліджень за допомогою цього способу. У силу зазначених причин найбільше застосування він отримав лише при лабораторних дослідженнях зносу.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити існуючі методи контролю зносу і їх характеристики.
2. За конкретних умов проведення випробовувань підібрати й обґрунтувати метод контролю зносу. Описати його переваги й недоліки.

Контрольні питання

1. Основні вимоги до обраного методу контролю зносу.
2. Дайте коротку характеристику методу контролю зносу (за вказівкою викладача).
3. Назвіть методи контролю зносу, прийнятні у випадку проведення випробувань без розбирання виробів.
4. Назвіть методи контролю зносу, прийнятні у випадку проведення випробувань на знос із розбиранням виробу.
5. Як і чому впливає зборка-розбирання вузла тертя на точність контролю зносу?

Рекомендована література

1. *Марков Н.Н., Кайнер Г.Б., Сецердотов П.А.* Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. – М.: Машиностроение, 1967. – 392 с.
2. *Соловьев С.Н.* Основы научных исследований. – Николаев: НКИ, 1974.