

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

С. Ж. БОДУ, О. В. ТРОФИМОВА

**ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
з дисципліни
"Основи триботехнології"**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв
Видавець Торубара В.В.
2019

УДК621.891(076)
Б75

Автори: С. Ж. Боду, старший викладач;

О. В. Трофимова, інженер

Рецензент О. П. Шумілов, канд. техн. наук, доцент

Рекомендовано Методичною радою НУК

Боду С. Ж.

Б75 Лабораторний практикум з дисципліни "Основи триботехнології" / С. Ж. Боду, О. В. Трофимова.
– Миколаїв : видавець Торубара В.В., 2019.

Наведено основні положення, рекомендації та методику виконання лабораторних робіт і складання звітів у процесі вивчення курсу «Основи триботехнології».

Призначено для студентів денної та заочної форм навчання з галузі знань "13. Механічна інженерія", спеціальності "131. Прикладна механіка". Можуть бути використані студентами інших спеціальностей, викладачами вищих навчальних закладів третього-четвертого рівнів акредитації.

УДК 621.891(076)

© Боду С. Ж., Трофимова О. В., 2019

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2019

Лабораторна робота № 1

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

Мета і задачі роботи – вивчити існуючі методи контролю шорсткості поверхонь вузлів тертя; ознайомитись з технічними можливостями обладнання для контролю шорсткості поверхонь; отримати навички обґрунтованого вибору обладнання й способів визначення шорсткості поверхонь; здобути навички практичного використання окремих видів приладів і способів визначення шорсткості поверхонь.

Методичні вказівки до роботи

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

Шорсткість поверхні – це сукупність мікронерівностей поверхні з відносно малими кроками на базовій довжині (рис. 1.1). ДСТУ ГОСТ 25142:2009 встановлює шість параметрів шорсткості поверхні: Ra , Rz , R_{max} , Sm , S , t_p .

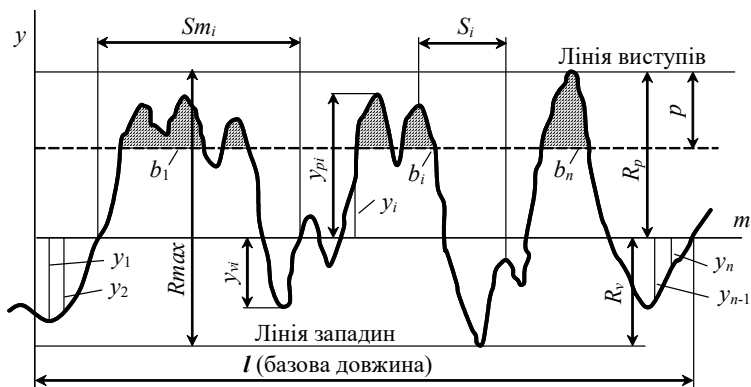


Рис. 1.1. Профілограма й основні параметри шорсткості поверхні

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 висотними характеристиками нерівностей

Середнє арифметичне відхилення профілю Ra – середнє арифметичне з абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx; \quad Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|,$$

де l – базова довжина; n – число обраних точок профілю на базовій довжині; y_i – відхилення профілю, відстань між будь-якою точкою профілю і середньою лінією.

Висота нерівностей профілю по десятих точках R_z – сума середніх абсолютних значень величин п'яти найбільших виступів профілю й п'яти найбільших западин профілю в межах базової довжини:

$$R_z = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right],$$

де y_{pi} – висота i -го найбільшого виступу профілю; y_{vi} – глибина i -ї найбільшої западини профілю.

Найбільша висота нерівностей профілю $R_{\max}$ – відстань між лінією виступів профілю й лінією западин профілю в межах базової довжини l .

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

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

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i},$$

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

Числові значення параметрів шорсткості Ra , Rz , $R_{\max}$, S_m і S , відповідні існуючим класам шорсткості, зазначені в ДСТУ ГОСТ 25142:2009.

Рекомендується використовувати переважні значення параметрів Ra , тому що еталони порівняння шорсткості поверхні за ДСТУ ГОСТ 25142:2009 виготовляють саме з цими значеннями Ra .

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 лінією, 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 перерізу профілю p , тобто на заданій відстані між лінією виступів профілю й лінією, що перетинає профіль еквідистантно лінії виступів профілю. *Лінія виступів профілю* – лінія, що еквідистантна середній лінії, що проходить через вищу точку профілю в межах базової довжини. Значення рівня перерізу

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 % від базової довжини l .

Перевірка шорсткості поверхні проводиться якісно або кількісно.

Якісний контроль шорсткості поверхні відбувається візуально чи на дотик шляхом порівняння поверхні, що перевіряється, з еталонною чи зі зразками шорсткості, виготовленими за ДСТУ ГОСТ 25142:2009. На кожному зразку з набору зазначені величини параметрів Ra (мкм) і вид обробки зразка. Візуально можна задовільно оцінити шорсткості поверхні, починаючи з $Ra = 0,6 \dots 0,8$ мкм і більш грубі.

Кількісний метод оцінки шорсткості поверхні є найбільш інформативним для оцінки стану поверхні та дозволяє використовувати отримані ним фактичні значення параметрів шорсткості 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 безконтактні й контактні.

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

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

Освітлена вузька щілина проектується мікроскопом на східчасту поверхню P_1P_2 . Напрямок падіння світла показано стрілками. При такому падінні світла зображення світної щілини на східчастій поверхні займе положення S_2 на нижній

частині східця P_1 і положення S_1 – на верхній частині східця P_2 . У поле зору мікроскопа спостереження, розташованого під кутом 90° до осі проекуючого мікроскопа, видно не висоту виступу H , вимірювану по нормалі до поверхонь P_1 і P_2 , а її проекцію b .

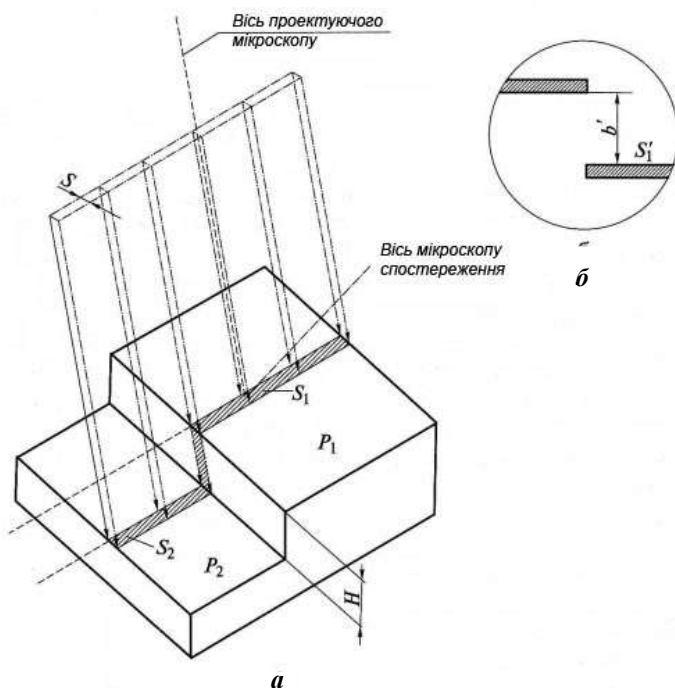


Рис. 1.2. Схема приладу світлового перерізу

Прилад (рис. 1.3) складається з двох частин: мікроскопа $M_{\text{пр}}$ для освітлення досліджуваної поверхні та мікроскопа $M_{\text{в}}$ для спостереження і виміру профілю поверхні. Осі обох мікроскопів нахилені під кутом 45° до досліджуваної поверхні зі збігом точок перетину осей із предметними точками об'єктів.

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

Якщо на досліджуваній поверхні 6 відсутні мікронерівності, то об'єктив 7 мікроскопа M_B у площині сітки окуляра 8 дає зображення S'_1 тієї ж вузької світної лінії.

За 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 знаходитися на відстані b' від осі мікроскопа M_B , рівній $b' = bx$, де x – збільшення об'єктива 7.

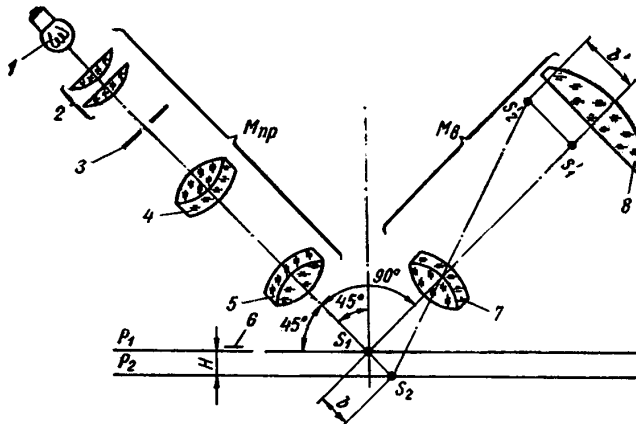


Рис. 1.3. Оптична схема подвійного мікроскопа МІС-11

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

Для виміру висоти нерівностей у мікроскопі M_B установлений окулярний мікрометр.

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

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

На рис. 1.4 зображена оптична схема інтерференційного мікроскопа МП-4. Від джерела білого світла 5 світловий пучок, пройшовши конденсор 4, потрапляє на дзеркало 3, від якого через діафрагму 6 і об'єтив 7 спрямовується на поділяючу призму 11, склеєну з двох призм. Діагональна площина однієї з цих призм посріблена, що робить призму напівпрозорою. Це необхідно для поділу пучка світла на два. Один пучок проходить через призму без переломлення, а потім, пройшовши через об'єтив 12, потрапляє на дзеркало 13, що служить зразковою поверхнею. Відбившись від дзеркала 13, пучок світла повертається на призму 11, відбивається її діагональною площиною і спрямовується через об'єтив 10 на дзеркало 15.

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

При вимірі шорсткості поверхні з регулярно розташованими нерівностями рекомендується працювати з монохроматичним світлом, при якому інтерференційна картина розташовується по всьому полю зору. Для одержання монохроматичного світла користуються ртутною лампою 1

і світлофільтром 2. У цьому випадку дзеркало 3 прибирається зі шляху проходження монохроматичного світла.

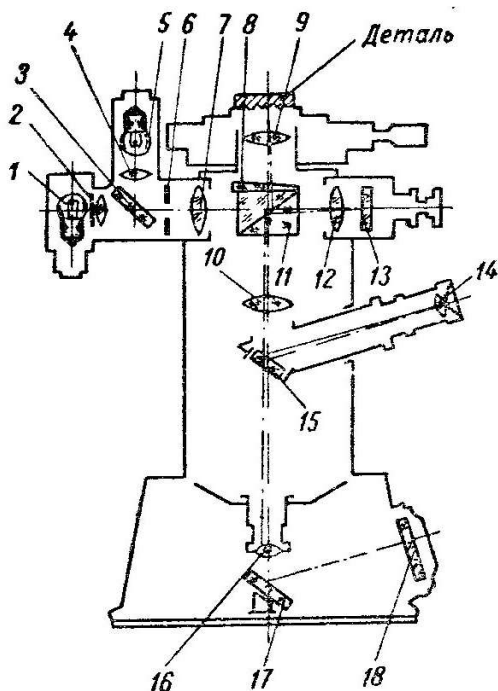


Рис. 1.4. Оптична схема інтерференційного мікроскопа МП-4

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 боках від неї – дві темні та кілька кольорових смуг.

Найбільша кількість видимих у полі зору смуг полегшує при хаотичному розташуванні нерівностей оцінку ступеня їхнього вигину і, отже, підвищує надійність результатів

виміру. При вимірі в білому світлі звичайно орієнтуються на чорні смуги.

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

На приладі можна робити вимір інтерференційних смуг для подальшого визначення висот нерівностей контрольованої поверхні. У цьому випадку звичайний окуляр 14 замінюється окуляром-мікрометром.

Інтерферограма контрольованої поверхні зазначена на рис. 1.5,а, а схема виміру 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 являла б собою ряд рівнобіжних прямих смуг. Викривлення смуг викликане мікронерівностями контрольованої поверхні.

Висоту мікронерівностей визначають за формулою

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

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 виміру на мікроскопі при відліку за допомогою окулярного мікрометра не перевищують 5 %.

Контактними методами контроль шорсткості здійснюється за допомогою щупових приладів (профілографів, профіло-

метрів і профілографів-профілометрів). Профілографи також можуть використовуватися для визначення величини лінійного зносу поверхонь у лабораторних випробуваннях на зносостійкість.

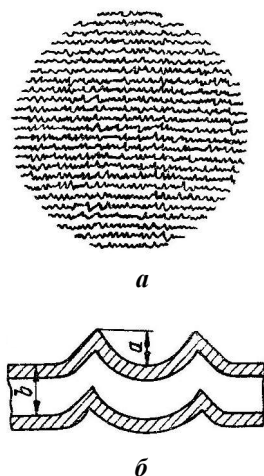


Рис. 1.5. Інтерферограма (а)
і схема вимірювання мікронерівностей (б)

У щупових приладах контактної дії для виміру висоти нерівностей використовують вертикальні коливання голки, переміщуваної по контрольованій поверхні. Коливання перетворюються в електричну напругу за допомогою індуктивних, механотронних, п'єзоелектричних та інших перетворювачів. Так, профілограф-профілометр мод. 252, в якому використаний індуктивний перетворювач, дозволяє записувати профіль нерівностей у збільшеному масштабі у вигляді профілограми чи вимірювати параметри шорсткості в цифровому вигляді по шкалах приладів (рис. 1.6). Прилад оснащений перетворювачем, електронним вимірювальним блоком 7 з лічильно-розв'язуючим блоком 8 і записуючим

пристроєм 9. Індуктивний перетворювач виконують у вигляді здвоєного сердечника 5 із двома котушками 6. Котушки і дві половини первинної обмотки диференціального вхідного трансформатора підключені за мостовою схемою, подають яку генератори 4 і 10 із частотою 10 кГц. При переміщенні по контрольованій поверхні алмазна голка 3 перетворювача разом із якорем 1, підвішеним 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) – їхній крок. Числові значення параметрів визначають за допомогою цифрового відлікового пристрою. При роботі приладу зміни напруги подаються на записуючий пристрій.

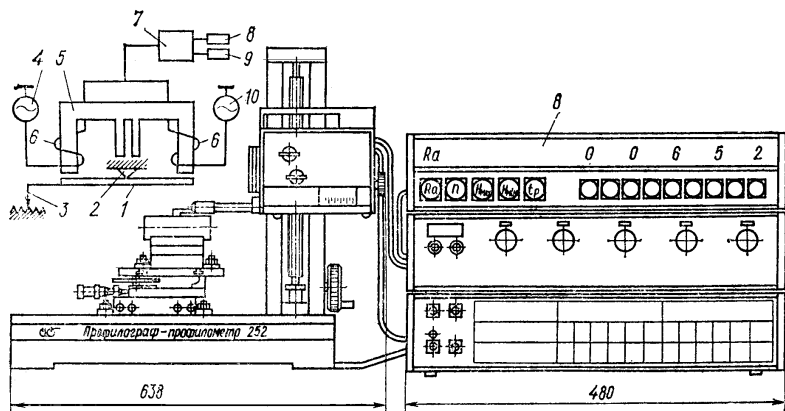


Рис. 1.6. Профілограф-профілометр, загальний вигляд і принципова схема

У цехових умовах виникає потреба в оперативному визначенні параметрів шорсткості поверхні, а не в записі профіло-

грам. З цією метою випускають цехові профілометри мод. 253 і 283, принцип дії яких заснований на перетворенні коливань голки за допомогою 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 точне регулювання положення голки щодо передньої твердосплавної опори. Голка переміщується з постійною швидкістю. З механотрона сигнал подається на підсилювач, лінійний випрямник, інтегратор і стрілковий прилад, шкала якого проградуєрована в значеннях параметра Ra .

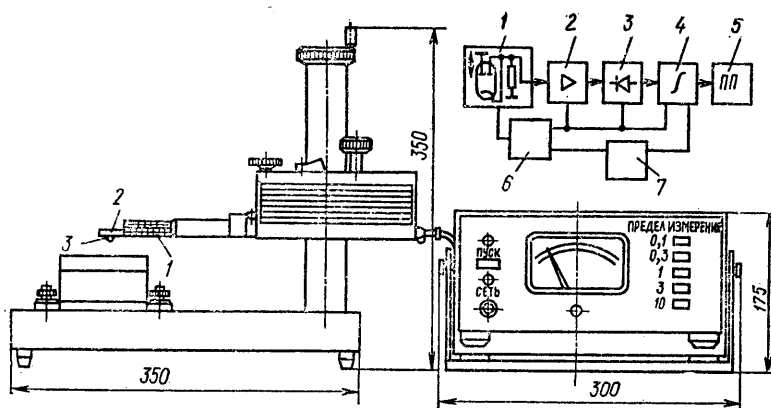


Рис. 1.7. Механотронний профілометр, загальний вигляд і принципова схема:

1 – перетворювач; 2 – посилювач; 3 – випрямник; 4 – інтегратор;
5 – показувальний прилад; 6 – джерело живлення; 7 – реле часу

Профілометр мод. 283 має діапазон вимірів 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, по якій оцінюють параметри шорсткості. Для зняття реплік застосовують гіпсові та гутаперчеві суміші, а також самотвердкі пластмаси.

При виборі методу вимірювання шорсткості та типу приладу необхідно враховувати можливість контролю запропонованого кресленням параметра, межі вимірювання, припустимі відхилення контролюваного параметра, похибки вимірювань й приладу, продуктивність вимірів, форму, розміри, матеріал деталі й інші фактори.

Характеристики основних приладів для кількісної оцінки шорсткості наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Характеристики приладів для контролю шорсткості

Тип приладу		Контрольовані параметри	Межі вимірювання, мкм	Базові довжини, мм
Профілограф-профілометр мод. 201	Профілометр	Ra	8,0–0,02	0,08; 0,25; 0,8; 2,5
	Профілограф	Ra , Rz , R_{max} , S , Sm , t_p	20–0,008 100–0,025 12,5–0,003 90–10 %	Весь ряд
Профілометр мод. 253		Ra	2,5–0,04	0,25; 0,8; 2,5
Профілометр мод. 283		Ra	10–0,02	0,25; 0,8
Профілограф-профілометр мод. 252 (з цифровим відліком)	Профілометр	Ra , R_{max} , Sm , t_p	100–0,02 200–0,1 12,5–0,003 100–0 %	2,5; 0,8; 0,25; 0,08
	Профілограф	Rz , R_{max} , Ra , S , Sm , t_p	250–0,02 60–0,05 12,5–0,003 100–0 %	Весь ряд

Продовж. табл. 1.1

Тип приладу		Контрольовані параметри	Межі вимірювання, мкм	Базові довжини, мм
Прилади світлового перерізу	ПСС-2 (МІС-11)	Rz, R_{max}, S, Sm	40–0,08 20,5–0,002	2,5; 0,8; 0,25; 0,08; 0,03; 0,01
ОПІМ-1		Rz, R_{max}, S, Sm	40–0,04 20,5–0,002	2,5; 0,8; 0,25; 0,08; 0,03; 0,01
ПТС-1		Rz, R_{max}, S, Sm	320–40 6,3–0,02	8; 2,5; 0,8; 0,25
ТПС-4М		Rz, R_{max}, S, Sm	1600–63 6,3–0,1	8; 2,5
Мікроінтерферометр МП-4		Rz, R_{max}, S, Sm	0,8–0,1 0,25–0,02	0,25; 0,08; 0,03; 0,01

Матеріальна база для виконання роботи

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

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з метою та задачами роботи.
2. Ознайомитися з інструкцією роботи на профілографі-профілометрі.
3. Ознайомитися з методикою використання зразків шорсткості.
4. Визначити за допомогою зразків шорсткість поверхонь виданих деталей.
5. Виміряти за допомогою профілографа-профілометра шорсткість поверхонь виданих деталей.
6. Зробити запис однієї профілограми.

7. Зробити висновки про відповідність шорсткостей визначених по зразкам шорсткості й вимірюваних профілографом-профілометром.

8. Ознайомитися з виданим кресленням деталі та підібрати відповідний метод і прилади для контролю шорсткості поверхонь.

Контрольні питання

1. Дайте визначення параметрам шорсткості (Ra , Rz , R_{max} , Sm , S , t_p).

2. Назвіть методи контролю шорсткості й сфери їх застосування.

3. Назвіть засоби визначення шорсткості поверхні.

4. Чим відрізняється шорсткість поверхні від хвилястості й похибки форми?

5. Принцип роботи приладів світлового перерізу.

6. Принцип роботи інтерференційних мікроскопів.

7. Принцип роботи профілографа-профілометра.

8. Як визначається шорсткість великогабаритних деталей і у важкодоступних місцях?

Рекомендована література

1. ДСТУ ГОСТ 25142:2009. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення [Текст] / Державний Комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики.

2. Якушев, А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения [Текст] : уч. пособие / А. И. Якушев, Л. Н. Воронцов, Н. М. Федотов. – М. : Машиностроение, 1987. – 352 с.

Лабораторна робота № 1
**Методи оцінки та вимірювання шорсткості поверхонь
вузлів тертя і фрикційних з'єднань**

Мета роботи: _____

Використовуваний вимірювальний та контрольний інструмент, обладнання (назва, номер) _____

Досліджувана поверхня	Результати вимірювання шорсткості	
	Якісна оцінка (порівняння з еталоном)	Кількісна оцінка (за допомогою профілографа- профілометра)
Деталь № 1		
Деталь № 2		
Деталь № 3		

Висновки: _____

Лабораторна робота № 2

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

Мета і задачі роботи – ознайомитись з існуючими методами визначення залишкових технологічних напружень; вивчити основні експериментальні методи визначення залишкових напружень; отримати практичні навички визначення величини залишкових напружень.

Методичні вказівки до роботи

Технологічні залишкові напруження класифікуються по ознаках протяжності силового поля і по фізичній сутності.

Напруження першого роду – макронапруження, що охоплюють ділянки, порівнянні з розмірами деталі; ці напруження мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі; *напруження другого роду* – мікронапруження, що поширюються на окремі зерна металу чи групу зерен; *напруження третього роду* – субмікроскопічні, що відносяться до перекручувань атомних ґраток кристала; їх орієнтація пов'язана зі структурою атомних ґраток.

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

Технологічні фактори (методи і режими обробки, стан інструмента, змащувально-охолоджувальна рідина (ЗОР) та ін., а також умови виконання заготовельних операцій і термообробки) дуже впливають на величину й знак залишкових напружень. Точіння зазвичай викликає появу розтягувальних напружень, що можуть досягати величини до 700 Н/мм^2 ; глибина їх поширення знаходиться в межах $50 \dots 200 \text{ мкм}$, залежно від умов обробки. При фрезеруванні виникають як розтягувальні, так і стискувальні напруження, залежно від умов фрезерування. При шліфуванні, зазвичай, виникають розтягувальні напруження. Величина і знак макронапружень після механічного полірування деталей залежать від попередньої обробки, але в більшості випадків полірування сприяє появі незначних стискувальних напружень (до 30 Н/мм^2).

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

Залишкові напруження впливають на опір пружній і пластичній деформації, втому матеріалів, зносостійкість і опір корозії.

Теоретичне прогнозування залишкових напружень складне через велику кількість впливальних факторів, тому їхнє експериментальне визначення відіграє важливу роль.

Основними методами визначення залишкових напружень є механічні та рентгенівські. Дуже перспективні для промислового застосування електрофізичні методи, при яких залишкові напруження визначаються за зміною електромагнітних властивостей поверхневого шару.

Механічні методи визначення залишкових напружень одержали найбільше поширення завдяки своїй простоті та внаслідок того, що в них використовуються такі ж уявлення про напруження, як і при розрахунках деталей на міцність, твердість і стійкість.

Механічні методи засновані на припущенні, що розрізання чи видалення частини деталі із залишковими напруженнями еквівалентні додаванню до основної деталі на знов утворених поверхнях напружень, зворотних залишковим. Ці зворотні напруження викликають деформацію деталі чи зусилля в пристроях, що перешкоджають деформації. Вимірюючи виникаючі деформації (деформаційними методами) чи сили реакції (силовими методами), можна обчислити залишкові напруження.

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

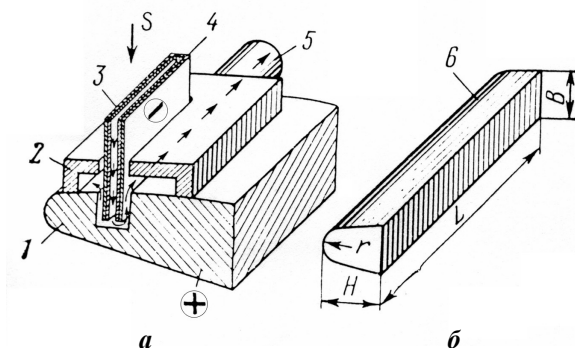


Рис. 2.1. Схема (а) електрохімічного вирізання зразка (б) для визначення залишкових напружень у вихідному нарізку лопатки:

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; L, H, b, r – характерні розміри відрізаного зразка

Для вирізання зразків з великих деталей чи деталей із пластмас застосовують механічне розрізання на чистових режимах обробки при інтенсивному охолодженні. Після механічного вирізання металевих зразків рекомендується стравлювати із утворених поверхонь шар товщиною 0,2 мм для видалення напружень, що виникають при вирізанні.

Для визначення глибини залягання залишкових напружень та їхнього розподілу по глибині застосовують методики поступового стравлювання шару із залишковими напруженнями і послідовним вимірюванням зміни деформації зразка.

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

Для цього на досліджувану поверхню наклеюють три тензодатчики відповідно до схеми на рис. 2.2.

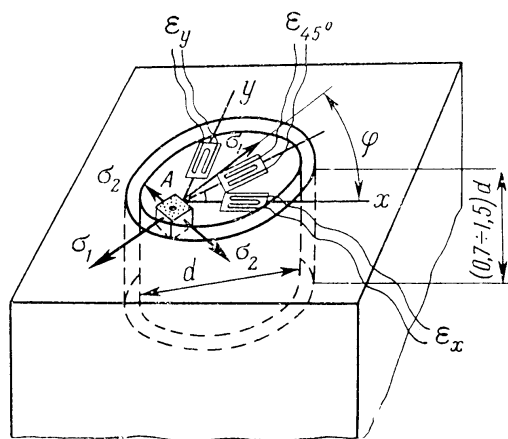


Рис. 2.2. Визначення головних залишкових напружень σ_1 та σ_2 на поверхні великогабаритних деталей методом вирізаних стовпчиків (d – діаметр стовпчика)

Після цього ділянка з тензодатчиками вирізується повністю або біля неї утворюється порожнина у формі циліндра. При вирізанні не повинні виникати додаткові напруження чи зона їхнього впливу не повинна сягати тензодатчиків. Вимірюють деформації тензодатчиків і розраховують залишкові напруження за залежностями:

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

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

Наявність залишкових напружень у полікристалічних тілах, якими є метали, приводить до різних інтерференційних ефектів рентгенівських променів, відбитих від поверхні зразків, у залежності від розмірів зони, у якій ці напруження врівноважуються. Проводячи відповідні виміри можна обчислити величину залишкових напружень.

Через особливості методу рентгенівського виміру залишкових напружень і складності його методик можуть бути розбіжності між величинами напружень знайдених рентгенівським і механічним методом.

Оцінка залишкових напружень по зміні електромагнітних властивостей поверхневого шару завдяки своїй простоті, високій продуктивності, можливості визначати напруження в тонких шарах і відсутності необхідності руйнувати робочі поверхні може бути застосовна у виробничому контролі. Але через низьку точність методу, оскільки електромагнітні властивості залежать не тільки від залишкових напружень, він не може бути застосований у дослідницьких роботах.

Матеріальна база для виконання роботи

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

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з метою та задачами роботи.
2. Зробити розмітку торців викуванця згідно з рис. 2.3.

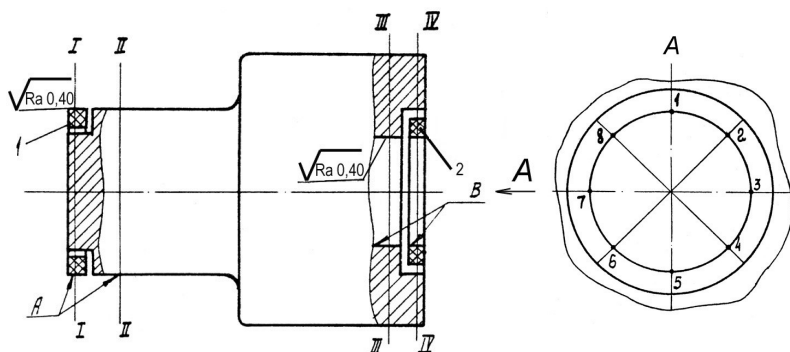


Рис. 2.3. Схема вимірювань

3. Зовнішню та внутрішню поверхні викуванця під вирізання кілець обробити до шорсткості $\sqrt{Ra0,63} \dots \sqrt{Ra0,32}$.

4. Вирізати кільця розмірами 15×15 мм 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.

5. Заміряти діаметри вирізаних кілець до і після вирізання (по відповідних перерізах).

6. Обчислити деформації в кожному перерізі та підрахувати середню деформацію кожного кільця.

7. Обчислити залишкові напруження на зовнішній і внутрішній поверхні викуванця по залежності

$$\sigma_{\tau} = \frac{E\delta}{D_{\text{ср}}},$$

де σ_{τ} – тангенціальні залишкові напруження; E – модуль Юнга ($E = 2,06 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}^2$); δ – середнє значення деформації кільця, мм; $D_{\text{ср}}$ – середнє значення вимірів діаметрів до відрізків кілець, яке визначається розрахунком середнього арифметичного з чотирьох замірів діаметра в перерізах, розташованих під кутом 45° .

Залишкові напруження для заготовок діаметром до 550 мм повинні бути не більше 30 Н/мм^2 , заготовок діаметром 550–1000 мм не більше 40 Н/мм^2 , заготовок діаметром більше 1000 мм – не більше 50 Н/мм^2 .

8. Зробити висновки про відповідність залишкових напруження припустимим.

Контрольні питання

1. Назвіть причини виникнення залишкових напружень.
2. Назвіть види залишкових напружень.
3. Дайте характеристику методам визначення залишкових напружень.
4. В чому полягає принцип механічного методу визначення залишкових напружень?
5. Назвіть способи зменшення залишкових напружень.
6. Наведіть приклади корисного використання залишкових напружень.

Рекомендована література

1. **Соловьев, С. Н.** Основы технологии судового машиностроения [Текст] / С. Н. Соловьев. – Л. : Судостроение, 1992. – 350 с.

2. Технологические остаточные напряжения [Текст] / А. В. Подзей, А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев, Г. З. Серебренников ; под ред. А. В. Подзея. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.

Лабораторна робота № 2
**Виявлення залишкових напружень поверхневого шару
вузлів тертя та фрикційних з'єднань**

Мета роботи: _____

Використовуваний вимірювальний та контрольний інструмент, обладнання (назва, номер) _____

Досліджувана поверхня	Результати вимірювання			
	кільце 1		кільце 2	
	до вирізання II–II	після вирізання I–I	до вирізання III–III	після вирізання IV–IV
Переріз 1–5				
Переріз 2–6				
Переріз 3–7				
Переріз 4–8				
Середня деформація				

Результат розрахунку залишкових напружень на зовнішній і внутрішній поверхні викуванця _____

Висновки: _____

Лабораторна робота № 3

МЕТОДИ ОЦІНКИ ТА ВИМІРЮВАННЯ ЗНОСУ ПОВЕРХОНЬ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ

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

Методичні вказівки до роботи

Отримання достовірної інформації про технічний стан виробу (чи його окремого вузла) й динаміку його зміни неможливо без наявності надійних методів контролю зносу робочих поверхонь. Через велику розмаїтість вихідних вимог, конструкцій виробів і умов їхніх робіт не можливо обійтися одним чи двома методами 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 розбору досліджуваних вузлів.

*ГОСТ 30480-97; ГОСТ 30858-2003; ГОСТ 23.205-2005.

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

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

5. Методи мають бути простими, цілком доступними й застосовними як для дослідження зносу в процесі стендових випробовувань серійних і знову створюваних машин, так і для контролю зносу в процесі експлуатації.

6. Витрати на дослідження й контроль мають бути мінімальними.

Жоден з існуючих методів не задовольняє всі перераховані вимоги.

В даний час відомі наступні основні методи визначення зносу деталей машин і механізмів:

- оцінка зносу за зміною технічних параметрів машини;
- метод мікровимірювання;
- ваговий метод;
- метод хімічного аналізу;
- метод спектрального аналізу;
- метод профілографування;
- метод штучних баз;
- радіоізотопні методи.

Кожен із зазначених методів не є універсальним, має свої позитивні та 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 і за підвищеною витратою мастила. Відомо, що при підвищеному зносі кілець втрачається потужність машини.

Однак, коли працює велика кількість циліндрів двигуна, локалізувати причину зносу стає досить важко. У випадку роботи насоса знос окремих деталей визначається по втраті його продуктивності, по витоку рідини між циліндром і плунжером тощо.

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

До зазначеного методу найбільш близькі віброакустичні методи, тому що зміна віброакустичних характеристик є в 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 й інших факторів. Це дає можливість методом частотного аналізу виділити із загального спектра шумів певні гармоніки і, аналізуючи їхні зміни в часі, оцінювати стан окремих елементів машини.

Цікаву інформацію можна отримати також у результаті амплітудного аналізу спектра коливань: існує цілком визначене співвідношення між амплітудою коливань сили тертя й видом зношування. Аналізуючи спектр коливань, можна встановити переважний вид зношування в даний момент,

а також з'ясувати моменти переходу від одного виду зношування до іншого. Це дозволяє розглядати віброакустичні методи дослідження як самостійну групу методів, що дає можливість якісно оцінювати процеси зношування 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 вимірі за допомогою мікрометра чи іншого приладу з індикатором одних й тих самих розмірів деталі до і після випробувань на знос. По різниці лінійних розмірів судять про величину лінійного зносу, причому знос може бути виявлений у різних місцях поверхні тертя. Слід зазначити, що при цьому методі визначення зносу вимірюванням у всіх випадках пов'язано зі значними похибками, причини яких полягають у наступному:

1. При визначенні зносу по діаметру отвору циліндра (втулки) чи зовнішньої поверхні 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 наближений розмір величини місцевого зносу.

3. При вимірі контактними приладами неминучі похибки, 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 неоднаковою температурою інструмента і вимірюваного предмета. Так, при діаметрі циліндра 100 мм

і різниці в 1 °С між циліндром та інструментом похибка буде близько 1 мкм.

Для проведення вимірів потрібно повне чи часткове розбирання з'єднання, що збільшує трудомісткість операції та призводить до додаткових похибок за рахунок вторинного приробляння після зборки вузла.

Результати виміру зносу, одержані при мікровимірюванні, включають в себе 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 результуюча похибка при визначенні зносу складає величину близько ± 5 мкм.

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

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

Ваговий метод

Одним з часто застосовуваних методів визначення зносу деталей невеликої маси є їхнє зважування до і після випробувань.

Визначення лінійного зносу по нелінійній втраті маси відбувається обчисленням, заснованим 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 по всій поверхні тертя.

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

Вантажо- підйомність, 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, як правило, для дослідження невеликих деталей: поршневих кілець, вкладок, втулок, зразків для випробувань на машинах тертя і т. п.

Застосування цього методу вимагає розбору з'єднання і ретельного очищення деталі від різного роду налипань і відкладень масла, продуктів зносу, нагару, смоли, лаку і т. п. 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 із пористих матеріалів (металокерамічні, бронзографітові, залізографітові матеріали). 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

Розбір машини, необхідний для визначення зносу ваговим методом чи шляхом мікровимірювання у більшості випадків небажаний, тому що після кожного розбору і наступного складання взаємне розташування деталей трохи змінюється, що спричиняє додаткове приробляння. Це особливо стосується двигунів внутрішнього згоряння. У таких випадках застосовується спосіб оцінки інтегральної величини зносу по збагаченню мастила продуктами зносу.

Від мастила відбирається проба, спалюється, і в золі визначається за допомогою хімічного аналізу чи полярографічним методом вміст металу. Оцінка зносу деталей циліндро-поршневої групи двигунів автотракторного типу на основі визначення зміни вмісту заліза в мастилi набула застосування під час дослідження впливу мастил на знос двигунів, зокрема, на їхнє приробляння.

Цей метод визначення зносу є також інтегральним, тому що продукти зносу одночасно відокремлюються від декількох тертьових 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 знос, не його абсолютна величина, тому він в основному застосовується при порівняльній оцінці впливу на зношування деталей таких факторів, як сорт мастила, температура охолодження рідини і т. д.

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 зношуванню деталі, тому результат виходить заниженим.

Спектральний аналіз

Метод спектрального аналізу вмісту механічних домішок у мастилі успішно застосовується для виміру зносу двигунів внутрішнього згоряння, різних коробок передач. Чутливість спектрографічного методу визначення вмісту металевих домішок в маслі досягає величини 10^{-6} , а для деяких елементів 10^{-8} г на 1 г мастила. Така чутливість дозволяє, наприклад, визначити через декілька годин роботи двигуна вміст в маслі легуючих елементів матеріалу колінчатого вала, циліндричних втулок, вкладок, поршневих кілець. Недоліками методу є висока вартість устаткування для спектрального аналізу, необхідність залучення висококваліфікованого персо-

налу, тривалість проведення аналізу й обробки результатів, а також неможливість конкретно оцінити місце найбільшого зносу.

Метод профілографування

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 порівняну складність самої операції профілографування. Профілограми, зняті до і після випробувань, неминуче відносяться до різних, хоча і близьких перерізів 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 інтерференційний мікроскоп, вони 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 зазвичай 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, потрібно розбирати прироблене з'єднання.

Метод штучних баз

В основі методу штучних баз лежить визначення кількісної величини лінійного зносу за зміною 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 перерізі геометрично правильну, заздалегідь відому форму. Тоді про величину зносу можна судити по ширині подряпини, видимої 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 вимір 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, висвердлюванням конічного поглиблення, вирізанням різцем гострокутної лунки, випилюванням чи вишліфовуванням диском. Розмір діагоналі лунки вибирається в залежності від матеріалу, призначення деталі та передбачуваної величини зносу (звичайно не більш 1 мм).

Найчастіше як індентор 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 алмаза, але і з твердих сплавів, а для відбитків на металах невисокої твердості – із загартованої інструментальної сталі.

У 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 по формулі $\Delta b = b_1 - b_2 = (c_1 - c_2) / Z$, де b – глибина відбитка; c – діагональ проекції відбитка на випробуваний поверхні (індекси 1 і 2 відповідають вимірам діагоналі до і після випробування); Z – коефіцієнт пропорційності, постійний по всій глибині відбитка, якщо відбиток виконаний пірамідою правильної геометричної форми. Наприклад, для кута $\alpha = 136^\circ$ і $Z = 7$, і 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 відмінною від форми кульки, а необхідні виправлення робити складно, тому що вони залежать не тільки від властивостей випробуваного матеріалу, але й від величини відбитка.

Метод відбитків широко використовувався при дослідженні зношування спрямовуючих металорізальних верстатів. Найчастіше як індентор використовується алмазна піраміда з квадратною основою й кутом при вершині між протилежними гранями 136° . Навантаження на наконечник коливається від 35 до 75 кг, розміри відбитків – від 350 до 800 мкм. Для виміру довжини діагоналі відбитка застосовувався спеціальний прилад з відліковим мікроскопом.

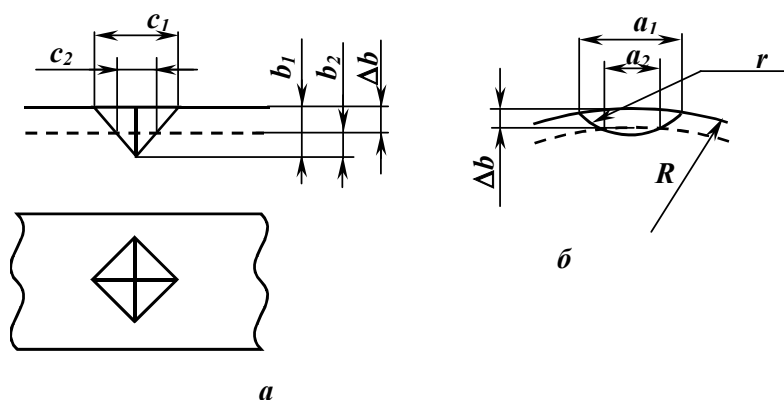


Рис. 3.1. Вимірювання зносу методом штучних баз:
 a – для лунки, що отримана вдавлюванням квадратної піраміди;
 $б$ – лунка отримана методом вирізування (опукла поверхня)

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

Основними негативними явищами при будь-якому вдавлюванні варто вважати пружне відновлення досліджуваного металу і видавлювання частини металу, що утворює узвишся на поверхні навколо відбитка. Ці явища спотворюють вихідну шорсткість поверхні та 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 прироблянням.

Не можна не враховувати при визначенні величини зносу також і похибку, викликану відхиленням осі відбитків від нормалі до поверхні. У цьому випадку відбиток отримує неправильну форму і, щоб уникнути похибки, необхідно вводити виправлення, отримані експериментальним шляхом.

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

Інший результат, якщо лунки на поверхні отримувати не видавлюванням, а вирізанням. У цьому випадку на випробуваній поверхні вирізується лунка за допомогою обертового різця. Знаючи геометричні розміри різця й глибину лунки, можна обчислити її параметри.

Іноді застосовують метод висвердлених заглиблень, що наносяться на поверхню за допомогою свердлів зі спеціальним заточенням під визначеним кутом. Застосування цього методу вимагає розташування конічного заглиблення по строгій нормалі до досліджуваної поверхні. Якщо вісь кінця отвору буде відхилена від нормалі й 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 виникати внаслідок пружних деформацій механізму для нарізування лунок, переміщення в межах зазору деяких деталей механізму, пружних деформацій металу, на поверхні якого наноситься лунка, і т. п. Щоб у певній мірі 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 заглиблення, 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.

Порівняльні дані показують, що теоретично розрахована глибина лунки, виконана в сталі й чавуні, відрізняється від дійсної приблизно на 5 %. Ці відхилення призводять до помилки в обчисленні глибини лунки, а, отже, і величини зносу. При обчисленні зносу лунки, розташованої уздовж окружності, необхідно враховувати кривизну поверхні.

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

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

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

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

Радіоізотопні методи

Більш сучасними 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 мастилі буде осідати пропорційна їм кількість індикатора. Якщо періодично брати пробу масла, то кожного разу можна по концентрації індикатора судити про кількість металу, що потрапив у масло. Існує кілька способів включення радіоактивних атомів у метал випромінюваної деталі. Наприклад, можна у сплав, з якого виробляється 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, і щоб уся маса введенного ізотопу рівномірно розподілялася в металі деталі.

Можна застосовувати вставки у вигляді дроту зі сплаву, що містить радіоактивний ізотоп. Ці вставки впресовуються перпендикулярно до поверхні тертя. По мірі зношування деталі буде зношуватися і матеріал вставки і по інтенсивності

випромінювання продуктів зносу, які осідають 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, що 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 по радіоактивності, створюваній 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. Можливе 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 те, 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. Зважаючи на зазначені причини, найбільше застосування він отримав лише під час лабораторних досліджень зносу.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити існуючі методи контролю зносу та їхні характеристики.

2. Для конкретних умов випробовувань, заданих викладачем, підібрати й обґрунтувати метод контролю зносу. Описати його переваги й недоліки для заданих конкретних умов.

№ з/п	Вимоги до методу	Умови випробувань	
		Так	Ні
1	Чи можливий розбір досліджуваного вузла тертя?		
2	Чи припустимі зупинки машини чи механізму?		
3	Наявність спеціального обладнання та фахівців: • спектрограф • хімічний аналізатор • мікрометричний інструмент • профілограф • ваги • віброакустичний аналізатор		
4	Чи є необхідність оперативно відстежувати зміну інтенсивності зношування у часі?		
5	Необхідно визначити знос: • масовий • лінійний • об'ємний		
6	Чи є необхідність в інформації, як знос розподіляється по поверхні тертя?		
7	Термін експлуатації, за який має бути виявлений знос досліджуваних деталей: • початковий • тривалий		
8	Дослідження мають проводитись: • в лабораторних умовах • в реальних умовах експлуатації		

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 з розбиранням виробу.
5. Як і чому впливає збирання-розбирання вузла тертя на точність контролю зносу?

Рекомендована література

1. **Марков, Н. Н.** Погрешность и выбор средств при линейных измерениях [Текст] / Н. Н. Марков, Г. Б. Кайнер, П. А. Сецердотов. – М. : Машиностроение, 1967. – 392 с.
2. **Соловйов, С. М.** Основи наукових досліджень [Текст] / С. М. Соловйов. – К. : Центр учбової літератури, 2007. – 176 с.

Лабораторна робота № 3
Методи оцінки та вимірювання зносу
поверхонь вузлів тертя

Мета роботи: _____

Обраний метод контролю зносу _____

№ з/п	Характеристика обраного методу контролю зносу (назва методу)	Короткий опис
1	Чи відбувається розбирання досліджуваного вузла тертя?	
2	Чи необхідні зупинки машини чи механізму?	
3	Чи необхідне спеціальне обладнання та фахівці? Які саме?	
4	Чи є можливість оперативно відстежувати зміну інтенсивності зношування у часі?	
5	Який знос визначається (масовий, лінійний, об'ємний)?	
6	Чи є інформація, як знос розподіляється по поверхні тертя?	
7	Термін експлуатації, необхідний для виявлення зносу (початковий, тривалий)	
8	Умови проведення дослідження (лабораторні, стендові, польові)	

Висновки: _____

Лабораторна робота № 4

ПРОГНОЗУВАННЯ ШОРСТКОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ ТА ФРИКЦІЙНИХ З'ЄДНАНЬ

Мета і задачі роботи – виявити наявність впливу пластичних деформацій поверхні при чистовій обробці різанням лезовим інструментом на шорсткість поверхні; ознайомитися з методами прогнозування висоти шорсткості обробленої поверхні; визначити експериментально загальну тенденцію впливу режимів різання при чистовій лезовій обробці на шорсткість обробленої поверхні.

Методичні вказівки до роботи

Якість поверхні, обробленої зі зняттям стружки, визначається шорсткістю поверхні та станом матеріалу поверхневого шару. Шорсткість обробленої поверхні характеризується висотою і формою мікронерівностей (ДСТУ ГОСТ 25142:2009). Стан матеріалу поверхневого шару – його зміцненням (наклепом), мікроструктурою, величиною, знаком залишкових напружень і глибиною їхнього залягання.

При вивченні шорсткості поверхні мікронерівності, з методичної точки зору, зручно поділяти на розрахункові та дійсні.

Під *розрахунковими нерівностями* розуміють такі, висота і форма яких можуть бути визначені геометрично при наступних допущеннях: 1) оброблюваний матеріал вважається абсолютно недеформованим; 2) технологічна система – абсолютно жорсткою; 3) леза інструмента являють собою геометричні лінії.

Дійсні нерівності, чи просто нерівності – це ті мікронерівності, що виникли на обробленій поверхні після проходу ріжучого інструмента. Їх висота аналітичному розрахунку не піддається. Її можна виміряти або оптичними приладами (ПТС-1 вимірює висоту нерівностей $Rz = 80 - 320$ мкм; ПСС-2, МІС-11 – висоту нерівностей $Rz = 0,8 - 80$ мкм; МП-4, МП-9, МП-10 – висоту нерівностей $Rz = 0,05 - 0,8$ мкм), або щуповими приладами (профілографами і профілографами-профілометрами), з яких найбільш розповсюджений профілограф-профілометр мод. 201 заводу "Калібр".

При точінні різцем без перехідного леза (рис. 4.1,*а*) висота розрахункових нерівностей $Rz_{\text{роз}}$ дорівнює висоті РК трикутника *mp*:

$$Rz_{\text{роз}} = mp \sin \varphi_1;$$

$$mp = \frac{mq}{\sin \angle mpq} = \frac{a}{\sin(\varphi + \varphi_1)} = \frac{S \sin \varphi}{\sin(\varphi + \varphi_1)}.$$

Таким чином,

$$Rz_{\text{роз}} = \frac{S \sin \varphi \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}.$$

Формула придатна для розрахунку при розточуванні, свердлінні, зенкеруванні, струганні та фрезеруванні торцевими фрезами.

Якщо різець має кругове перехідне лезо (див. рис. 4.1,б), то

$$Rz_{\text{роз}} = r - 0,5\sqrt{4r^2 - S^2}.$$

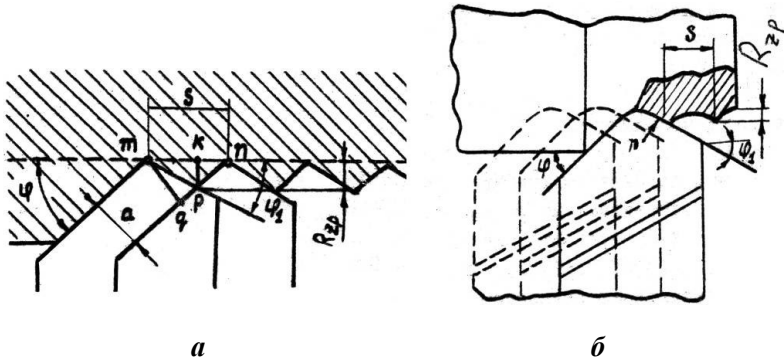


Рис. 4.1. Створення розрахункового мікропрофілю при точінні:
 а – різцем перехідного леза;
 б – різцем з округленим перехідним лезом

За рекомендацією професора В.Л. Чебишева розрахункова величина нерівностей (без врахування пластичних деформацій у зоні різання) може бути розрахована по залежності

$$Rz = \frac{S^2}{8r},$$

де Rz – висота нерівностей при точінні, мкм; S – подача, мм/об; r – радіус заокруглення вершини різця, мм.

Реальні поверхні за формою і висотою відрізняються від розрахункових. На рис. 4.2 зображена типова профілограма обробленої поверхні при точінні.

У порівнянні з розрахунковим, реальний мікропрофіль втрачає свою регулярність і $Rz > Rz_{\text{роз}}$. Збільшення висоти

нерівностей Rz у порівнянні з $Rz_{\text{роз}}$ викликано наступними причинами:

1. Пластичною текучістю матеріалу із зони первинної деформації у бік вершин мікронерівностей. Чим більше ступінь деформації шару, що зрізується, тим більше інтенсивність пластичної текучості у бік вже обробленого сліду на мікропрофілі й тим більше висота нерівностей.

2. Коливаннями технологічної системи.

3. Тертям задніх поверхонь інструмента об поверхню різання.

4. Нерівностями лез інструмента, що зростають по мірі його зношування.



Рис. 4.2. Мікропрофіль реальної поверхні

Виходячи з вище наведених формул, швидкість різання не повинна впливати на шорсткість обробленої поверхні. Однак це не відповідає фактичній ситуації. При обробці в'язких матеріалів (до яких відносяться конструкційні вуглецеві та леговані сталі), схильних до наростотворення на передній грані різця, шорсткість поверхні спочатку зростає при збільшенні швидкості різання до 20...30 м/хв, а потім спадає. Вплив наростотворення припиняється при швидкостях різання більше ніж 60...70 м/хв.

Тому на практиці чистові операції механічної обробки виконують при швидкостях різання до 1...2 м/хв або при швидкостях більше 60...70 м/хв. Проте вплив швидкості різання на фактичну шорсткість поверхні залишається відчутним.

Глибина різання t так само не входить у розрахункові формули, але і фактично її зміна мало впливає на шорсткість оброблених поверхонь. До того ж при чистових обробках вона змінюється дуже мало (0,5...1,0 мм).

Тому в залежностях, що враховують вплив режиму різання на шорсткість, повинні враховуватися наступні фактори: властивості матеріалу деталі; геометрія різця (ϕ , ϕ_1 , ρ); подача S ; швидкість різання.

Як показали систематичні дослідження, проведені Е.В. Рижовим, для чистових операцій механічної обробки конструкційних сталей залежність шорсткості від умов різання може бути з достатньою точністю описана залежністю

$$Ra = \frac{S^{k_1} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}{\rho^{k_2} v^{k_3}};$$

де S – подача, мм/об; γ – передній кут різця, град; ρ – радіус заокруглення вершини різця, мм; v – швидкість різання, м/хв; k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 – коефіцієнти, наведені в довіднику інженера-технолога.

Матеріальна база для виконання роботи

1. Вихідні заготовки з вуглецевої сталі у вигляді прутків.
2. Токарно-гвинторізний верстат.
3. Токарський прохідний різець із заздалегідь проміряною геометрією.
4. Профілограф-профілометр чи зразки шорсткості.

Порядок виконання роботи

1. Для комбінації трьох значень швидкостей різання і трьох подач підрахувати передбачувані значення шорсткості поверхні без врахування пластичних деформацій (дев'ять значень).

Побудувати графіки $Ra = F(v)$ для трьох значень S . Для перерахування Rz у Ra скористайтесь залежністю $Rz = 3,82 Ra^{0,75}$.

2. Для тих же сполучень швидкостей різання і подач підрахувати передбачувані значення шорсткості поверхні з урахуванням пластичних деформацій (дев'ять значень). Побудувати графіки $Ra = F(v)$ для трьох значень S .

3. За вказівкою викладача провести обробку зразків на трьох режимах різання (з дев'яти розрахункових).

4. Зробити вимір шорсткості оброблених поверхонь.

5. Порівняти фактичні значення шорсткості з розрахунковими, із врахуванням і без врахування пластичних деформацій.

6. Зробити висновки про ступінь відповідності розрахункових і фактичних значень шорсткості.

Контрольні питання

1. Назвіть фактори, що впливають на шорсткість обробленої поверхні.

2. Чому розрахункові значення шорсткості, отримані виходячи з кінематики різання, відрізняються від фактичних?

3. Назвіть причину сильного впливу швидкості різання на фактичну шорсткість обробленої поверхні з пластичних матеріалів у діапазоні швидкостей різання від 2 до 70 м/хв.

4. Охарактеризуйте вплив швидкості різання на шорсткість обробленої поверхні при чистових обробках.

5. Охарактеризуйте вплив подачі на шорсткість обробленої поверхні при чистових обробках.

6. Охарактеризуйте вплив глибини різання на шорсткість обробленої поверхні при чистових обробках.

7. Чому відрізняється характер впливу швидкості різання на шорсткість оброблених поверхонь у діапазоні $v = 2 \dots 70$ м/хв для в'язких і крихких матеріалів?

Рекомендована література

1. **Бобров, Б. Ф.** Основы теории резания металлов [Текст] / Б. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. **Кузнецов, В. Д.** Наросты при резании и трении [Текст] / В. Д. Кузнецов. – М. : Госиздат, 1956. – 284 с.
3. **Маталин, А. А.** Технологические методы повышения долговечности деталей машин [Текст] : производственно-практическое издание / А. А. Маталин. – К. : Техніка, 1971. – 142 с.
4. **Рыжов, Э. В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин [Текст] / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – М. : Машиностроение, 1979. – 175 с.
5. **Соловьев, С. Н.** Основы технологии судового машиностроения [Текст] / С. Н. Соловьев. – Л. : Судостроение, 1992. – 350 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя [Текст] : в 2 т. / ред. А. М. Дальский, А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 1986. – 656 с.

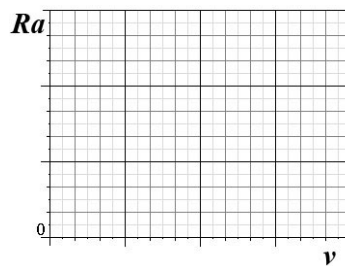
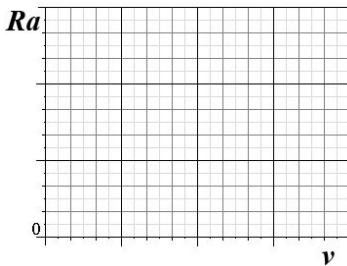
Лабораторна робота № 4
Прогнозування шорсткості робочих поверхонь
вузлів тертя та фрикційних з'єднань

Мета роботи: _____

Використовуваний контрольно-вимірjuвальний інструмент _____

№ з/п	Значення подач, мм/хв	Передбачувані значення шорсткості, мкм					
		без врахування пластичних деформацій			із врахуванням пластичних деформацій		
		v_1 , м/хв	v_2 , м/хв	v_3 , м/хв	v_1 , м/хв	v_2 , м/хв	v_3 , м/хв
1	При $S_1 = \dots$						
2	При $S_2 = \dots$						
3	При $S_3 = \dots$						

Графіки $Ra = F(v)$ для трьох значень S із врахуванням і без врахування пластичних деформацій:



Дані вимірювань шорсткості та висновки про ступінь відповідності розрахункових і фактичних значень шорсткості: _____

Лабораторна робота № 5

МЕТОДИ ОЦІНКИ ГЛИБИНИ ТА СТУПЕНЯ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ І ФРИКЦІЙНИХ З'ЄДНАНЬ

Мета і задачі роботи – вивчити існуючі методи контролю зміцнення робочих поверхонь вузлів тертя і фрикційних з'єднань; ознайомитись з технічними можливостями існуючої апаратури для контролю твердості поверхонь; здобути навички обґрунтованого вибору апаратури і способів визначення зміцнення поверхонь; отримати навички практичного використання окремих видів приладів і способів визначення ступеня зміцнення поверхонь тертя.

Методичні вказівки до роботи

Важливим показником стану поверхонь вузлів тертя і фрикційних з'єднань, що характеризує їх фізико-механічні властивості є твердість поверхні та розподіл твердості по глибині поверхневого шару. Зміна твердості поверхневого шару матеріалу може відбуватися або в результаті цілеспрямованої діяльності, або як супутнє явище при виконанні різних технологічних операцій механічної чи іншої обробки поверхонь.

Твердість поверхні та її розподіл по глибині в даний час є одним з основних факторів, що характеризують фізико-механічну якість поверхонь тертя.

Оскільки *твердість* – це здатність матеріалу чинити опір проникненню в нього іншого тіла, то для практичного використання в інженерній діяльності важливе значення мають методи кількісної оцінки твердості.

Існує багато різноманітних способів визначення твердості, які зазвичай можна класифікувати таким чином:

1. Методи, засновані на втисканні жорсткого наконечника у вигляді кулі, конуса, піраміди, циліндра, леза і т. п. у випробуване тіло, зазвичай з плоскою поверхнею. По швидкості прикладання навантаження методи вдавнення поділяються на статичні, у тому числі тривалі (для вивчення повзучості), і динамічні. До динамічних відносяться і такі методи, в основі яких лежить вимірювання величини пружного відскоку.

2. Методи, засновані на дряпанні випробуваного тіла: а) набором еталонних зразків різної твердості; б) жорстким наконечником у виді кулі, конуса, піраміди, голки, леза і т. п.

3. Методи, засновані на коливанні маятника, що спирається жорстким наконечником тієї чи іншої форми на випробуване тіло. За принципом дії вони є динамічними.

Визначення опору тіл руйнуванню в процесі різання, шліфування, стирання, дроблення тощо дозволяє оцінювати їх оброблюваність і опір зносу, але не може вважатися способом визначення твердості.

Не можна ототожнювати твердість з фізичними характеристиками, наприклад коерцитивною силою і електроопором, які іноді змінюються паралельно твердості та можуть служити зручними виробничими критеріями для оцінки твердості, але мають зовсім іншу фізичну природу.

Вимірювання твердості та мікротвердості являє собою універсальний спосіб визначення механічних властивостей матеріалів. Це надійний і тонкий метод дослідження властивостей поверхонь тертя і фрикційних з'єднань.

У табл. 1–4 (додаток 1) зазначені існуючі методи визначення твердості та надані їхні короткі характеристики.

Найбільш зручними з практичної точки зору є способи Брінелля (ДСТУ ISO 6506-1:2007, ГОСТ 9012-59), Роквелла (ДСТУ ISO 6508-2:2010, ГОСТ 9013-59) і Віккерса (ДСТУ ISO 6507-1:2007, ГОСТ 2999-59).

Для оцінки твердості тонких і дуже тонких зміцнених поверхневих шарів застосовується вимір мікротвердості вдавлюванням алмазної піраміди (ДСТУ ISO 6507-1:2007, ГОСТ 9450-60).

Випробування вдавлюванням сталевій кульки (за Брінеллем)

При визначенні твердості по величині поверхні відбитка від втискання сталевій кульки за Брінеллем як тверде тіло, що вдавлюється у випробовуваний матеріал, застосовують сталеву загартовану кульку діаметром 2,5; 5 або 10 мм (рис. 5.1).

Відношення зусилля P до поверхні F отриманого відбитка (кульового сегмента) дає число твердості, що позначається HB:

$$HB = \frac{P}{F} \text{ МН/мм}^2 \text{ (кгс/мм}^2\text{)}^*.$$

Число твердості, виражене через діаметр кульки D і діаметр відбитка (сегмента) d , характеризується наступною формулою:

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \text{ МН/мм}^2 \text{ (кгс/мм}^2\text{)}.$$

* Кілограм-сила (кГ, кГс, кгс) – одиниця сили в технічній системі одиниць, 1 кгс = 9,80665 Н $\approx$ 10 Н.

Діаметр відбитка вимірюють спеціальною лупою (див. рис. 5.1). Значення твердості за Брінеллем звичайно вказують без зазначення розмірності.

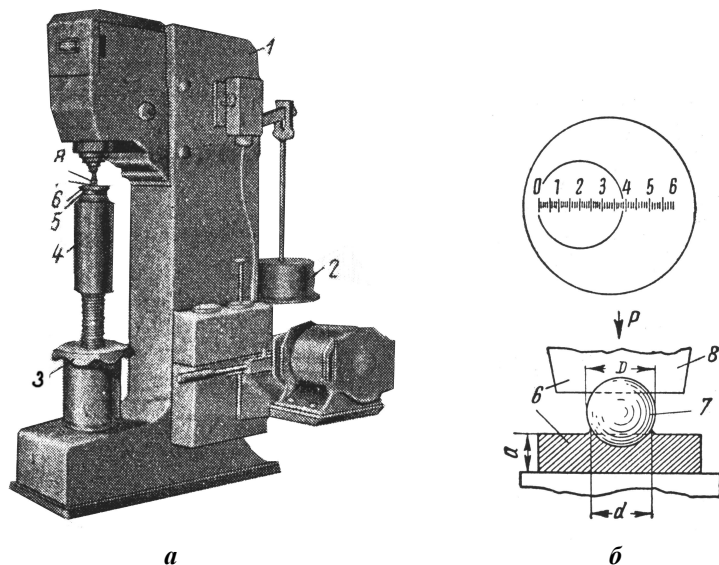


Рис. 5.1. Випробування на твердість за Брінеллем:
a – механічний прес Брінелля: 1 – станина; 2 – вантаж; 3 – маховик;
 4, 8 – шпindelь; 5 – стіл; 6 – зразок для випробувань; 7 – сталевий
 загартований кулька; *б* – схема випробувань і вимірювання
 діаметра відбитка за допомогою лупи

Для того щоб не вдаватися до довгих і досить складних обчислень твердості по зазначеній вище формулі, на практиці користуються спеціальною таблицею, яка дає переведення діаметра відбитка в число твердості *HB*.

Випробовувати можна тільки ті матеріали, твердість яких не перевищує 450 HB, тому що при випробуванні матеріалів з більшою твердістю сталевий кулька при вдавненні буде деформуватися і результат вийде неправильним. Щоб при

вдавленні кульки не відбувалося продавлення матеріалу, товщина його повинна бути не менша десятикратної глибини відбитка.

Діаметр кульки і величину навантаження встановлюють у залежності від випробовуваного металу, його твердості та товщини.

При випробуванні:

– сталі та чавуну $P = 30D^2$ (наприклад, $D = 10$ мм, $P = 29420$ Н (3000 кгс));

– міді, латуні, бронзи $P = 10D^2$ (наприклад, $D = 10$ мм, $P = 9806$ Н (1000 кгс));

– алюмінію, підшипникових сплавів $P = 2,5D^2$ (наприклад, $D = 10$ мм, $P = 2452$ Н (250 кгс)).

Твердість за цим методом визначають на пресі Брінелля (див. рис. 5.1). По величині твердості можна з деяким наближенням судити про міцність металу при розтягненні, тому що між числом твердості HB і міцністю σ_b існує приблизне співвідношення:

	σ_b
Штампована і катана вуглецева сталь	0,36 HB
Сірий чавун	(HB – 40)/6
Сталеве литво	(0,3...0,4) HB
Деформовані алюмінієві сплави	0,38 HB

Випробування вдавлюванням алмазного конуса (за Роквеллом)

При визначенні твердості по глибині вдавлення алмазного конуса або сталеві кульки за Роквеллом як тверде тіло, вдавлюване у випробовуваний матеріал, застосовують алмазний конус з кутом 120° або сталеву загартовану кульку діаметром 1,59 мм (1/16").

Величина твердості являє собою різницю глибин відбитків, одержуваних на випробовуваному предметі від вдавнення індентора (алмазного конуса або сталевий кульки) під двома навантаженнями: попереднім та остаточним.

Попереднє навантаження дорівнює 98 Н (10 кгс), а остаточне, тобто попереднє плюс основне, складає:

	Навантаження, Н (кгс)
При вдавненні сталевий кульки (шкала <i>B</i>)	980 (100)
При вдавненні алмазного конуса: (шкала <i>C</i>)	1470 (150)
(шкала <i>A</i>)	588 (60)

Сталеву кульку (шкала *B*) застосовують при визначенні твердості незагартованої сталі, бронзи, латуні й інших нетвердих матеріалів, а алмазний конус – для твердих матеріалів, наприклад загартованої сталі (шкала *C*), надтвердих сплавів, а також для визначення твердості тонких поверхневих шарів (шкала *A*).

Число твердості за Роквеллом – число абстрактне і виражається в умовних одиницях.

В залежності від того, чи застосовують сталеву кульку або алмазний конус і навантаження, при якому проводять випробування (тобто по якій шкалі – *B*, *C* чи *A*), число твердості позначають HRB, HRC, HRA.

Твердість визначають на приладі типу Роквелла (рис. 5.2).

Визначення твердості за Роквеллом дуже поширене для контролю якості продукції, тому що дозволяє випробувати як м'які, так і найтвердіші матеріали, а також тверді поверхневі шари (наприклад, цементований шар). Відбитки, що виходять від сталевий кульки й алмаза, дуже малі й не псують поверхню деталі, тривалість випробування 40–60 с, величина

твердості читається прямо на шкалі приладу без яких-небудь додаткових вимірів і перерахунків.

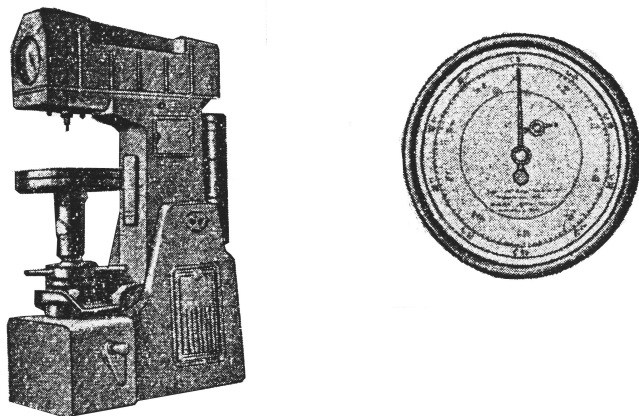


Рис. 5.2. Зовнішній вигляд приладу Роквелла і його шкали

Випробування вдавлюванням алмазної піраміди (за Віккерсом)

При визначенні твердості по величині відбитка від вдавлювання алмазної піраміди як тверде тіло, що вдавлюється у випробовуваний матеріал, застосовують чотиригранну піраміду з кутом при вершині 136° . По навантаженню, що припадає на одиницю поверхні відбитка, визначають число твердості, що позначається HV:

$$HV = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2} = 1,8544 \frac{P}{d^2} \text{ МН/м}^2 \text{ (кгс/мм}^2\text{)},$$

де P – навантаження на піраміду, Н (кгс); d – середнє арифметичне довжини обох діагоналей відбитка після зняття навантаження, мм; α – кут між протилежними гранями піраміди при вершині, рівний 136° .

Твердість визначають на приладі Віккерса (рис. 5.3).

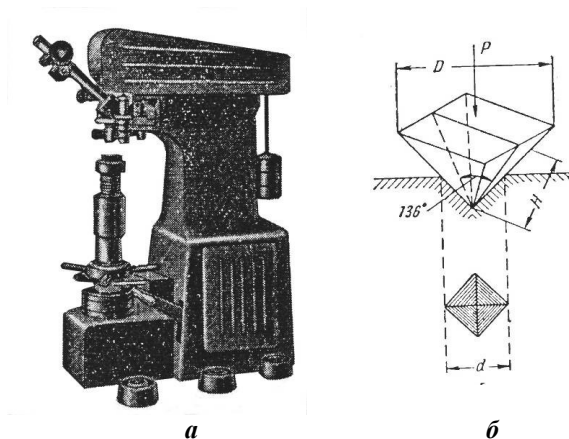


Рис. 5.3. Зовнішній вигляд приладу Віккерса (а) і схема визначення твердості за Віккерсом (б)

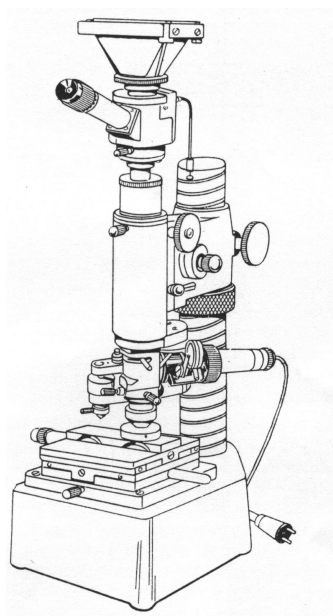
При дослідженні застосовують навантаження в 49, 98, 196, 294, 490, 980 і 1177 Н (відповідно 5, 10, 20, 30, 50, 100 і 120 кгс). Можливість застосування малих навантажень 49, 98 Н (5, 10 кгс) дозволяє випробовувати матеріали тонкого перерізу і тверді поверхневі шари (наприклад, ціановані, азотовані).

Для визначення числа твердості HV по величині діагоналі відбитка користуються спеціальною таблицею. Значення твердості за Віккерсом звичайно вказують без розмірності. Числа твердості HV до 400 одиниць збігаються з числами твердості HB (за Брінелем), а при твердості більш 400 вони перевищують числа HB тим більше, чим вище твердість.

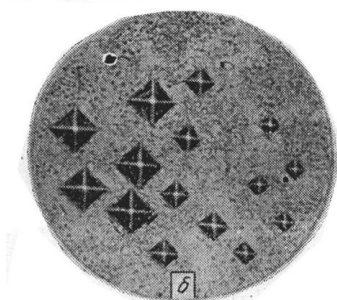
Дослідження на мікротвердість

На приладах Брінелля, Роквелла, Віккерса не можна визначати твердість мікроскопічно малих обсягів металу (мікротвердість), наприклад твердість окремих структурних складових

сплавів у зв'язку з тим, що сталева кулька, алмазний конус чи алмазна піраміда вдавлюються у випробовуване тіло на значну глибину і займають значну площу. Вимір мікротвердості роблять на приладах ПМТ-3. Прилад розроблений М.М. Хрущевим і Е.С. Берковичем в Інституті Машинознавства АН СРСР (рис. 5.4, 5.5).



a



б

Рис. 5.4. Загальний вигляд приладу ПМТ-3 (*a*)
і відбитку на мікрошліфі (*б*)

Випробування проводиться шляхом втискання стандартної 136-градусної алмазної піраміди з квадратною основою навантаженням 2, 5, 10, 20, 50, 100 і 200 гс. У разі потреби для виміру твердості дуже твердих матеріалів може застосовуватися навантаження 500 гс.

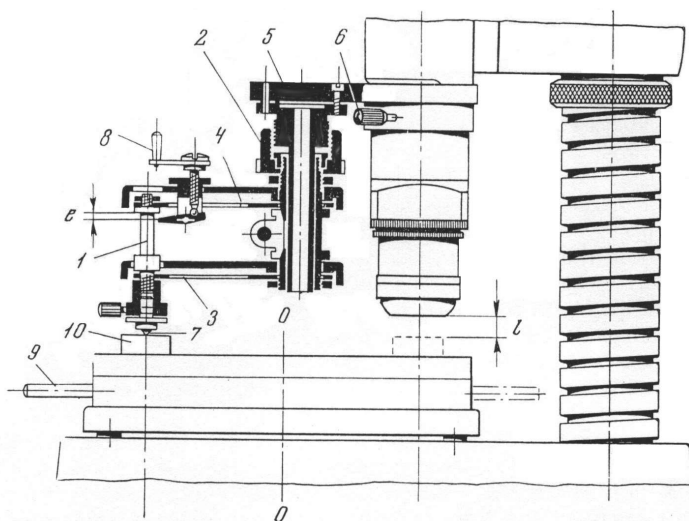


Рис. 5.5. Схема роботи і встановлення механізму навантаження приладу ПМТ-3:

1 – шток; 2 – гайка підйому механізму навантаження; 3, 4 – нижня і верхня пружні пластини; 5 – корпус; 6 – центрувальний гвинт правий; 7 – алмазна піраміда; 8 – ручка аретиру; 9 – ручка столика; 10 – предмет; 0-0 – вісь обертання столика; l – вільна відстань між предметом і об'єктивом; e – проміжок між фланцем штоку й аретирним важельком

Твердість виражається у величинах твердості

$$H = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2} = 1,8544 \frac{P}{d^2},$$

де P – навантаження на піраміду, Н (кгс); d – середнє арифметичне довжини обох діагоналей відбитка після зняття навантаження, мм; α – кут між протилежними гранями піраміди при вершині, рівний 136° .

Модифікований прилад для виміру мікротвердості поверхні ПМТ-5 дозволяє робити вимірювання мікротвердості як втисканням чотиригранної піраміди, так і дряпанням

(склерометрія). Дослідження твердості методом дряпання дозволяє характеризувати матеріали, оцінювати опір відриву і зрізу, типові для процесів абразивного зношування.

На рис. 5.6 представлена модифікація робочого вузла ПМТ-5 для виміру твердості дряпанням.

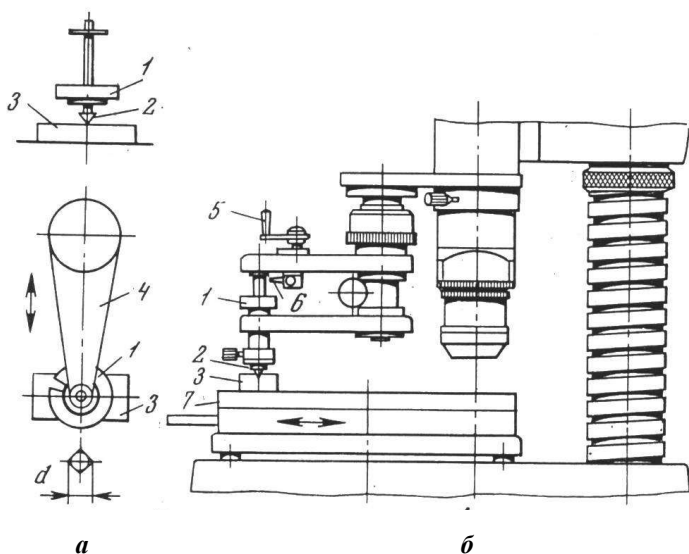


Рис. 5.6. Пружна ланка (а)
і схема навантаження при дряпанні (б):
1 – вантаж; 2 – індентор; 3 – зразок; 4 – пружні пластини;
5 – ручка; 6 – аретир; 7 – координатний столик

При дряпанні чотиригранною пірамідою твердість обчислюється по залежності

$$H_d = \frac{3708P}{b^2},$$

де P – навантаження на піраміду, Н (кгс); b – ширина подряпини, мм.

Дослідження розподілу твердості по глибині поверхневого шару

При вимірюванні твердості чорних металів і сплавів методом Брінелля діаметр відбитка коливається від 3 до 6 мм; при вимірюванні твердості методом Роквелла – від 0,3 до 0,7 мм; методом Віккерса розмір діагоналі коливається від 0,3 до 0,6 мм. Глибина відбитків досягає значення до 1,5 діаметра чи діагоналі відбитка.

Для вивчення зміни твердості по товщині поверхневого шару, що має основне значення для працездатності вузлів тертя і фрикційних з'єднань, використання методів виміру типу Брінелля, Роквелла і Віккерса не прийнятно через малу товщину шарів і неможливість виконати вимоги стандартних правил розміщення відбитків вимірів на досліджуваних поверхнях (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Стандартні правила розміщення відбитків

Методи випробувань твердості	Мінімально допустима відстань від центру відбитка		Мінімально допустима товщина відбитка
	до центру сусіднього відбитка	до краю зразка	
Сталевою кулькою (за Брінеллем, ДСТУ ISO 6506-1:2007)	$4d$ $6d$ (для металів з HB < 35)	$2,5d$ $3d$	$10h$
Алмазною 136-градусною пірамідою (ДСТУ ISO 6507-1:2007)	$2,5d$ (до краю відбитка)	$2,5d$	$1,2d$ (сталь) $1,5d$ (кольорові метали)
Алмазним конусом, сталевую кулькою (за Роквеллом, ДСТУ ISO 6508-2:2010)	3,0 мм	3,0 мм	$8h$
Алмазною 136-градусною пірамідою на мікротвердість (ДСТУ ISO 6507-1:2007)	$2d$ (до краю відбитка)	$2d$	$1,5d$

Примітка: d – діагональ або діаметр відбитка; h – глибина відбитка.

Єдиним способом, що дозволяє це зробити, у даний час є вимірювання мікротвердості в поєднанні з використанням методики косих шліфів. При вимірюванні мікротвердості, в залежності від прикладеного навантаження, розмір діагоналі відбитка коливається від 2–3 до 20–30 мкм.

Для одержання косих шліфів зрізують досліджувану поверхню під деяким кутом α і роблять її підготовку за відомими методиками для металографічних досліджень (рис. 5.7). Така методика дозволяє "розширити" зону вимірів і витримати вимоги табл. 5.1.

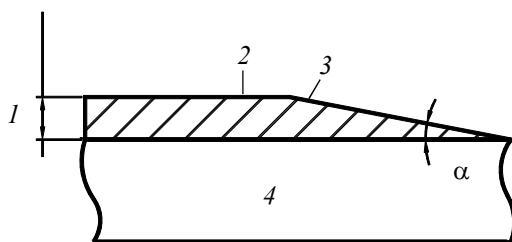


Рис. 5.7. Косий шліф:

- 1 – випробуваний шар; 2 – місце виміру твердості на поверхні;
3 – місце виміру твердості для вивчення її змінюваності по глибині шару; 4 – основний метал

При куті нахилу $\alpha = 5^{\circ}44'$ відбувається десятикратне розширення зони вимірів (у порівнянні з товщиною досліджуваного шару), що цілком достатньо для вивчення шарів товщиною 0,2–0,5 мм.

Матеріальна база для виконання роботи

1. ДСТУ ISO 6506-1:2007; ДСТУ ISO 6508-1:2013 (ISO 6508-1:2005, IDT); ГОСТ 9012-59; ГОСТ 9013-59; ГОСТ 2999-59; ГОСТ 9450-60.

2. Еталони твердості.

3. Зразки поверхонь з різних матеріалів і різної твердості.
4. Прилади для виміру твердості за Брінеллем, Роквеллом, Віккерсом і вимірювання мікротвердості.
5. Креслення деталей з різними видами зміцнення поверхонь.
6. Устаткування для зачищення поверхонь деталей і підготовки мікрошліфів.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з метою та задачами роботи.
2. Ознайомитися з кресленнями виданих деталей і вимогами до твердості їхніх робочих поверхонь.
3. Підібрати методи контролю твердості для кожної з поверхонь.
4. Ознайомитися з відповідним ДСТУ по вимірюванню твердості (за вказівкою викладача).
5. Підготувати контрольовану поверхню для виміру твердості.
6. Зробити вимір твердості.
7. Зробити висновок про відповідність або невідповідність твердості поверхні, що перевіряється, вимогам креслення.

Контрольні питання

1. Як класифікують методи визначення твердості?
2. Назвіть стандартизовані методи визначення твердості й сфери їхнього застосування.
3. Дайте коротку характеристику стандартизованим методам визначення твердості.
4. Як визначається зміна твердості по глибині поверхневого шару?
5. Назвіть можливі причини відмінності твердості поверхневого шару від твердості серцевини.

6. Назвіть основні способи зміцнення поверхневого шару, їхні можливості й сфери застосування.

Рекомендована література

1. **Григорович, В. К.** Твердость и микротвердость металлов [Текст] / В. К. Григорович. – М. : Наука, 1976. – 230 с.

2. **Соловьев, С. Н.** Основы технологии судового машиностроения [Текст] / С. Н. Соловьев. – Л. : Судостроение, 1992. – 350 с.

Лабораторна робота № 5
Методи оцінки глибини та ступеня зміцнення
поверхневого шару вузлів тертя і фрикційних з'єднань

Мета роботи: _____

Використовуваний контрольно-вимірjuвальний інструмент _____

Обраний метод вимірювання твердості _____

№ з/п	Матеріал, його стан	Умови проведення дослідження						
		Розміри зразка, мм	Шкала вимірювання	Індентор	Навантаження, кгс	Витримка, с	Отримані показники	Число твердості
1								
2								
3								
4								

Висновок про відповідність твердості перевіреної поверхні вимогам креслення _____

Лабораторна робота № 6

СХЕМИ, ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОСНАЩЕННЯ І ПАРАМЕТРИ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ ТА ФРИКЦІЙНИХ З'ЄДНАНЬ ОБКОЧУВАННЯМ РОЛИКАМИ

Мета і завдання роботи – вивчити існуючі способи поверхневого пластичного зміцнення зовнішніх поверхонь роликів і набути навичок призначення режимів їх обробки.

Методичні вказівки до роботи

Надійність роботи машин безпосередньо пов'язана з якістю поверхневого шару деталей, яка характеризується геометричними і фізико-механічними параметрами. Від якості поверхневого шару залежать експлуатаційні властивості – опір втомі, зносостійкість, корозійна стійкість, опір контактній втомі та ін. Оптимальна (з точки зору підвищення експлуатаційних властивостей деталей) поверхня повинна бути достатньо твердою, мати стискні залишкові напруження, дрібнодисперсну структуру, згладжену форму мікронерівностей з великою опорною поверхнею.

За допомогою широко застосовуваних методів остаточної обробки (чистове і тонке точіння, шліфування, хонінгу-

вання, доведення) створюється необхідна форма деталі із заданою точністю, але часто не забезпечується оптимальна фізико-механічна якість поверхневого шару.

Широко застосовуються методи термічного і хіміко-термічного зміцнення поверхневого шару, які вимагають великих додаткових матеріальних та енергетичних витрат. Для великогабаритних деталей такі методи взагалі неприйнятні через відсутність відповідного обладнання.

Застосування методів поверхневого пластичного деформування (ППД), при яких не знімається стружка, а відбувається тонке пластичне деформування поверхневого шару, дає можливість управляти фізико-механічною якістю поверхневого шару. Важливим при цьому є те, що для цього можна обійтися і без спеціального обладнання, а використовувати те металорізальне обладнання, на якому проводиться механічна обробка деталей. Витрати, пов'язані з виготовленням або придбанням додаткового технологічного оснащення, швидко окупаються за рахунок підвищення запасу міцності, довговічності та зносостійкості.

Застосування методів ППД має на меті:

- зменшення параметрів шорсткості, зміну форми мікронерівностей з більшою часткою опорної поверхні;
- підвищення границі витривалості на втому;
- підвищення зносостійкості поверхонь тертя (особливо в умовах сухого і граничного тертя);
- підвищення контактної втоми деталей, що працюють в умовах тертя кочення з ковзанням;
- створення сприятливих стискних залишкових напружень у поверхневому шарі;
- підвищення навантаженості та надійності роботи з'єднань з гарантованим натягом;

- створення регулярних мікрорельєфів із заданою формою і площею заглиблень для утримання мастильного матеріалу;

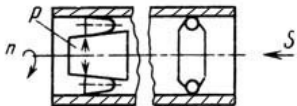
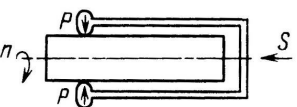
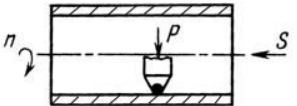
- заміну термічної або хіміко-термічної зміцнювальної обробки на більш просте зміцнення із застосуванням ППД;

- підвищення продуктивності праці шляхом заміни в ряді випадків шліфувальних і довідних операцій на ППД;

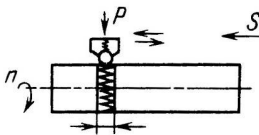
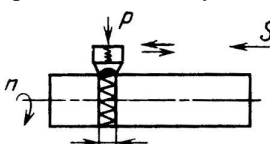
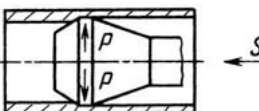
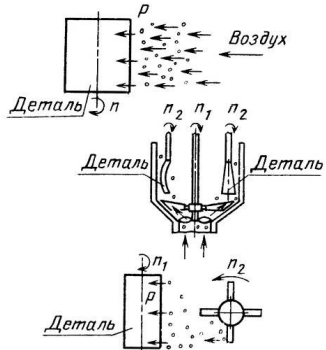
- зміну розмірів заготовки до допустимих.

Характеристика основних методів ППД і сфери їх застосування наведені в табл. 6.1.

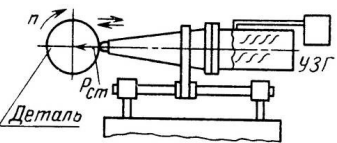
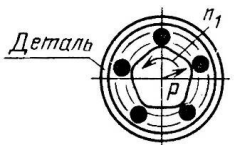
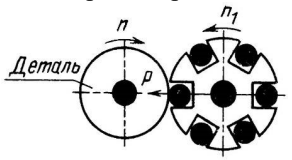
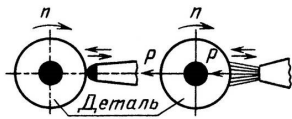
Таблиця 6.1. Основні методи ППД та сфери їх застосування

Метод, ескіз	Суть методу, оброблювані поверхні, обладнання, характер виробництва
Статичні методи	
Зміцнювальне розкочування  Зміцнювальне обкочування 	Кочення інструмента (ролик, куля) по оброблюваній поверхні, для плоских і опуклих поверхонь – обкочування, для внутрішніх поверхонь – розкочування. Поверхні тіл обертання типу втулок, валів, плоскі поверхні. $HRC \leq 45 \dots 55$. Універсальне і спеціальне обладнання. Серійне і масове виробництво.
Вигладжування 	Ковзання інструмента по оброблюваній поверхні. Поверхні тіл обертання. HRC до 70. Тонкостінні та нерівноцупкі деталі. Універсальне обладнання. Одиничне і серійне виробництво.

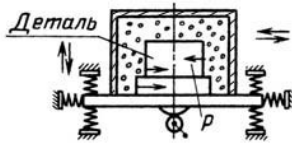
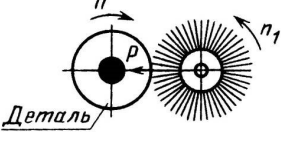
Продовж. табл. 6.1

Метод, ескіз	Суть методу, оброблювані поверхні, обладнання, характер виробництва
Статичні методи	
Вібраційне накочування 	Накочування або вигладжування при вібрації інструмента (куля, вигладжувальний наконечник) по дотичній до поверхні деформованого металу. Поверхні тіл обертання і плоскі поверхні.
Вібраційне вигладжування 	Універсальне обладнання. Одиначне і серійне виробництво.
Поверхнєве дорнування 	Поступальне ковзання дорна по поверхні, що охоплює його з натягом. Деталі типу втулок і труб. HRC ≤ 40. Спеціальне або протяжне і пресове обладнання. Серійне і масове виробництво.
Ударні методи	
Дробострумінне оброблення 	Удари дробу по деформованому металу. Дріб – круглі тіла з різних матеріалів. Залежно від джерела кінематичної енергії (струмінь газу, рідина, газ з рідиною, обертання ротора (дробомет)) обробка називається гідродробострумінною, гідропневмодробострумінною, дробометною і т. д. Поверхні різної конфігурації. HRC ≤ 55. Спеціальне обладнання. Серійне і масове виробництво.

Продовж. табл. 6.1

Метод, ескіз	Суть методу, оброблювані поверхні, обладнання, характер виробництва
Статичні методи	
Ультразвукова обробка 	До постійної сили притискання додається сила ударів ультразвукових коливань. Поверхні тіл обертання. Універсальне обладнання, оснащене ультразвуковим генератором (УЗГ) і голівкою. Одиничне і серійне виробництво.
Ударне розкочування 	Ролики створюють удари в момент проходження виступаючих елементів опори. Поверхні типу втулок і труб. HRC ≤ 50. Універсальне та спеціальне обладнання. Серійне і масове виробництво.
Відцентрове оброблення 	Удари інструмента по оброблюваній поверхні під дією відцентрової сили. Поверхні тіл обертання і плоскі поверхні. HRC ≤ 50. Універсальне обладнання. Серійне і масове виробництво.
Зміцнювальне карбування 	Ударне прикладання деформуючої сили при зворотно-поступальному переміщенні інструмента. Поверхні тіл обертання і плоскі поверхні. HRC ≤ 50. Універсальне і спеціальне обладнання. Одиничне, серійне і масове виробництво.

Продовж. табл. 6.1

Метод, ескіз	Суть методу, оброблювані поверхні, обладнання, характер виробництва
Статичні методи	
Вібраційне ударне оброблення 	Удари робочими тілами (дріб) по поверхні закріплених деталей в замкнутому просторі при його вібрації. Поверхні різної конфігурації. $HRC \leq 55$. Спеціальне обладнання. Серійне і масове виробництво.
Оброблення щіткою 	Удари кінцями дроту обертової щітки. Поверхні різної конфігурації. $HRC \leq 55$. Універсальне і спеціальне обладнання. Одиничне, серійне і масове виробництво.

Явища, що відбуваються в поверхневому шарі при обробці деталей поверхневим пластичним деформуванням

Поверхневий шар при обробці деталей ППД формується в результаті складних взаємопов'язаних явищ, що відбуваються в центрі деформування і прилеглих зонах: багаторазових пружних і пластичних деформацій, зміни міцності та пластичних властивостей деформованого металу, тертя і теплових процесів, зміни мікро- і макроструктури, мікрогеометрії поверхні тощо.

Основні параметри ППД наступні: пружна і пластична деформації в осередку деформації, площа контакту інструмента з оброблюваною поверхнею, сила притискання інструмента, напруження, що виникають під дією цієї сили, кратність застосування сили.

Як при статичній, так і при ударній дії на оброблюваній поверхні в початковий момент утворюється відбиток від інструмента, який потім перетворюється у відбитки або в серію відбитків, що примикають один до одного. При навантаженні твердої кулі статичною або ударною силою P (рис. 6.1,*а*) вона вдавлюється в оброблюваний матеріал. Зі збільшенням сили P спочатку відбувається пружна деформація поверхні, а потім пластична (лінія OAB , рис. 6.1,*б*). Внаслідок пластичних деформацій зворотний процес йде по лінії BC . Залишкова пластична деформація виражається в розмірі відбитка d , відповідного OC . Пластичне деформування під відбитком поширюється рівномірно і як би копіює з деяким спотворенням поверхню кулі (рис. 6.2).

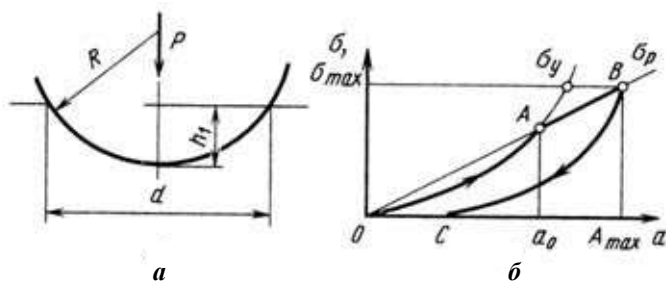


Рис. 6.1. Рух металу при вдавненні сферичного індентора:
а – відбиток; *б* – залежність пружної та пластичної деформацій
від напруження вдавнення σ

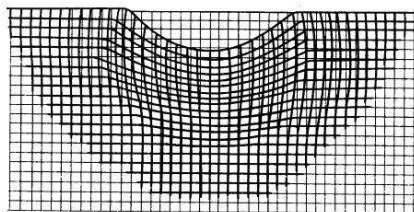


Рис. 6.2. Зона поширення пластичного деформування
по спотворенню прямокутної сітки

Глибина наклепу h пропорційна глибині відбитка h_1 ; тобто $h = mh_1$. Для різних умов обробки коефіцієнт $m = 2 \dots 20$.

Залежність між діаметром відбитка d і навантаженням P на кулю при його заглибленні в пружній і пластичній зонах описується рівняннями Герца і Мейєра:

$$P = \frac{1}{3D \left(\frac{1-\mu^2}{E} + \frac{1-\mu_1^2}{E_1} \right)} d^3;$$

$$P = ad^n,$$

де D – діаметр кулі; E, E_1 – модулі пружності матеріалу кулі й оброблюваного матеріалу; μ, μ_1 – коефіцієнти Пуассона матеріалу кулі й оброблюваного матеріалу; $a, n = 2$ – константи пластичності; d – діаметр відбитка.

Ці формули справедливі для умов деформування без урахування тертя, коли контактують тіла ізотропні, відповідно до закону Гука, площа контакту мала і навантаження прикладені перпендикулярно до оброблюваної поверхні. Процеси ППД протікають в більш складних умовах, тому зазначені формули в даному вигляді мають обмежене застосування, однак вони показують основні силові залежності при ППД.

Ступінь пластичного деформування $\varepsilon = d/D$, де d – діаметр відбитка (лунки); D – діаметр вдавлюваної сфери. Для різних методів ППД і різних умов обробки $\varepsilon = 0,1 \dots 0,9$; для конструкційних сталей $\varepsilon = 0,3 \dots 0,7$.

Структурні складові мають різну здатність до зміцнення. Для структури мартенситу глибина наклепаної зони більша, ніж при тих же умовах для інших структур. Структури сорбіту мають найменшу глибину наклепаного шару.

Ступінь наклепу різних структур, оцінена за відносним збільшенням твердості $\frac{\Delta HV}{HV} 100\%$ і отримана за одних і тих же умов, показана на рис. 6.3. Сорбіт має не тільки мінімальну глибину, але і мінімальну ступінь наклепу.

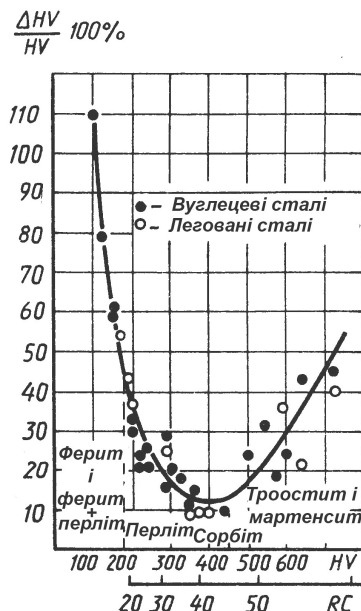


Рис. 6.3. Ступінь максимального наклепу для структур металу різної твердості

Глибина наклепу h пов'язана з силою деформування P співвідношенням $h = \sqrt{P/(2\sigma_T)}$, де σ_T – границя текучості матеріалу.

Для конструкційних сталей з похибкою не більше $\pm 10\%$ справедливе співвідношення $\sigma_T = HB/3$, тому $h = \sqrt{3P/2HB}$, $HB \approx \frac{2P}{\pi d^2}$; $h = 1,5d$ (рис. 6.4).

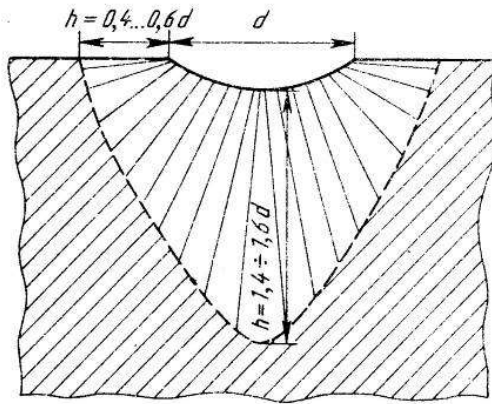


Рис. 6.4. Характер поширення наклепаної зони під поверхнею відбитка

Багаторазове прикладання одного і того ж статичного навантаження при вдавненні кулі в одне і те саме місце не призводить до помітного збільшення розмірів пластичного відбитка. На відміну від статичного, при ударному вдавненні кулі зі збільшенням кількості ударів до 15...20 розмір відбитка для різних умов обробки збільшується в 1,25...1,55 рази. Це збільшення буде меншим, якщо сталі більш тверді, при цьому діаметр кулі істотно не впливає: $d_{\max} / d \approx 1,55 - HB/1000$.

За умови рівності діаметрів відбитків глибина наклепаної зони, отриманої при ударному вдавлюванні кулі, практично дорівнює глибині наклепаної зони, отриманої при статичному одноразовому вдавненні кулі. Тому залежності параметрів від глибини наклепаного шару для умов статичного вдавнення можуть бути застосовані для ударного навантаження.

Ударне вдавнення в порівнянні зі статичним, залежно від твердості оброблюваного матеріалу, вимагає в 1,7...2,8 рази більше енергії (рис. 6.5).

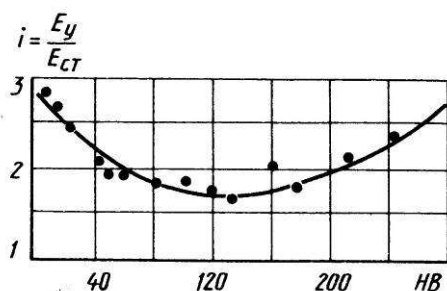
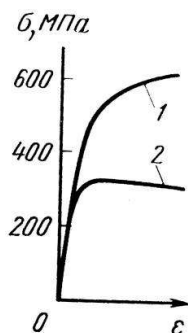


Рис. 6.5. Збільшення енергії вдавнення $i = E_y / E_{ст}$ при ударному навантаженні в порівнянні зі статичним навантаженням для матеріалів різної твердості

Одна з причин цього полягає в тому, що чим більша швидкість навантаження, тим менше час протікання пластичного деформування, а, отже, вище напруження, при якому відбувається перехід від пружного деформування до пластичного. При збільшенні швидкості удару до 7,8 м/с динамічна границя міцності сталі інтенсивно зростає, при подальшому збільшенні швидкості границя міцності змінюється незначно. Залежність напруження від деформації для динамічного навантаження розташована вище такої залежності для статичного навантаження (рис. 6.6). Границя пружності при одноразовому ударі практично не збільшується, але значно підвищуються границі текучості та міцності. Збільшення швидкості навантаження до 100 м/с призводить до підвищення границі текучості, наприклад для армко-заліза – в 3,4 рази, для сталі 45 – в 3 рази, для Ст3 – в 2,8 рази. Границя міцності для вуглецевих термооброблених сталей зростає на 43 %, для армко-заліза – на 55 %, тобто зі збільшенням твердості матеріалу інтенсивність зміни цих характеристик зменшується. Найменше зазначені характеристики змінюються для високоміцних сталей.

Рис. 6.6. Залежності напруження від ступеня деформування для сталі невисокої твердості при навантаженні:
1 – ударному; 2 – статичному



Характер зміни механічних властивостей металу поверхневого шару при обробці методами ППД показаний на рис. 6.7. Так, при алмазному вигладжуванні корозійностійкої сталі й алюмінієвого сплаву на оптимальних режимах границя міцності матеріалу зміцненого поверхневого шару збільшується до двох разів.

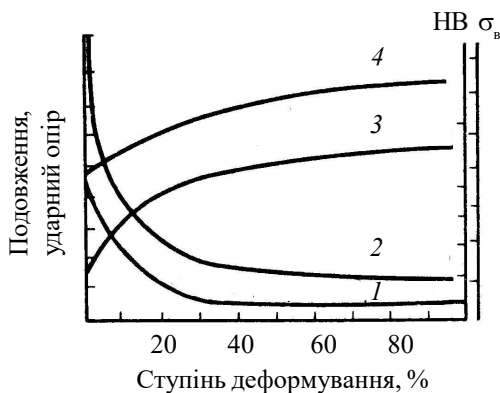


Рис. 6.7. Характер зміни механічних властивостей металу поверхневого шару від ступеня деформування:
1 – ударний опір; 2 – подовження, %;
3 – твердість за Брінеллем; 4 – границя міцності

При обробці ППД в результаті деформування поверхневого шару металу і роботи тертя утворюється теплота, яка нагріває оброблювану заготовку, інструмент і робочі тіла, а також навколишнє середовище. Теплота деформування генерується в осередку деформування, теплота тертя – безпосередньо на поверхні контакту. Джерело теплоти – місце, що характеризується ефективною тепловою потужністю, тобто кількістю теплоти, що утворюється за одиницю часу, і розподілом теплоти по об'єму. Теплота утворюється в основному внаслідок пластичного деформування, тому джерело теплоти відповідає формі осередка деформування, а сам процес характеризується миттєвим локальним нагріванням і швидким відведенням теплоти всередину заготовки. Час контактування поверхні заготовки з джерелом теплоти залежить від швидкості переміщення джерела і його розмірів в напрямку переміщення.

При інтенсивних режимах обробки локальні ділянки поверхневих шарів нагріваються до різної температури: при обкочуванні – до 300...400 °С, при вигладжуванні – до 600...700 °С, при ударних методах – до 800...1000 °С.

Таке нагрівання може викликати термопластичне деформування та інші явища, що знижують ефект зміцнення. Термопластичне деформування призводить до різкого спаду залишкових стискних напружень на поверхні, а в деяких випадках – до перетворення їх у розтягувальні. Можуть утворюватися також вторинні структури, що знижують експлуатаційні властивості поверхні. Стики структур є концентраторами напружень, що призводить до зародження втомних тріщин. Необхідно встановлювати такі тиск і швидкість обробки конкретних матеріалів, які не викликають підвищення температури поверхні більше за допустиму.

Обробка ППД супроводжується складними структурними та фазовими перетвореннями, характерними для формування поверхневого шару (див. табл. 6.1). У початковий момент відбувається дроблення зерен металу на блоки (полігонізація) і утворюється мозаїчна структура. Далі внаслідок посилення розвитку зрушень по площинах ковзання утворюються нові, значно подрібнені зерна. При цьому кристаліти втрачають свою глобоїдну форму, сплющуються, витягуються в напрямку деформування. Різко змінюється співвідношення їх розмірів, утворюється впорядкована орієнтована структура волокнистого характеру з анізотропними механічними властивостями, коли пластичність уздовж волокон вище, ніж в поперечному напрямку.

Основною причиною зміцнення є лавиноподібний розвиток дислокації дефектів кристалічної решітки металу, що скупчуються поблизу ліній зрушень, і подальше їх застрягання перед різними перешкодами, що утворюються в процесі деформування (схрещення дислокації, траєкторії руху яких перетинаються між собою; смуги деформування і т. д.) або існували до нього (міжкристалічні граничні шари, скупчення атомів домішок, елементи іншої фази і т. д.). Дроблення на блоки об'ємів металу, укладених між лініями ковзання, поворот цих блоків, викривлення площин ковзання та накопичення на них продуктів руйнування кристалічної решітки сприяють збільшенню нерівностей по площинах ковзання, а отже, і зміцненню.

При завищених силових параметрах обробки може відбуватися перенаклеп, в результаті якого в поверхневому шарі з'являються небезпечні мікротріщини, намічається утворення частинок відшарованого металу, поверхневі зерна сплющуються так, що стають майже непомітними. Різко збільшується шорсткість поверхні. Наклеп металу можна частково або

повністю зняти шляхом відпалу. Перенаклеп – незворотний процес, при якому нагрів не відновлює вихідну структуру металу і його механічні властивості.

Сфери раціонального застосування різних методів поверхневого пластичного деформування і вимоги до технологічності конструкції деталей

Методами ППД обробляють найбільш навантажені деталі машин і механізмів, від працездатності яких залежать надійність і довговічність виробів в цілому.

Залежно від розмірів, конфігурації, матеріалу деталі, призначення обробки, серійності виробництва та інших чинників в кожному конкретному випадку вибирають найбільш оптимальний метод ППД.

У багатьох випадках доцільно застосовувати накочування (розкочування, обкочування), алмазне вигладжування, віброударну обробку та обробку дробом, а також вібраційне обкочування (вібровигладжування). Ці методи універсальні, вони доповнюють один одного і в комплексі забезпечують зміцнення найрізноманітніших деталей.

Циліндричні, конічні й інші зовнішні та внутрішні поверхні правильної геометричної форми твердістю $HRC < 45 \dots 50$ ефективно обробляти накочуванням роликів або кульковим інструментом, а поверхні твердістю $HRC > 50$ методом алмазного вигладжування. Алмазне вигладжування в порівнянні з накочуванням має істотно меншу продуктивність, однак є більш універсальним і дозволяє обробляти малоцупкі та нерівноцупкі деталі, оскільки тиск при алмазному вигладжуванні $100 \dots 200 \text{ Н}$, в той час як при накоченні він становить $10 \dots 100 \text{ кН}$.

До складних поверхонь розглянутих груп деталей, оброблюваних накочуванням і алмазним вигладжуванням, відносяться: зовнішні та внутрішні сферичні; профільні типи кулачків;

фасонні (діаметр яких по довжині змінюється нелінійно); поверхні галтелей і радіусних переходів; поверхні різьби; поверхні шліц і канавок; поверхні зубів зубчастих коліс.

Складні для обробки і переривчасті поверхні, тобто геометрично правильні поверхні, що мають поглиблення у вигляді отворів, шпонкових канавок, проточувань тощо, а також глибокі отвори.

Для здійснення накочування і алмазного вигладжування складних поверхонь в порівнянні з обробкою простих поверхонь необхідно додатково вирішити ряд технологічних і конструкторських завдань, пов'язаних зі створенням деформуючого інструмента спеціального профілю, з необхідністю огинати оброблювану поверхню по криволінійній траєкторії та орієнтувати інструмент певним чином, з необхідністю змінювати під час обробки діаметр і деякі інші розміри пристроїв для накочування і алмазного вигладжування тощо.

Деталі більш складної конфігурації (пружини, ресори, шатуни, лопатки) неможливо обробляти накочуванням і алмазним вигладжуванням. Їх доцільно зміцнювати віброударним методом або обробкою дробом. Однак енергетичні затрати на обробку цими методами в два-три рази вище.

Для підвищення довговічності деталей, що піддаються зношуванню, а також схоплюванню металу, на їх поверхні створюють регулярний мікрорельєф шляхом вібраційного накочування (вібраційного вигладжування).

Накочування, вібраційне вигладжування і алмазне вигладжування виконують зазвичай на універсальних металорізальних верстатах за допомогою нескладних пристроїв, а об'ємну віброударну обробку і обробку дробом – на спеціальних вібромашинах і установках.

Вимоги до технологічності конструкцій деталей, оброблюваних ППД на універсальних і спеціальних верстатах, приблизно

такі ж, як і вимоги до деталей, що піддаються механічній обробці. Для обробки дробом (дробоударній), вібраційній ударній обробці та інших подібних методів характерний одночасний вплив на всю зовнішню або внутрішню поверхню. Якщо певну поверхню обробляти не можна, її необхідно ізолювати за допомогою спеціальних пристосувань, а також слід передбачити бази для установки і закріплення деталей в контейнері або в камері.

Ефективність зміцнення залежить від матеріалу, структури, виду напруженого стану, форми і т. ін. Велику роль відіграє вибір методу і режиму зміцнення. Тому при впровадженні методів ППД у виробництво зазвичай попередньо проводять дослідження і випробування. Максимального ефекту досягають, якщо враховують конкретні умови експлуатації деталей.

Працездатність деталей підвищують застосуванням комбінованої обробки різними методами ППД, а також обробки методами ППД в поєднанні з іншими методами зміцнення.

Обкочування роликовим інструментом. Схема процесу, тиск в осередку деформування і кратність прикладення деформуючої сили

Для обкочування використовують ролики різної конфігурації, які зазвичай встановлюють під деяким кутом до осі оброблюваної деталі, при цьому в зоні контакту залишається відбиток, форма якого залежить від конфігурації ролика, кривизни оброблюваної поверхні та кута α (рис. 6.8,*в*). Відбиток еліптичної форми з вісями $2a$ і $2b$ (рис. 6.8,*б*) утворюється при використанні ролика кругового профілю, встановленого без нахилу до осі оброблюваної деталі. Ролики з робочим профілем, що має в осьовому перерізі коло, тобто ті, у яких радіус кривизни дорівнює половині діаметра ролика, дають відбиток такої ж форми, що і кулі. Прямокутний відбиток (рис. 6.8,*а*) утворюється при лінійному вихідному

контакті ролика з деталлю, умовою якого зазвичай служить рівність абсолютних значень кривизни профілю ролика і деталі (наприклад, гальтель на деталі та гороподібний ролик). У найпростішому випадку прямокутний відбиток створює циліндричний ролик, встановлений паралельно осі циліндричної оброблюваної деталі, при цьому їх кривизна в поперечному перерізі не впливає на форму відбитка. Прямокутний відбиток доцільно використовувати при обробці "на врізання", тобто без поздовжньої подачі. Найбільш поширена схема обробки з використанням відбитка каплеподібної форми, яка зазвичай створюється при обкочуванні циліндричним або конічним роликом, встановленим під кутом α до оброблюваної поверхні (рис. 6.8, в).

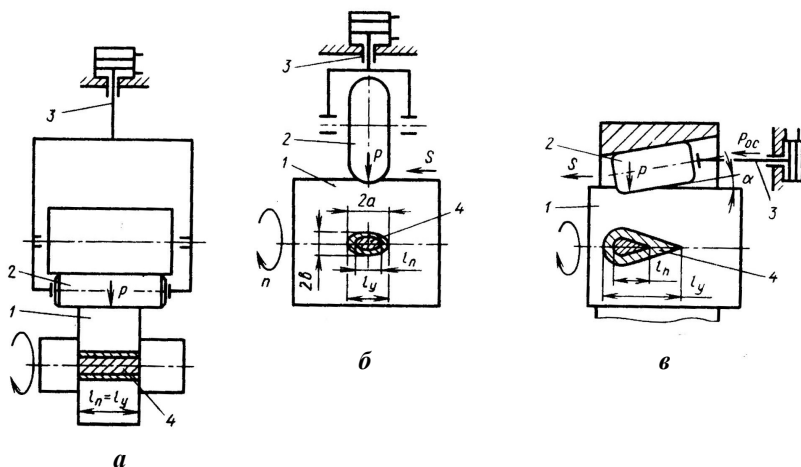


Рис. 6.8. Характерні схеми обкочування:

а – циліндричним роликом без осьової подачі "на врізання"; **б** – роликом кругового профілю; **в** – циліндричним або конічним роликом, встановленим під кутом α до оброблюваної поверхні; 1 – оброблювана деталь; 2 – ролик; 3 – система навантаження; 4 – зона контакту; P – нормальна сила; $P_{\text{вс}}$ – вісна сила; $l_{\text{п}}$ – довжина пластичного відбитку; $l_{\text{п}}$ – довжина пружного відбитку; S – подача

При еліптичній формі відбитка контактний тиск розподіляється по еліпсоїду з максимумом в центрі (рис. 6.9,*а*). У разі лінійного вихідного контакту епюра тиску являє собою еліптичний циліндр з максимумом в осьовому перерізі, при цьому біля країв ролика з нульовим радіусом кривизни тиск прямує до нескінченності (рис. 6.9,*б*). При заокругленні країв ролика концентрація тисків відповідно зменшується і тому можна побудувати профілі роликів, що створюють будь-яку задану епюру тисків (рис. 6.9,*в*). Поєднанням заокруглення крайової ділянки ролика та установки його під кутом α до осі оброблюваної деталі досягається оптимальна форма каплеподібного відбитка і відповідна епюра тисків (рис. 6.9,*г*).

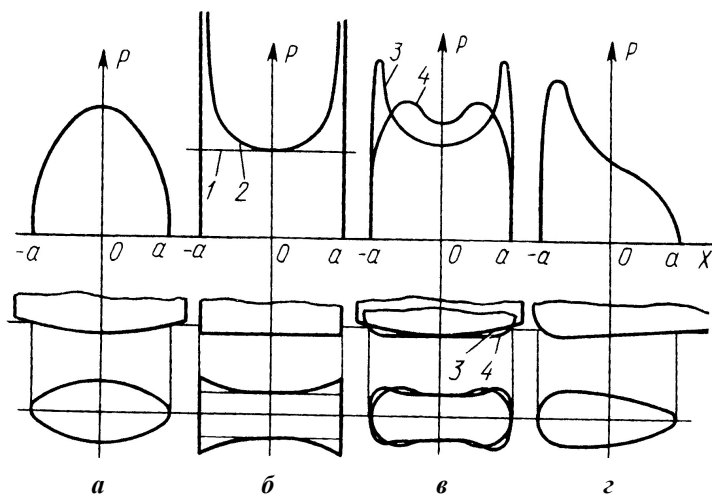


Рис. 6.9. Характерні форми відбитків роликів і епюри тисків у вогнищі деформації при обкочуванні:

а – ролик кругового профілю; *б* – лінійний вихідний контакт циліндричного ролика; *в* – лінійний вихідний контакт циліндричного ролика з округленими крайовими ділянками різних радіусів; *г* – каплеподібний відбиток;
 1 – контакт необмеженої довжини; 2 – прямокутні крайові ділянки;
 3 – менший радіус заокруглення; 4 – більший радіус округлення;

Відбиток ролика під час обкочування перетворюється в пластично деформовану канавку, яка при обробці циліндричних поверхонь з подачею являє собою гвинтову лінію. Оскільки ширина цієї канавки у багато разів перевищує подачу, то при другому і наступних оборотах деталі ролик виходить на вже деформовану поверхню деталі, частково розширюючи і поглиблюючи канавку. Після декількох оборотів процес стабілізується. Ролик стикається з кожною точкою поверхні $2a/S$ разів, де $2a$ – ширина канавки ($2a = l_k$); S – подача. Початкова канавка відповідає ділянці BC (рис. 6.10), AB – ділянка деформованої поверхні за роликом; φ_a – кут вдавнення ролика. Перед роликом утворюється хвиля деформованого металу, а розширення контактної канавки приводить до зростання опору видавлювання, що обумовлює поступове віджимання ролика на ділянці CD до тих пір, поки рівень обкатаної поверхні не підніметься до початкового (без урахування зміни рівня за рахунок формування мікронерівностей). На ділянці DEF процес стабілізований і проходить у рівноважних умовах. Хвиля металу перед роликом GHI набагато більша хвилі AB за ним. На всій ділянці обкочування до його стабілізації в точці D змінюються кути вдавнення ролика. У початковому положенні передній і задній кути вдавнення рівні, далі, в міру подачі та поглиблення ролика, передній кут вдавнення φ'_a збільшується аж до стабілізації процесу, а задній кут φ''_a змінюється незначно.

Процес поверхневого деформування залежить від сили обкочування, розмірів, профілю ролика і розмірів оброблюваної поверхні. При деяких поєднаннях зазначених факторів стабілізація процесу може і не настати. Наприклад, на рис. 6.10,б показано, як інтенсивне зростання хвилі металу перед роликом триває до тих пір, поки гребінь хвилі не почне руйнуватися в точці H або поки ролик не "перескочить" через гребінь хвилі.

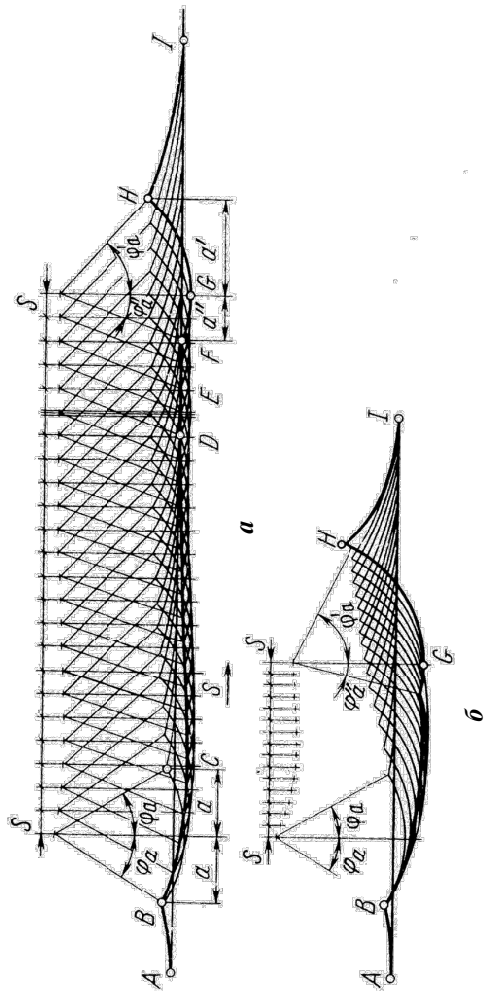


Рис. 6.10. Схема послідовного деформування оброблюваної поверхні при обкочуванні роликом з поздовжньою подачею S :
 a – при нормальному процесі; b – при нестабільному процесі

Ділянка поверхні BD нижче решти обкатаної поверхні, в деяких випадках це може істотно вплинути на розмір оброблюваної деталі.

Є співвідношення для визначення ширини l_k канавки на початку обкочування: $l_k = 4\sqrt{P/HB}$, мм, де P – сила обкочування, Н; HB – твердість матеріалу.

Кратність програми навантаження, або кількісь циклів навантаження, визначають за формулою $N = \frac{l_k z}{S} k$, де l_k – ширина деформованої канавки, мм; z – кількість роликів; k – число робочих ходів; S – подача, мм/об.

Руйнування поверхневого шару може відбуватися не тільки при силі, яка перевершує критичну, а й при невеликому навантаженні, якщо N занадто велике. В цьому випадку руйнування поверхні носить періодичний характер. Допустиме N суттєво залежить від марки оброблюваного матеріалу: для досягнення $Ra = 0,16$ мкм для незагартованої сталі необхідно, щоб $20 < N < 200$, для чавуну $35 < N < 60$ (рис. 6.11).

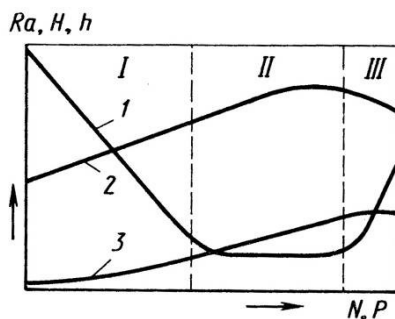


Рис. 6.11. Характер впливу числа циклів навантаження N та сили обкочування P :

I – на шорсткість оброблюваної поверхні Ra ; 2 – на поверхневу твердість H ; 3 – на глибину зміцненого шару h

Обробку чутливих до перенаклепу матеріалів, наприклад чавунів і алюмінієвих сплавів, доцільно проводити при мінімальних силах, збільшуючи за необхідності в допустимих межах число N .

У зоні I (див. рис. 6.11) відбувається переважно зменшення шорсткості, в зоні II – переважно зміцнення поверхневого шару, в зоні III – знеміцнення.

Призначення режимів обкочування при поверхневому пластичному деформуванні роликami

Вихідними даними для призначення режиму обкочування є:

h_n – необхідна глибина зміцнення, мм;

$Ra_{\text{кін}}$ – шорсткість поверхні після зміцнення (кінцева), мкм;

$Ra_{\text{поч}}$ – шорсткість поверхні перед зміцненням (початкова), мкм;

D_d – діаметр зміцнюваної поверхні, мм;

HB – твердість зміцненої поверхні за Брінеллем, Н/мм²;

σ_T – границя текучості зміцнюваного матеріалу, Н/мм².

Порядок призначення режиму обкочування

1. Виходячи із заданих $Ra_{\text{кін}}$ і $Ra_{\text{поч}}$, знайти профільний радіус ролика $R_{\text{пр}}$, мм, для $S \approx 0,4$ мм/об за табл. 6.2. Оптимальні подачі лежать в межах 0,2...0,6 мм/об.

Таблиця 6.2. Подачі при обкочуванні, (мм/об)

Профільний або приведений радіус ролика, мм	Необхідний параметр шорсткості R_a , мкм						
	0,63		0,32		0,16		
	Вихідний параметр шорсткості R_a , мкм						
	5,0	2,5	1,25	2,5	1,25	1,25	0,63
5	0,07	0,15	0,3	0,07	0,15	0,07	0,15
6,3	0,09	0,18	0,36	0,09	0,18	0,09	0,17
8	0,12	0,23	0,46	0,12	0,23	0,12	0,19
10	0,15	0,29	0,56	0,15	0,29	0,15	0,21

Продовж. табл. 6.2

Профільний або приведений радіус ролика, мм	Необхідний параметр шорсткості R_a , мкм						
	0,63		0,32		0,16		
	Вихідний параметр шорсткості R_a , мкм						
	5,0	2,5	1,25	2,5	1,25	1,25	0,63
12,5	0,18	0,37	0,64	0,18	0,34	0,18	0,24
16	0,23	0,47	0,72	0,23	0,39	0,23	0,27
20	0,29	0,58	0,80	0,29	0,42	0,29	0,30
25	0,37	0,83	0,88	0,37	0,48	0,35	0,35
32	0,47	0,94	1,0	0,47	0,54	0,39	0,39
40	0,58	1,12	1,12	0,58	0,60	0,43	0,43
50	0,74	1,24	1,24	0,66	0,66	0,48	0,48
63	0,92	1,40	1,40	0,72	0,72	0,54	0,54
80	1,17	1,60	1,60	0,84	0,84	0,60	0,60
100	1,45	1,80	1,80	0,96	0,96	0,66	0,66
125	1,80	2,0	2,0	1,05	1,05	0,75	0,75
160	2,25	2,25	2,25	1,23	1,23	0,85	0,85
200	2,55	2,55	2,55	1,35	1,35	0,95	0,95
250	2,9	2,9	2,9	1,55	1,55	1,1	1,1
320	3,2	3,2	3,2	1,7	1,7	1,2	1,2
400	3,6	3,6	3,6	1,9	1,9	1,4	1,4
500	4,0	4,0	4,0	2,2	2,2	1,55	1,55
630	4,6	4,6	4,6	2,4	2,4	1,7	1,55

2. Виходячи з конструкції деталі (розмірів, жорсткості, місця розташування зміцнюваних поверхонь тощо) вибрати спосіб зміцнення (кільцевими роликами або стрижневими обкатниками) і кількість робочих роликів. Кільцеві ролики рекомендується застосовувати діаметром 50...155 мм (ГОСТ 16344-70). Стрижневі ролики для обкатників виконують діаметром не більше 18 мм.

3. Розрахувати зусилля P_H , що забезпечує отримання наклепаного шару глибиною h_H , із залежності

$$P_H = 2h_H^2 \sigma_T m^2,$$

$$\text{де } m = 1 + 0,07 \left(\frac{1}{\frac{1}{R_{\text{пр}}} + \frac{2}{D_p} + \frac{1}{R_d} - \frac{1}{R}} \right); R - \text{радіус профілю де-}$$

талі в осьовому перерізі (для циліндричної деталі $R = \infty$).

За цих умов поверхнева твердість деталі буде підвищена на 25...40 %.

Глибина наклепаного шару для великих деталей повинна знаходитися в межах $0,02R_d \leq h_n \leq 0,10R_d$.

4. Розрахувати ширину канавки деформування по залежності

$$l_k = 4\sqrt{P_n / \text{HB}}, \text{ мм.}$$

5. Знайти кратність прикладання навантаження

$$N = \frac{l_k z}{S} k,$$

де z – кількість роликів; k – кількість робочих ходів (бажано обробку провести за один робочий хід); S – подача, мм/об (деталі або обкатника при нерухомій деталі).

Допустима N залежить від марки оброблюваного матеріалу: для досягнення $Ra = 0,16$ мкм для незагартованої сталі необхідно, щоб $20 < N < 200$, для чавуну $35 < N < 60$.

6. Швидкість обкочування майже не впливає на шорсткість та інші характеристики зміцнених поверхонь, тому вона задається максимально виходячи з можливостей обладнання і зазвичай становить 20...200 м/хв.

Захоплюватися підвищенням швидкості обкочування не слід, тому що це може призвести до зниження ступеня пластичності деформування поверхневого шару.

7. Мاستильно-охолоджувальною рідиною при обкочуванні зазвичай служить машинне масло, суміш машинного масла з гасом (по 50 %), сульфофрезол (5%-ва емульсія). Обробку чавуну рекомендується проводити без охолодження.

8. За необхідності для підвищення продуктивності праці подача може бути призначена і більш оптимальною (з урахуванням рекомендацій табл. 6.2), але з подальшою перевіркою сили навантаження P_n і кількості циклів навантаження N .

Матеріальна база для виконання роботи

1. Креслення деталей із зазначенням поверхонь, що підлягають зміцненню.

2. Довідники з даними щодо механічних властивостей і твердості сталей та чавунів (додаток 2).

3. ГОСТ 16339–70, ГОСТ 16340–70, ГОСТ 16341–70, ГОСТ 16342–70, ГОСТ 16343–70, ГОСТ 16344–70.

4. Типові схеми обкочування зовнішніх поверхонь обертання.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з кресленням деталі та вимогами до поверхні, що піддається зміцненню.

2. Вибрати і обґрунтувати схему зміцнення.

3. Призначити режими ППД роликми зміцнюваних поверхонь.

4. Скорегувати режим для отримання максимальної продуктивності.

Контрольні питання

1. Навіщо застосовуються методи ППД при остаточній обробці деталей?

2. Чому підвищується втомна міцність деталей, оброблених ППД?

3. Чому підвищується зносостійкість деталей, оброблених ППД?

4. Назвіть сфери раціонального застосування різних методів ППД.

5. Назвіть основні фактори, що впливають на якість проведення ППД.

Рекомендована література

1. **Келоглу, Ю. П.** Металлы и сплавы [Текст] / Ю. П. Келоглу, К. М. Захариевич, М. И. Карташевская. – Кишинев : Карта молдованяскэ, 1977. – 264 с.

2. **Одинцов, Л. П.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст] : справочник / Л. П. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.

3. **Соловьев, С. Н.** Основы технологии судового машиностроения [Текст] / С. Н. Соловьев. – Л. : Судостроение, 1992. – 350 с.

4. Справочник технолога-машиностроителя [Текст] : в 2 т. / ред. А. М. Дальский, А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 1985–86. – Т. 1, 2. – 656 с.

Лабораторна робота № 6

**Схеми, технологічне оснащення і параметри зміцнення
поверхневого шару вузлів тертя та фрикційних з'єднань
обкочуванням роликками**

Мета роботи: _____

Використовуваний контрольно-вимірювальний інструмент _____

Вихідні дані для призначення режиму обкочування:

Необхідна глибина зміцнення $h_n = \dots$ мм;

Шорсткість поверхні після зміцнення (кінцева) $Ra_{\text{кін}} = \dots$ мкм;

Шорсткість поверхні перед зміцненням (початкова)
 $Ra_{\text{поч}} = \dots$ мкм;

Діаметр зміцнюваної поверхні $D_d = \dots$ мм;

Твердість зміцненої поверхні за Брінеллем $HB = \dots$ Н/мм²;

Границя текучості зміцнюваного матеріалу $\sigma_T = \dots$ Н/мм².

1. Обраний профільний радіус ролика $R_{\text{пр}} = \dots$ мм.

2. Спосіб зміцнення і кількість робочих роликів _____.

3. Зусилля $P_n = 2h_n^2 \sigma_T m^2 = \dots$ Н.

4. Ширина канавки деформування $l_k = 4\sqrt{P_n / HB} = \dots$ мм.

5. Кратність прикладання навантаження $N = \frac{l_k z}{S} k = \dots$

6. Призначена швидкість обкочування $v = \dots$ м/хв.

7. Мазильно-охолоджувальна рідина _____.

Висновки і рекомендації щодо корегування режиму обробки
для отримання максимальної продуктивності _____

Таблиця 1. Методи статичного визначення твердості вдавлюванням (макротвердість)

Назва приладу	Принцип дії і форма наконечника	Вимірюваний параметр, метод обчислення твердості та її умовна розмірність
За методом Герца	Здавлювання півсфери і площини з випробуваного матеріалу до появи слідів пластичної деформації або тріщин	$H_{\Gamma} = 6P / \pi d_{\text{кр}}^2$, кгс/мм ²
Прес Брінелля	Вдавлювання сталеві загартованої кульки діаметром 1; 2; 2,5; 5 чи 10 мм навантаженнями 10...3000 кгс у плоску поверхню випробуваного тіла	Твердість (кгс/мм ²) обчислюється по діагоналі відбитка як навантаження, поділене на площу поверхні відбитка: $HB = P / \frac{\pi D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$
Монотрон Шора	Вдавлювання алмазної кульки діаметром 0,75 мм чи сталевих кульок діаметром 1/16" і 2,5 мм на стандартну глибину 0,045 мм	Мірою твердості служить навантаження (кгс), необхідне для вдавлювання на стандартну глибину
За методом Лудвіка	Вдавлювання сталевого конуса з кутом 90° у площину випробуваного тіла	Твердість обчислюється як навантаження, поділене на площу проекції
Прилади Роквелла, Суперфішіел–Роквелл	Вдавлювання алмазного конуса з кутом загострення 120° або сталевих кульок діаметром 1/2", 1/4", 1/8" або 1/16" стандартними навантаженнями 150, 100 чи 60 кгс (Роквелл) або 45, 30 і 15 кгс (Суперфішіел–Роквелл)	Мірою твердості служить різниця глибин проникнення наконечника при прикладанні основного і попереднього навантаження, виміряна в умовних поділках
Прилад Віккерса (Сміт і Сенленд)	Вдавлювання алмазної піраміди з квадратною основою і кутом при вершині між гра-нями 136° навантаженнями в 1...120 кгс.	Твердість обчислюється по діагоналі відбитка як навантаження, поділене на площу поверхні відбитка $HV = 1,8544P / d^2$, кгс/мм ²

Продовж. табл. 1

Назва приладу	Принцип дії і форма наконечника	Вимірюваний параметр, метод обчислення твердості та її умовна розмірність
За методом М.С. Дрозда	Вдавлювання кульки навантаженням P , вимірювання глибини відновленого відбитка h і критичного навантаження P_S , що відповідає переходу від пружного до залишкового відбитка	$H = (P - P_S) / \pi D h_{\text{від}}$, кгс/мм ²

Таблиця 2. Методи динамічного визначення твердості

Назва приладу й автор	Принцип дії і форма наконечника	Вимірюваний параметр, метод обчислення твердості та її умовна розмірність
За методом Мартеля	Удар сталевую пірамідою, закріплену на падаючому бойку	По енергії удару і діагоналі відбитка визначається твердість $H = E_1 / V$, кгс/мм ²
Вертикальний копер Ніколаєва	Удар бойка вагою 3 кгс, що падає з висоти 530 мм, на сталеву кульку Ø10 мм, притиснуту до виробу	По діаметру відбитка і тарувальних кривих визначається НВ, кгс/мм ²
Пружинний прилад Шоппера	Удар сталевую кулькою Ø10 мм за допомогою стиснутої пружини	По глибині відбитка визначається НВ, кгс/мм ²
Пружинний прилад Баумана	Удар бойком зі сталевую кулькою діаметром 5 або 10 мм за допомогою стиснутої пружини із запасом енергії 0,15 і 0,53 кгс·см	По діаметру динамічного відбитка і тарувальних кривих знаходиться НВ, кгс/мм ²
Прилад Польді	Удар молотком по бойку, під яким знаходиться еталон і випробуване тіло із затиснутою між ними загартованою сталевую кулькою Ø10 мм	По діаметрах відбитків на зразку й еталоні визначається твердість (кгс/мм ²): $HВ_{зр} = 2HВ_{ет} d_{ет}^2 / d_{зр}^2$
Маятниковий копер Вальцеля	Удар сталевую кулькою діаметром 5 або 10 мм, закріпленою на маятниковому копрі	Кут відскоку в умовних одиницях
Склероскоп Шора	Падіння бойка вагою 2,3 гс із конічним алмазним наконечником з висоти 254 мм	Число умовних одиниць висоти відскоку бойка
Маятник Герберта	Коливання маятника вагою 2 кгс, що спирається на поверхню випробуваного тіла сталевую чи рубіновою кулькою діаметром 1 мм	Час 10 однобічних хитань маятника за секунду чи амплітуда одного хитання в умовних одиницях

Продовж. табл. 2

Назва приладу й автор	Принцип дії і форма наконечника	Вимірюваний параметр, метод обчислення твердості та її умовна розмірність
Маятниковий склерометр Кузнєцова	Гойдання маятника вагою 1 кгс, що спирається двома сталевими наконечниками або кульками на випробу- ване тіло	Час згасання коливань до заданої амплітуди

Таблиця 3. Методи статичного визначення твердості вдавненням (мікротвердість)

Назва приладу, автор	Принцип дії і форма наконечника	Обчислення твердості та її умовна розмірність
За методом Ліпса	Втискання піраміди Віккерса 136° власною вагою індентора (35 г) і тиском повітря на поршень	Твердість ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) визначається як відношення навантаження (гс) до площі поверхні відбитка (по діагоналі, мкм) $HV = 1854,4P / d^2$, $\text{кгс}/\text{мм}^2$
Мікротвердомер Цейсса-Ганеманна	Втискання піраміди Віккерса навантаженням 2...100 гс, створюваним плоскими пружинами	Те ж
ПМТ-2, ПМТ-3 (Хрушов, Беркович)	Вдавнення піраміди Віккерса змінними навантаженнями 2...500 гс	Те ж
За методом Кнупа, Петерса, Емерсона	Вдавнення алмазного наконечника Кнупа (піраміда з основою у вигляді сильно витягнутого ромба з кутами між ребрами 130° і $172^\circ 30'$) з навантаженням 50...4000 гс	Твердість визначається як відношення навантаження (кг) до площі поверхні невідновленого "відбитка", обчислювальної по довгій діагоналі d (мм): $H_K = 12,87P / d^2$, $\text{гс}/\text{мм}^2$
За методом Берковича	Втискання алмазної тригранної піраміди з кутом між гранню і віссю 65°	$H = 2092P / a^2 =$ $= 1570P / l^2$, $\text{кгс}/\text{мм}^2$; P (гс); a і l (мкм)
За методом Єгорова та ін.	Втискання алмазного леза, утвореного двома циліндрами радіусом 2 мм, осі яких перетинаються під кутом 136°	$H = 3R \sin \alpha P / l^3 =$ $= 4167960 / l^3$, P (гс); l (мкм)
За методом Калей, Хрушова, Скворцова, Альохіна, Терновського, Шоршорова	Вдавнення алмазної 136° -градусної піраміди з реєстрацією навантаження і глибини занурення індентора в процесі випробування	$H = 18544P / d^2$, $\text{кгс}/\text{мм}^2$ P (гс); d (мкм)

Таблиця 4. Методи визначення твердості дряпанням

Прилад і автор	Принцип дії і форма наконечника	Вимірюваний параметр, обчислення твердості та її умовна розмірність
Випробування напилком, Барба	Дряпання випробуваного тіла сталевим напилком	Якщо тіло дряпається, воно м'якше напилка, якщо не дряпається, то твердіше чи має рівну твердість
Випробування за Моосом	Дряпання випробуваного тіла набором десяти сталоних мінералів (тальк, гіпс, кальцит, флюорит, апатит, ортоклаз, кварц, топаз, корунд, алмаз)	Якщо випробуване тіло дряпається мінералом, воно м'якше його, якщо саме тіло дряпає мінерал, то твердіше. Твердість виражається числом 10-бальної шкали.
Прилад Мартенса	Дряпання алмазним конусом з кутом загострення 90° при навантаженнях від 2 до 50 гс	Твердість виражається навантаженням (гс), що відповідає ширині подряпини 10 мкм
Мікрохарактеризатор Бірбаума	Дряпання кутом алмазного куба при навантаженні 3 гс	Твердість обчислюється за формулою $H = 10^4 / b^2,$ де b – ширина подряпини, мкм
Прилад Хенкінса	Дряпання V-подібним алмазом із зусиллям 1...150 гс	Твердість обчислюється за формулою $H = P / b^2, \text{ кгс/мм}^2$
Склерометр О'Нейлі	Дряпання півсферичним алмазом діаметром 1 мм	Твердість дорівнює тиску, що відповідає подряпині шириною 0,1 мм
ПМТ-3 (Григорович)	Дряпання алмазною чотиригранною пірамідою з кутом між гранями 136°	Твердість (кгс/мм ²) дорівнює середньому контактному тиску $H = P / b^2 / 4$
ПМТ-3 (Беркович)	Дряпання тригранною пірамідою	$H = 3708 P / b^2, \text{ кгс/мм}^2$ P (гс); b (мкм)

Додаток 2

Таблиця 1. Приблизне співвідношення між числами твердості за Брінеллем і Роквеллом

<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>
156	0	241	23	388	41
159	1	248	24	401	42
163	2	255	25	415	43
167	3	262	26	429	45
170	4	269	27	444	46
174	6	277	28	461	48
179	7	285	29	477	49
183	8	293	30	495	50
187	9	302	31	514	52
192	11	311	32	534	54
197	12	321	33	555	56
201	13	331	35	578	58
207	14	341	36	601	60
212	15	352	38	627	62
217	17	363	39	653	64
223	19	375	40	682	66
229	20			712	68
235	21			745	70
				780	72

Таблиця 2. Твердість гарячекатаної і кованої сталі вуглецевої якісної конструкційної діаметром або товщиною понад 5 мм, призначеної для холодної механічної обробки і холодного волочіння (підкат, група В) (ДСТУ 7809:2015)

Марка сталі	Діаметр відбитка, мм, не менше	<i>HB</i> , не більше	Діаметр відбитка, мм, не менше	<i>HB</i> , не більше
	без термічної обробки		після відпалу або високого відпускання	
08	5,2	131	—	—
10	5,0	143	—	—
15	4,9	149	—	—
20	4,7	163	—	—
25	4,6	170	—	—
30	4,5	179	—	—
35	4,2	207	—	—
40	4,1	217	4,4	187
45	4,0	229	4,3	197
50	3,9	241	4,2	207
55	3,8	255	4,1	217
58 (55 пп)	3,8	255	4,1	217
60	3,8	255	4,0	229
65	3,8	255	4,0	229
70	3,7	269	4,0	229
75	3,6	285	3,9	241
80	3,6	285	3,9	241
85	3,5	302	3,8	255
60Г	3,7	269	4,0	229
65Г	3,6	285	4,0	229
70Г	3,6	285	4,0	229

Таблиця 3. Твердість каліброваної відпаленої та нагартованої сталі вуглецевої якісної конструкційної діаметром або товщиною більше 5 мм (ДСТУ 7809:2015)

Марка сталі	Діаметр відбитка, мм, не менше	Число твердості <i>HB</i> , не більше	Діаметр відбитка, мм, не менше	Число твердості <i>HB</i> , не більше
	нагартована		після відпалу або високого відпускання	
08	4,5	179	5,2	131
10	4,4	187	5,0	143
15	4,3	197	4,9	149
20	4,2	207	4,7	163
25	4,1	217	4,6	170
30	4,0	229	4,5	179
35	4,0	229	4,4	187
40	3,9	241	4,3	197
45	3,9	241	4,2	207
50	3,8	255	4,1	217
55	3,7	269	4,0	229
60	3,7	269	4,0	229
65Г	—	—	4,0	229

Таблиця 4. Механічні властивості сталі вуглецевої якісної конструкторної другої категорії (ДСТУ 7809:2015)

Марка сталі	Термічна обробка заготовок	Границя плинності σ_T , кгс/мм ²	Тимчасовий опір розриву σ_B , кгс/мм ²	Відносне подовження δ_5 , %	Відносне звуження ψ , %	Ударна в'язкість, a_n , кгс·м/см ²
	не менше					
08	Нормалізація	20	33	33	60	—
10	Те ж	21	34	31	55	—
15	»	23	38	27	55	—
20	»	25	42	25	55	—
25	»	28	46	23	50	9
30	»	30	50	21	50	8
35	»	32	54	20	45	7
40	»	34	58	19	45	6
45	»	36	61	16	40	5
50	»	38	64	14	40	4
55	»	39	66	13	35	—
60	»	41	69	12	35	—
65	»	42	71	10	30	—
70	»	43	73	9	30	—
75	Гартування + відпускання	90	110	7	30	—
80	Те ж	95	110	6	30	—
85	»	100	115	6	30	—
60Г	Нормалізація	42	71	11	35	—
65Г	Те ж	44	75	9	—	—
70Г	»	46	80	8	—	—

110
Таблиця 5. Механічні властивості сталі низьколегованої конструкційної
(ДСТУ 7809:2015; ГОСТ 19281-89)

	21–32	48	30	21	6	3	2,5	–
	33–60	47	29	21	6	3	2,5	–
	Св. 60 до 160	46	28	21	6	3	2,5	–
17ГС	4–10	52	35	21	–	4,5	–	–
	11–20	50	34	23	–	3,5	–	180°, $c = 2a$
09Г2С	4–10	50	35	23	–	4,0	3,5	180°, $c = 2a$
	11–20	48	33	21	6	3,5	3,0	–
	21–32	47	31	21	6	3,5	3,0	–
	33–60	46	29	21	6	3,5	3,0	–
	61–80	45	28	21	6	3,5	3,0	–
	Св. 80 до 160	44	27	21	6	3,5	3,0	–
10Г2С1	4–10	52	38	21	–	4,0	3	180°, $c = 2a$
	11–20	51	36	21	6	3	2,5	–
	21–32	50	35	21	6	3	2,5	–
	33–60	48	34	21	6	3	2,5	–
	Св. 60 до 160	46	32	21	6	3	2,5	–
15ГФ	4–10	52	38	21	–	4	–	180°, $c = 2a$
	11–20	52	36	21	–	3	–	–
	21–32	48	34	21	–	3	–	–
14ХГС	4–10	50	35	22	–	4	–	180°, $c = 2a$
15ХСНД	4–32	50	35	21	–	3	3	180°, $c = 2a$

12 Продовж. табл. 5

Марка сталі	Товщина прокату, мм	Механічні властивості					Випробування на вигин в холодному стані (с – товщина оправлення, а – товщина прокату, d – діаметр стержня)
		при розтягненні		ударна в'язкість, a_n , кгс·м/см ²		при темпе-ратурі, °С	
		Тімчасовий опір розриву σ_B , кгс/мм ²	Границя текучості σ_T , кгс/мм ²	Відносне подовження δ_5 , %			
					+20	–40	–70
не менше							
А. Сталь для металевих конструкцій							
10ХСНД	4–10	54	40	19	–	5	–
	11–15	54	40	19	–	4	3
	16–32	54	40	19	–	5	3
	33–40	52	40	19	–	5	3
Б. Сталь для армування залізобетонних конструкцій							
35ГС	6–40	60	40	14	–	–	90°, c = 3d
18Г2С	6–9	60	40	14	–	–	90°, c = 3d
	40–90	50	30	14	–	–	–
25Г2С	6–40	60	40	14	–	–	90°, c = 3d
20ХГ2Ц	13–32	90	60	6	–	–	45°, c = 5d
80С	10–18	90	60	6	–	–	45°, c = 5d

Таблиця 6. Механічні властивості сталі низьколегованої товстолистової та широко-
смугової універсальної (ДСТУ 7809:2015; ГОСТ 19282–73)

Марка сталі	Товщина прокату, мм	Тимчасовий опір розриву σ_b , кгс/мм ²	Границя текучості σ_T , кгс/мм ²	Відносне подовження δ_5 , %	Ударна в'язкість a_{κ} , кгс·м/см ² , при температурі, °С		
					+20	–40	–70
					не менше		
09Г2, 09Г2Д	4	45	31	21	–	–	–
	5–9	45	31	21	–	3,5	–
	10–20	45	31	21	–	3	–
	21–32	45	30	21	–	4	–
14Г2	4	47	34	21	–	–	–
	5–9	47	34	21	–	3,5	–
12ГС	10–20	46	33	21	–	3	–
	21–32	46	33	21	–	3	–
	4	47	32	26	–	–	–
	5–9	47	32	26	–	–	–
16ГС	10	47	32	26	–	–	–
	4	50	33	21	–	–	–
	5–9	50	33	21	6	4	3
	10–20	49	32	21	6	3	2,5
	21–32	48	30	21	6	3	2,5
	33–60	47	29	21	6	3	2,5
	Св. 60 до 160	46	28	21	6	3	2,5

Продовж. табл. 6

Марка сталі	Товщина прокату, мм	Тимчасовий опір розриву σ_b , кгс/мм ²	Границя текучості σ_T , кгс/мм ²	Відносне подовження δ_5 , %	Ударна в'язкість a_n , кгс·м/см ² , при температурі, °С		
					+20	-40	-70
17ГС	4	52	35	23	—	—	—
	5-9	52	35	23	—	4,5	—
	10-20	50	34	23	—	3,5	—
17Г1С	4	52	36	23	—	—	—
	5-9	52	36	23	—	—	—
	10-20	52	35	23	—	—	—
09Г2С,	4	50	35	21	—	—	—
09Г2СД	5-9	50	35	21	6,5	4	3,5
	10-20	48	33	21	6	3,5	3
	21-32	47	31	21	6	3,5	3
	33-60	46	29	21	6	3,5	3
	61-80	45	28	21	6	3,5	3
	Св. 80 до 160	44	27	21	6	3,5	3
10Г2С1,	4	50	36	21	—	—	—
10Г2С1Д	5-9	50	35	21	6,5	4	3
	10-20	49	34	21	6	3	2,5
	21-32	48	33	21	6	3	2,5
	33-60	46	33	21	6	3	2,5

	61–80	44	30	21	6	3	2,5
	80–100	44	30	21	6	3	2,5
15ГФ,	4	52	38	21	–	–	–
15ГФД	5–9	52	38	21	–	4	–
	10–20	52	36	21	–	3	–
	21–32	48	34	21	–	3	–
15Г2СФ,	5–9	56	40	18	–	4	–
15Г2СФД	10–20	56	40	18	–	3,5	–
	21–32	56	40	18	–	3,5	–
14Г2АФ,	4	55	40	20	–	–	–
14Г2АФД	5–9	55	40	20	–	4,5	3,5
	10–32	55	40	20	–	4	3
	33–50	55	40	20	–	4	3
16Г2АФ,	4	60	45	20	–	–	–
16Г2АФД	5–9	60	45	20	–	4,5	3,5
	10–32	60	45	20	–	4	3
	33–50	58	42	20	–	4	3
18Г2АФпс	4	60	45	19	–	–	–
18Г2АФДпс	5–9	60	45	19	–	4,5	3,5
	10–20	60	45	19	–	4	3
	21–32	60	45	19	–	4	3
10Г2Б	4	52	38	21	–	–	–
10Г2БД	5–9	52	38	21	–	4	–
	10	52	38	21	–	3	–

Марка сталі	Товщина прокату, мм	Тимчасовий опір розриву σ_b , кгс/мм ²	Границя текучості σ_t , кгс/мм ²	Відносне подовження δ_5 , %	Ударна в'язкість a_n , кгс·м/см ² , при температурі, °С		
					+20	-40	-70
					НЕ МЕНШЕ		
14ХГС	4	50	35	22	—	—	—
	5-9	50	35	22	—	4	—
	10	50	35	22	—	3,5	—
10ХСНД	4	54	40	19	—	—	—
	5-9	54	40	19	—	5	3,5
	10-15	54	40	19	—	4	3
	16-32	54	40	19	—	5	3
	33-40	52	40	19	—	5	3
	4	50	35	21	—	—	—
15ХНДП	5-9	50	35	21	—	4	3
	10-20	50	35	21	—	3	3
	21-32	50	35	21	—	3	3
15Г2АФДпс	4	55	40	19	—	—	—
	5-9	55	40	19	—	4,5	3,5
	10-20	55	40	19	—	4	3
	21-32	55	40	19	—	4	3
	4	48	35	20	—	—	—
	5-9	48	35	20	—	4	—

Таблиця 7. Твердість за Брінеллем (НВ) відпаленої або високовідпущеної сталі легованої конструкційної діаметром або товщиною понад 5 мм (ДСТУ 7809:2015; ДСТУ 7806:2015)

Група сталі	Марка сталі	Діаметр відбитка, мм, не менше	Число твердості не більше
Хромиста	15X	4,5	179
	15XA	4,5	179
	20X	4,5	179
	30X	4,4	187
	30XPA	3,9	241
	35X	4,3	197
	38XA	4,2	207
	40X	4,1	217
	45X	4,0	229
	50X	4,0	229
Марганцевиста	15Г	4,7	163
	20Г	4,5	179
	25Г	4,3	197
	30Г	4,3	197
	35Г	4,2	207
	40Г	4,2	207
	45Г	4,0	229
	50Г	4,0	229
	10Г2	4,3	197
	30Г2	4,2	207
	35Г2	4,2	207
	40Г2	4,1	217
	45Г2	4,0	229
	50Г2	4,0	229
Хромомарганцева	18ХГ	4,4	187
	18ХГТ	4,1	217
	20ХГР	4,3	197
	27ХГР	4,1	217
	25ХГТ	4,1	217
	30ХГТ	4,0	229
	40ХГТР	4,0	229
	35ХГФ	4,2	207

Продовж. табл. 7

Група сталі	Марка сталі	Діаметр відбитка, мм, не менше	Число твердості не більше
Хромокремнієва	33ХС	3,9	241
	38ХС	3,8	255
	40ХС	3,8	255
Хромомолібденова і хромомолібде- нованадієва	15ХМ	4,5	179
	20ХМ	4,5	179
	30ХМ	4,0	229
	30ХМА	4,0	229
	35ХМ	3,9	241
	38ХМ	3,9	241
	30Х3МФ 40ХМФА	4,0 3,7	229 269
Хромованадієва	15ХФ	4,4	187
	40ХФА	3,9	241
Нікельмолібденова	15Н2М (15НМ)	4,3	197
Хромонікелева і хромонікелева з бором	20ХН	4,3	197
	40ХН	4,0	229
	45ХН	4,2	207
	50ХН	4,2	207
	12ХН2	4,2	207
	12ХН3А	4,1	217
	20ХН3А	3,8	255
	12Х2Н4А	3,7	269
	20Х2Н4А	3,7	269
	30ХН3А	3,9	241
Хромокремніє- марганцева і хромокремніє- марганцево- нікелева	20ХГСА	4,2	207
	25ХГСА	4,1	217
	30ХГС	4,0	229
	30ХГСА	4,0	229
	30ХГСН2А (30ХГСНА)	3,8	255
	35ХГСА	3,9	241
Хромомарганцево нікелева і хромо- марганцево-нікеле- ва з титаном і бором	15ХГН2ТА (15ХГНТА)	3,7	269
	20ХГНР	4,3	197
	30ХГН	4,0	229

Продовж. табл. 7

Група сталі	Марка сталі	Діаметр відбитка, мм, не менше	Число твердості не більше
Хромонікель- молібденова	14X2H3MA	3,7	269
	20XH2M (20XHM)	4,0	229
	30XH2MA (30XHMA)	3,9	241
	38X2H2MA (38XHMA)	3,7	269
	40XH2MA (40XHMA)	3,7	269
	40X2H2MA (40X1HBA)	3,8	255
	38XH3MA	3,7	269
	18X2H4MA (18X2H4BA)	3,7	269
	25X2H4MA (25X2H4BA)	3,7	269
Хромонікель- молібденова- надієва і хромо- нікельванадієва	30XH2MФА	3,7	269
	36X2H2MФА (36XH1MФА)	3,7	269
	38XH3MФА		
	45XH2MФА (45XHMФА)	3,7	269
		3,7	269
	20XH4ФА	3,7	269
Хромоалюмінієва і хромоалюмінієва з молібденом	38X2Ю (38XЮ)	4,0	229
	38X2MЮА (38XMЮА)	4,0	229

120 **Таблиця 8. Механічні властивості сталі легованої конструкційної при нормальній температурі, що визначаються на поздовжніх термічно оброблених зразках або зразках, виготовлених з термічно оброблених заготовок (ДСТУ 7806:2015)**

Марки сталі	Термообробка				Границя текучості σ_T , кгс/мм ²	Тимчасовий опір σ_T , кгс/мм ²	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Ударна в'язкість a_K , кгс·м/см ²	Розміри перерізу заготовок для термообробки (діаметр кола / сторони квадрата), мм	
	Гартування		Відпускання								
	першого гартування / нормалізації	другого гартування	середовище охолодження								
			температура, °С								
середовище охолодження											
15Х, 15ХА	880	770–820	В/М	180	П/М	50	70	12	45	7	15
20Х	880	770–820	В/М	180	П/М	65	80	11	40	6	15
30Х	860	–	М	500	В/М	70	90	12	45	7	25
30ХРА	900 П	860	М	200	П	130	160	9	40	5	–
35Х	860	–	М	500	В/М	75	93	11	45	7	25
38ХА	860	–	М	550	В/М	80	95	12	50	9	25
40Х	860	–	М	500	В/М	80	100	10	45	6	25
45Х	840	–	М	520	В/М	85	105	9	45	5	25
50Х	830	–	М	520	В/М	90	110	9	40	4	25

Група сталі: марганцевиста											
15Г	880	–	П	–	–	25	42	26	55	–	25
20Г	880	–	П	–	–	28	46	24	50	–	25
25Г	880	–	В/П	560	П	30	50	22	50	9	25
30Г	860	–	В/П	600	П	32	55	20	45	8	25
35Г	860	–	В/П	600	П	34	57	18	45	7	25
40Г	860	–	В/П	600	П	36	60	17	40	6	25
45Г	850	–	М/П	600	П	38	63	15	45	5	25
50Г	850	–	М/П	600	П	40	66	13	40	4	25
10Г2	920	–	П	–	–	25	43	22	50	–	25
30Г2	880	–	М/П	600	П	35	60	15	45	–	25
35Г2	870	–	М/П	650	П	37	63	13	40	–	25
40Г2	860	–	М/П	650	П	39	67	12	40	–	25
45Г2	850	–	М/П	650	П	41	70	11	40	–	25
50Г2	840	–	М/П	650	П	43	75	11	35	–	25
Група сталі: хромомарганцевиста											
18ХГ	880	–	М	200	П/М	75	90	10	40	–	15
18ХГТ	880–950 П	870	М	200	П/В	90	100	9	50	8	–
20ХГР	880	–	М	200	П/М	80	100	9	50	8	15
27ХГР	870	–	М	200	П	120	140	8	45	6	15
25ХГТ	880–950 П	850	М	200	В/М	100 110	130 150	9 10	45 50	6 7	–
30ХГТ	880–950 П	850	М	200	В/М	130	150	9	40	6	–
40ХГР	840	–	М	550	В/М	80	100	11	45	8	25
35ХГФ	870	–	М	630	В/М	80	93	14	55	8	25
25ХГМ	860	–	М	200	П	110	120	10	45	8	–

Марки сталі	Термообробка				середовище охолодження	температура, °С	середовище охолодження	Границя текучості σ_T , кгс/мм ²	Тимчасовий спротив σ_p , кгс/мм ²	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Ударна в'язкість a_K , кгс·м/см ²	Розміри перерізу заготовок для термообробки (діаметр кола / сторони квадрата), мм
	Гартування		Відпускання										
	першого гартування / нормалізації	другого гартування											
				температура, °С									
Група сталі: хромокремніста													
33ХС	920	—	В/М	630	В/М	70	90	13	50	8	25		
38ХС	900	—	М	630	М	75	95	12	50	7	25		
40ХС	900	—	М	540	М	110	125	12	40	3,5	25		
Ізотермічне гартування при 900–910 °С, в селітрі при 330–350 °С, після – повітряне охолодження													
						110	125	12	40	5	25		
Група сталі: хромоолібденова і хромоолібденованадіста													
15ХМ	880	—	П	650	П	28	45	21	55	12	30		
20ХМ	880	—	В/М	500	П	60	80	12	50	9	15		
30ХМ	880	—	М	540	В/М	75	95	11	45	8	15		
30ХМА	880	—	М	540	В/М	75	95	12	50	9	15		
35ХМ	850	—	М	560	В/М	85	95	12	45	8	25		
38ХМ	850	—	М	580	П	90	100	11	45	7	25		
30Х3МФ	870	—	М	620	В/М	85	100	12	55	10	25		
40ХМФА	860	—	М	580	М	95	105	13	50	9	25		

Група сталі: хромованадієва										
15ХФ	880	760-810	В/М	180	П/М	55	75	13	50	8
40ХФА	880	–	М	650	В/М	75	90	10	50	9
Група сталі: нікельмолібденова										
15Н2М (15НМ)	860	770-820	М	180	П	65	85	11	50	8
20Н2М (20НМ)	860	–	М	180	П	70	90	10	50	8
Група сталі: хромонікелева і хромонікелева з бором										
20ХН	860	760-810	В/М	180	В/М	60	80	14	50	8
40ХН	820	–	В/М	500	В/М	80	100	11	45	7
45ХН	820	–	В/М	530	В/М	85	105	10	45	7
50ХН	820	–	В/М	530	В/М	90	110	9	40	5
20ХНР	930-950 П	780-830	М	200	П/М	100	120	10	50	9
12ХН2	860	760-810	В/М	180	П/М	60	80	12	50	9
12ХН3А	860	760-810	В/М	180	П/М	70	95	11	55	9
20ХН3А	820	–	М	500	В/М	75	95	12	55	11
12Х2Н4А	860	760-800	М	180	П/М	95	115	10	50	9
20Х2Н4А	860	780	М	180	П/М	110	130	9	45	8
30ХН3А	820	–	М	530	В/М	80	100	10	50	8
Група сталі: хромокремніємарганцева і хромокремніємарганцевонікелева										
20ХГСА	880	–	М	500	В/М	65	80	12	45	7
25ХГСА	880	–	М	480	В/М	85	110	10	40	6
30ХГС	880	–	М	540	В/М	85	110	10	45	4,5
30ХГСА	880	–	М	540	В/М	85	110	10	45	5

Марки сталі	Термообробка					
	Гартування		Відпускання			
	першого гартування / нормалізації	другого гартування	середовище охолодження	температура, °C	середовище охолодження	
35ХГСА	950 М 700 П	890	М	230	П/М	Ізотермічне гартування при 880 °С в суміші калійової та натрієвої селітри, що має температуру 280–310 °С. Повітряне охолодження
	900	—	М	260	П/М	
	30ХГСН2А (30ХГСНА)					
Група сталі: хромокремніємарганцева і хромокорманганцевонікелева з титаном і бором						
15ГН2ТА (15ХГНТА)	960 П	840	М	180	П/М	
20ХГНР	930–950	780–830	М	200	П/М	
20ХГНТР	—	850	М	200	М	
38ХГН	850	—	М	570	В/М	

Група сталі: хромопільмолібденова											
14X2H3MA	880	770	М	180	П	90	100	10	45	8	15
20XH2M (20XHM)	860	780	М	200	В/М	70	90	11	50	8	15
30XH2MA (30XHMA)	860	–	М	530	П	80	100	10	45	8	15
38X2H2MA (38XHMA)	870	–	М	580	П/М	95	110	12	50	8	25
40XH2MA (40XHMA)	850	–	М	620	В/М	95 85	110 100	12 12	50 55	8 10	25 25
40X2H2MA (40X1HBA)	870	–	М	600	В/М	95	110	10	45	8	25
38XH3MA	850	–	М	590	П	100	110	12	50	8	25
18X2H4MA (18X2H4BA)	950 П	860 860	П М	200 550	П/М	85 80	115 105	12 12	50 50	10 12	15 15
25X2H4MA (25X2H4BA)	850	–	М	560	М	95	110	11	45	9	25
Група сталі: хромопільмолібденованаїсєва і хромопільванаїсєва											
30XH2MΦA	860	–	М	680	П	80	90	10	40	9	25
36X2H2MΦA (36XH1MΦA)	850	–	М	600	П	110	120	12	50	8	25
38XH3MΦA	850	–	М	600	П	110	120	12	50	8	25
45XH2MΦA (45XH1MΦA)	860	–	М	460	М	130	145	7	35	4	–
20XH4ΦA	850	–	М	630	В	70	90	12	50	10	25
Група сталі: хромоалюмінієва і хромоалюмінієва з молібденом											
38X2Ю (38XЮ)	930	–	В/М	630	В/М	75	90	10	45	8	30
38X2MЮA (38XMЮA)	940	–	В/М	640	В/М	85	100	14	50	9	30

Примітка: В – вода, М – масло, П – повітря

ЗМІСТ

Лабораторна робота № 1. Методи оцінки та вимірювання шорсткості поверхонь вузлів тертя і фрикційних з'єднань	3
Лабораторна робота № 2. Виявлення залишкових напружень поверхневого шару вузлів тертя та фрикційних з'єднань	20
Лабораторна робота № 3. Методи оцінки та вимірювання зносу поверхонь вузлів тертя	29
Лабораторна робота № 4. Прогнозування шорсткості робочих поверхонь вузлів тертя та фрикційних з'єднань	48
Лабораторна робота № 5. Методи оцінки глибини та ступеня зміцнення поверхневого шару вузлів тертя і фрикційних з'єднань ...	56
Лабораторна робота № 6. Схеми, технологічне оснащення і параметри зміцнення поверхневого шару вузлів тертя та фрикційних з'єднань обкочуванням роликami	72
Додаток 1	100
Додаток 2	106

Навчальне видання

БОДУ Світлана Жаківна
ТРОФИМОВА Олена Валеріївна

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
з дисципліни
"Основи триботехнології"

Редактор *С. А. Яременко*
Комп'ютерне складання та верстання *В. В. Москаленко*
Коректор *М. О. Паненко*

Формат 60×84^{1/16}. Ум. друк. арк. 7,4. Тираж 100 прим. Зам. № 12/19.

Видавець та виготовлювач Торубара В.В.
вул. Наваринська, 5-17, м. Миколаїв, 54001, тел.: (067) 800-70-70

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4626 від 9.10.2013

ДЛЯ ЗАДАТОК