

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Механічний факультет

Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

## Дипломна робота

бакалавра

### Методи та засоби вимірювання при дослідженнях особливостей поверхонь деталей машин

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф.

О. В. Полярус

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доц.

О. С. Букреєва

Керівник, канд. техн. наук, доц.

Н. В. Діденко

Студент гр. ММ-41-16

Д. К. Масляник

Харків – 2020

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет механічний  
Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності  
Освітній рівень бакалавр  
Спеціальність: 6.051001 «Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**  
**Метрології та БЖД**  
**\_\_\_\_\_ О. В. Полярус**  
**«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р**

**З А В Д А Н Н Я  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

**Маслянику Дмитру Костянтиновичу**

1. Тема роботи "Методи та засоби вимірювання при дослідженнях особливостей поверхонь деталей машин".  
Керівник роботи Діденко Наталя Вікторівна, канд. техн. наук, доц.  
Затверджені рішенням Вченої ради механічного факультету "\_\_\_" лютого 2020 року, протокол № \_\_.
2. Строк подання студентом роботи 30.05.2020 р.
3. Вхідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики.
4. Перелік питань, які потрібно розробити: 1. Аналіз основних показників якості поверхні деталей машин. 2. Аналіз методів та засобів вимірювання при дослідженнях особливостей поверхні. 3. Експериментальне дослідження поверхні шатунних болтів.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):  
Ілюстративний матеріал до дипломної роботи: 16 слайдів

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 03 лютого 2020 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури	3-10 лютого 2020 р	
2	Аналіз якості поверхні деталей машин	10-28 лютого 2020 р.	
3.	Аналіз методів та засобів вимірювання при дослідженнях якості поверхні	2-13 березня 2020 р.	
4	Аналіз надійності деталей машин	16-31 березня 2020 р.	
5	Аналіз впливу властивостей поверхні на експлуатаційні характеристики деталей машин	1-6 квітня 2020 р.	
6	Отримання результатів вимірювання шорсткості і профілю поверхні досліджуваних зразків	6-13 квітня 2020 р.	
7	Отримання результатів вимірювання макрогеометрії та мікротвердості зразків	13-24 квітня 2020 р.	
8	Формулювання висновків	27-30 квітня 2020 р.	
9	Оформлення пояснювальної записки	4-25 травня 2020 р.	
10	Підготовка презентації	25-27 травня 2020 р.	

Студент

\_\_\_\_\_ Масляник Д. К.

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ Діденко Н. В.

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 111 с., 41 рис., 6 табл., 25 джерел, 1 додаток.

Об'єкт дослідження – конструкційні сталі після різної механічної обробки поверхні.

Мета роботи – проаналізувати існуючі методи та засоби вимірювання при дослідженнях особливостей поверхні.

Методи дослідження – експериментальний, аналітичний, розрахунковий.

В дипломній роботі бакалавра досліджені деякі експлуатаційні властивості деталей машин і їх залежність від стану поверхневого шару. Проаналізовані методи вимірювання показників якості поверхні та засоби сучасної вимірювальної техніки. Проведені дослідження якості поверхні партії шатунних болтів.

**ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ, НАДІЙНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ  
МАШИН, ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ**

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	7
Вступ.....	8
1 Аналіз якості поверхні деталей машин .....	9
1.1 Характеристики якості поверхні. ....	9
1.2 Аналіз фізико-механічних властивостей поверхні.....	10
1.3 Аналіз фізико-хімічних властивостей поверхні.....	16
1.4 Макрогеометрія поверхонь деталей машин .....	19
1.5 Хвилястість поверхні.....	23
1.6 Шорсткість як геометричний стан поверхні .....	24
1.7 Висновки за розділом.....	29
2 Аналіз методів та засобів вимірювання при дослідженнях якості поверхні.....	31
2.1 Універсальні засоби вимірювальної техніки.....	31
2.2 Спеціальні засоби контролю та вимірювання розмірів і якості поверхонь виробів.....	44
2.3 Контроль хімічного складу.....	48
2.4 Контроль механічних властивостей виробу.....	49
2.5 Висновки за розділом.....	58
3 Аналіз надійності деталей машин.....	59
3.1 Поняття надійності.....	59
3.2 Аналіз експлуатаційних властивостей деталей машин.....	62
3.3 Висновки за розділом.....	66
4 Аналіз впливу властивостей поверхні на експлуатаційні характеристики деталей машин.....	67
4.1 Аналіз впливу фізико-механічних властивостей поверхні.....	67
4.2 Аналіз впливу фізико-хімічних властивостей поверхні.....	73
4.3. Аналіз впливу геометричних характеристик поверхні.....	73
4.4 Дослідження якості поверхонь деталей машин.....	84

4.5 Висновки за розділом.....	90
Висновки.....	91
Перелік посилань.....	93
Додаток А Ілюстративний матеріал до дипломної роботи .....	95

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЗВТ – засіб вимірювальної техніки

ПК – персональний комп'ютер

## ВСТУП

Найважливішою проблемою сучасного машинобудування є недостатня надійність деталей машин продукції, що виготовляється, її надійності і довговічності. Сучасні автомобілі складаються з великої кількості взаємодіючих елементів і систем. Відмова в роботі хоча б одного відповідального елемента складної системи може привести до порушення роботи всієї системи і автомобіля в цілому, а також до величезних витрат на ремонт, простої, інколи до аварій, пов'язаних з людськими жертвами. Вирішення цієї проблеми забезпечується управлінням якістю деталей машин.

Якість деталі в значній мірі визначається властивостями поверхневого шару матеріалу, з якого вона виготовлена. Це пов'язано з тим, що при будь-яких видах навантаження (кручення, згинання та ін.) найбільшого напруження зазнають поверхневі шари матеріалу деталей машин. Поверхневі шари також протистоять зносу, корозії, тепловому і іншим видам дій при експлуатації.

Надійність виробу характеризується властивостями, які виявляються в процесі експлуатації і дозволяють зробити висновок відносно того, наскільки виріб задовольняє покладеним на нього вимогам.

Оскільки процес експлуатації машин — один з основних процесів, розглянемо питання якості поверхонь деталей машин в аспекті забезпечення їх експлуатаційних властивостей.



# 1 АНАЛІЗ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

## 1.1 Характеристики якості поверхні

У техніці під поверхнею деталі розуміють зовнішній шар, який по будові і властивостям відрізняється від внутрішньої частини. Комплекс властивостей, що набуває поверхня деталі в результаті її виготовлення, характеризується узагальненим поняттям «якість поверхні» [1].

Якість поверхні визначається фізико-механічними, фізико-хімічними властивостями, а також геометрією поверхні.

До **фізико-механічних** властивостей поверхні відносять: мікротвердість; міцність, величину, знак і глибину залишкових напружень; величина деформації кристалічної ґратки.

**Фізико-хімічні** властивості поверхні характеризуються корозійною стійкістю, наявністю на металевій поверхні різних плівок, міцно пов'язаних з основним металом.

**Геометричні характеристики** — це параметри відхилення поверхні від ідеальної, заданої. Геометрична характеристика поверхні визначається наявністю макронерівностей, хвилястості, шорсткості, субмікронерівностей. Критерієм для їх розмежування служить відношення кроку  $L$  до висоти нерівностей  $h$  (рис. 1.1). Таким чином, для макронерівностей:  $L/h > 1000$ , для хвилястості:  $L/h > 50$ , для шорсткості:  $L/h < 50$ .

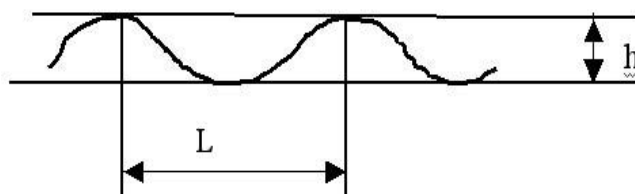


Рисунок 1.1 — Загальна схема геометричних характеристик якості поверхні

## 1.2 Аналіз фізико-механічних властивостей поверхні

Фізичний стан поверхні визначається властивостями матеріалу, технологією виробництва виробу і умовами здійснення процесу обробки.

Спочатку носієм фізико-механічних властивостей є матеріал, з якого виготовляється деталь, а це можуть бути конструкційні матеріали, матеріали з особливими фізичними властивостями, інструментальні. Всі вони володіють певним набором характеристик, таких як: твердість, пластичність, міцність, ударна в'язкість, пружність, щільність, температура плавлення, теплопровідність, електропровідність, магнітні властивості і ін [2].

**Твердість** — властивість матеріалу чинити опір проникненню в нього іншого, твердішого тіла, а також властивість твердішого тіла проникати в інші матеріали. Твердість є складною властивістю, залежною від міцності і пластичності матеріалу.

**Пластичність** — здатність матеріалу пластично деформуватися, тобто змінювати форму і розміри без руйнування під впливом зовнішніх навантажень і зберігати її після зняття навантажень.

**Міцність** — властивість матеріалу чинити опір руйнуванню під дією внутрішнього напруження, що виникає від зовнішніх сил. Властивість конструкції виконувати призначення не руйнуючись на протязі заданого часу. Границя міцності — механічне напруження  $\sigma_b$ , вище за яке відбувається руйнування матеріалу. Оскільки при оцінці міцності час навантаження зразків часто не перевищує декількох секунд від початку навантаження до моменту руйнування, то його також називають умовно-миттєвою або крихко-короткочасною границею міцності. Серед основних показників статичної міцності, також виділяють, умовну границю текучості та дійсну напругу руйнування і ін.

**Ударна в'язкість** — здатність матеріалу чинити опір динамічним навантаженням. Визначення ударної в'язкості особливо важливе для деяких металів, що працюють при мінусових температурах і проявляють схильність до

холодноламкості. Чим нижче поріг холодноламкості, тобто температура, при якій в'язке руйнування матеріалу переходить в крихке, і більший запас в'язкості матеріалу, тим більша ударна в'язкість матеріалу. Холодноламкість — зниження ударної в'язкості при низьких температурах.

**Пружність** — властивість матеріалу відновлювати свою первинну форму і розміри після припинення дії зовнішньої сили, що викликає його деформацію. Пружність оцінюють границею пропорційності і границею пружності. Границя пропорційності — напруження  $\sigma_{\text{пц}}$  (МПа), вище за яке порушується пропорційність між напругою, що додається, і деформацією зразка. Границя пружності  $\sigma_{0,05}$  — це умовне напруження  $\sigma_{\text{уп}}$  (МПа), відповідне навантаженню, при якому залишкова деформація вперше досягає 0,05 % від розрахункової довжини зразка. Модуль пружності є коефіцієнтом пропорційності між напругою і деформаціями. Однобічному нормальному напруженню  $s$ , що виникає при простому розтягуванні (стискуванні), відповідає модуль подовжньої пружності  $E$  (модуль Юнга). Він дорівнює відношенню нормальної напруги  $s$  до відносного подовження  $l$ , викликаного цим напруженням у напрямі його дії, і характеризує здатність матеріалу чинити опір розтягуванню. Модуль пружності не є строго постійною величиною для одного і того ж матеріалу, його значення міняються залежно від хімічного складу матеріалу, від його попередньої обробки. Значення модуля пружності також залежить від температури матеріалу [3].

**Температурою плавлення** називають температуру, при якій метал переходить з твердого стану в рідкий. По температурі плавлення розрізняють тугоплавкі метали (вольфрам 3416°C, тантал 2950°C, титан 1725°C і ін.) і легкоплавкі (олово 232°C, свинець 327°C, цинк 419,5°C, алюміній 660°C). Температура плавлення має велике значення при виборі металів для виготовлення литих виробів, зварних і паяних з'єднань і інших виробів.

**Теплопровідність** — здатність металів передавати тепло від більш нагрітих до менш нагрітих ділянок тіла. Теплопровідність має велике значення при виборі матеріалу для деталей. Наприклад, якщо метал погано проводить

тепло, то при нагріві і швидкому охолодженню (термічна обробка, зварка) в ньому утворюються тріщини. Деякі деталі машин (поршні двигунів, лопатки турбін) мають бути виготовлені з матеріалів з високою теплопровідністю.

**Здатність металів проводити електричний струм** оцінюють двома взаємно протилежними характеристиками — електропровідністю і електроопом. З підвищенням температури металу його електропровідність зменшується, а зі зниженням — збільшується.

**Магнітні властивості** характеризуються абсолютною магнітною проникністю або магнітною постійною, тобто здатністю металів намагнічуватися. У одиницях СІ магнітна постійна має розмірність Гн/м. Високими магнітними властивостями володіють залізо, нікель, кобальт і їх сплави, названі феромагнітними.

Велике значення також має спосіб здобуття заготовки. Класифікація способів за фізико-механічним станом матеріалу (гаряча і холодна обробка тиском); за формою енергії, що витрачається при проведенні технологічного процесу (термічний, термомеханічний і механічний класи зварки); за видом матеріалу інструменту і оснащення (лиття в піщані, керамічні і металеві форми; штампування еластичним пуансоном, в жорстких штампах), за характером нагріву заготовок (місцевий і загальний нагрів, паяння в печі, соляній ванні, паяльником, електронним або світловим променем, індукційне).

Основні методи отримання заготовок: лиття, пластична деформація, спікання.

В результаті подальшої термічної, або хіміко-термічної обробки заготовки набувають необхідних фізико-механічних властивостей матеріалу.

**Термічною обробкою** називають технологічні процеси, що складаються з нагріву і охолодження металевих виробів з метою зміни їх структури і властивостей [4].

Термічній обробці піддають злитки, відливки, напівфабрикати, зварні з'єднання, деталі машин, інструменти.

Основні види термічної обробки — відпал, гартування, відпуск і старіння. Кожен з вказаних видів має декілька різновидів.

**Хіміко-термічною обробкою** називають технологічні процеси, що приводять до дифузійного насичення поверхневого шару деталей різними елементами (металами і неметалами). Хіміко-термічну обробку застосовують для підвищення твердості, зносостійкості, опору втомі і контактній втомі, а також для захисту від електрохімічної і газової корозії.

Більшість деталей машин піддаються механічній обробці для додання необхідних розмірів, форми і якості поверхні.

Процес обробки металів і сплавів — складний фізичний процес, що супроводжується рядом взаємодіючих явищ, до яких відносяться: пружна і пластична деформація, підвищення твердості (наклеп) і зміна структури поверхневого шару матеріалу заготовки.

Зміна фізико-механічних властивостей поверхні.

**Зміцнення (наклеп) в поверхневому шарі.** При обробці під дією сил, прикладених до металу поверхневого шару, виникає пластична деформація, що супроводжується подрібненням і витягуванням кристалічних зерен у напрямі деформації (утворення текстури), викривленням площин ковзання і появою на них уламків кристалічних зерен, виникненням міжкристалічного напруження, деформацією кристалічної решітки. При цьому збільшується питомий об'єм; підвищується міцність, твердість і крихкість матеріалу; зменшується пластичність і в'язкість; змінюються магнітні та інші характеристики [1].

Зміцнення (наклеп) в поверхневому шарі при обробці деталі характеризується його мікротвердістю і рентгенографічними показниками (розширенням або розмиттям інтерференційних ліній), що свідчать про дроблення кристалічних блоків, зростання деформацій кристалічної решітки і розвиток дислокації.

При механічній обробці діють два процеси, що знаходяться в протифазі: наклеп в результаті сил, що виникають при механічній обробці, і зняття наклепу в результаті теплового ефекту пластичної деформації. Міра впливу

кожного з цих процесів залежить від умов обробки. В результаті теплового ефекту, залежно від виникаючої температури, може спостерігатися і підвищення твердості обробленої поверхні. Твердість в даному випадку підвищується в результаті повного або неповного рекристалізаційного відпалу.

Міра і глибина наклепу змінюються залежно від методу обробки; фізико-механічних властивостей матеріалу, зокрема від твердості; параметрів режиму обробки; геометрії ріжучого інструменту і інших умов обробки.

**Утворення залишкового напруження.** Напруження, які зберігаються в тілі після зняття зовнішнього навантаження називаються залишковими. Основна причина їх виникнення в деталях — неоднорідність лінійних і об'ємних змін матеріалу, які викликаються технологічними процесами виготовлення деталей. До цих процесів належать: лиття, обробка тиском, механічна, термічна і хіміко-термічна обробка та ін.

Залежно від причин появи залишкові напруження підрозділяються на:

силові — напруження, що виникають в результаті дії на деталь зовнішньої сили, наприклад при механічній обробці;

теплові — напруження, які утворюються в результаті різниці температур по перерізу деталі, наприклад при литті, обробці тиском, термічній обробці і т.п.;

структурні — напруження, що виникають в результаті зміни структури матеріалу деталі, наприклад при гартуванні;

дифузійні — напруження, що утворюються в умовах зміни питомих об'ємів суміжних зон металу, унаслідок їх дифузійного насичення, наприклад при хіміко-термічній обробці.

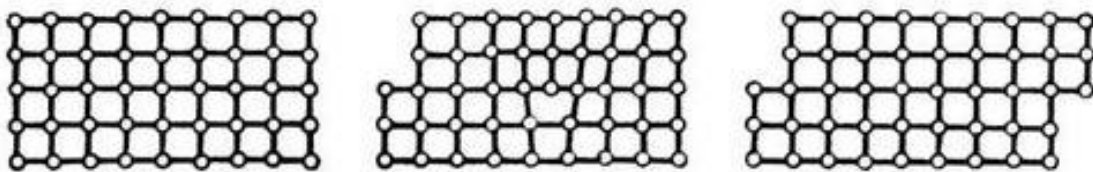
Залишкові напруження якісно підрозділяється на розтягуючі і стискальні.

В деяких випадках внутрішні залишкові напруження створюється навмисно для поліпшення якісних характеристик виробу (поверхневий наклеп, гартування, хіміко-термічна обробка). У загальному ж випадку наявність залишкового напруження в матеріалі небажана. Це пов'язано з тим, що при їх

підсумовуванні з напруженням, що виникає від зовнішнього навантаження при експлуатації виробу, можливе передчасне руйнування.

**Деформація кристалічної решітки поверхневого шару.** Метали і їх сплави в твердому стані мають кристалічну будову. Їх атоми (іони, молекули) утворюють просторову кристалічну решітку. Кристалічні зерна при пластичній деформації, у тому числі і при різанні металів, набувають однорідної орієнтації (текстури).

При теоретичних розрахунках міцності кристалів передбачають, що всі атоми розташовані в кристалічній решітці відповідно до кристалічної структури. Пластична деформація при такій будові має бути розподілена по всьому об'єму кристалла. Всі атоми в такому разі чинять великий опір деформації. Проте в реальних кристалах ковзання відбувається по кристалографічних площинах, і пластична деформація зароджується на невеликих ділянках, поступово поширюючись по всій площині (рис. 1.2). У кожен момент часу в ковзанні бере участь невелика кількість атомів кристалічної решітки, в результаті ефективність використання сил міжатомних зв'язків виявляється дуже малою.



*a* — правильна форма решітки; *b* — дислокація; *в* — порушення форми

кристала Рисунок 1.2 — Схема пластичної деформації по дислокаційному механізму.

Перед початком зрушення кристал має правильну форму решітки (рис. 1.2*a*). Під впливом напруження, прикладеного до однієї із сторін кристала, утворюється зрушення, при цьому в кристалі на границі зони зрушення виникає

лінійне руйнування розташування атомів, назване дислокацією (рис. 1.2б). В разі виходу дислокації на іншу сторону кристала правильність будови кристалічної решітки відновлюється, але одна половина кристала виявляється зрушеною по відношенню до іншої на одну міжатомну відстань (рис. 1.2в). Навколо дислокації створюється поле напруження. При пластичній деформації порушується правильність кристалічної решітки і це перешкоджає подальшому ковзанню. Починається ковзання по іншій площині і так далі.

Представлена картина відноситься до ковзання в одному зерні. У реальному металі кожне зерно оточене іншими зернами, які деформуються неоднорідно. В межах кожного зерна системи ковзання, що діють, змінюються від однієї ділянки до іншої. В окремих випадках лінії ковзання поширюються від одного зерна до іншого.

Окрім механізму деформації зсуву відомий також дифузійний механізм пластичної деформації, в основі якого лежать атомно-дифузійні переміщення. Інтенсивність пластичної деформації в цьому випадку залежить від рухливості дифундуючих атомів, яка визначається температурою. На практиці, особливо в умовах тертя, обидва механізми можуть діяти одночасно, впливаючи один на одного.

### 1.3 Аналіз фізико-хімічних властивостей поверхні

Фізико-хімічні властивості матеріалів характеризують їх здатність чинити опір окисленню або вступати в з'єднання з різними речовинами. Чим легше метал вступає в з'єднання з іншими елементами, тим швидше він руйнується. Хімічне руйнування металів під дією на їх поверхню зовнішнього агресивного середовища називають корозією [5].

**Розчинність** — здатність речовини розчинятися в тому або іншому розчиннику. Метали розчиняються в сильних кислотах і лугах. Розчинення може бути частковим, таким, що зачіпає лише поверхневі шари, або повним, коли метал повністю переходить в розчин. Часткове розчинення відбувається,



наприклад, при травленні виробів для здобуття гладкої поверхні виробу, повне — при розчиненні цинку в соляній кислоті в цілях здобуття флюсу для паяння.

**Окислюваність** характеризує здатність металів з'єднуватися з киснем і утворювати оксиди.

**Корозійна стійкість** — здатність металу чинити опір руйнуванню, яке викликане хімічною дією оточуючого середовища. Чисто хімічна корозія визначається головним чином окисленням, електрохімічна корозія виникає внаслідок фізико-хімічної неоднорідності металів у присутності рідини, здатної проводити електричний струм.

**Взаємодія металів з газами** є комплексом складних фізико-хімічних процесів, направлених у бік рівноваги. Наприклад, якість відливка багато в чому залежить від взаємодії металів (особливо їх рідких розплавів) з газами. У реальних умовах повна рівновага між газоподібною і рідкою фазами досягається дуже рідко.

**Фізико-хімічні властивості поверхні** характеризуються наявністю на металевій поверхні різних плівок, міцно пов'язаних з основним металом.

Адсорбція — утворення на поверхні твердого тіла якнайтонших плівок газу, пари або розчинених речовин або поглинання цих речовин поверхнею тіла. Молекули речовин, адсорбованих на поверхні твердого тіла, володіють здатністю переміщатися по поверхні з області, де є їх надлишок, в місця, де їх недостатньо для повного покриття поверхні. Рухливість адсорбованих молекул залежить від вигляду адсорбції. Адсорбція буває фізичною і хімічною.

При хімічній адсорбції (хемосорбції) адсорбовані молекули пов'язані з поверхнею тіла, утворюють в ній моношар, схожий з хімічною сполукою. В результаті цього рухливість молекул сильно обмежується. Хемосорбція на відміну від фізичної адсорбції носить вибіркового характер. Вона протікає з великою інтенсивністю в місцях порушення регулярності кристалічної решітки (включеннями або «дірками»). У багатьох випадках фізична і хімічна адсорбції протікають одночасно.

Поверхнево-активне середовище впливає на процеси деформації і руйнування твердих тіл, значно знижуючи їх опір деформації і руйнуванню в результаті фізичної (оборотної) адсорбції поверхнево-активних речовин з довкілля. Ефект зниження міцності був встановлений проф. П. А. Ребіндером і названий його ім'ям [1].

Металеві поверхні в процесі обробки дуже швидко покриваються первинною оксидною плівкою. Не дивлячись на малу товщину ця плівка припиняє подальше окислення.

Швидкість утворення оксидної плівки на поверхні металу визначається долями секунди. Із збільшенням товщини ріст плівки сповільнюється. Товщина плівки в металах, що окислюються, рівна від 2 до 10 нм (10-20 шарів молекул). Наприклад, оксидна плівка сталі дорівнює від 1 до 20 нм, алюмінію від 10 до 15 нм.

У разі, коли поверхня виробів повинна володіти специфічними властивостями: корозійною стійкістю, жароміцністю, антифрикційними або фрикційними властивостями застосовують технології напилення або осадження покриттів. Покриття на поверхні виробу утворюють шар нового матеріалу, завтовшки до 1 мм. Цей шар також дозволяє відновити геометрію і покращити властивості поверхні деталі. На практиці широкого поширення набули газотермічні методи нанесення захисних покриттів, які дозволяють створювати поверхні з підвищеною довговічністю. Проте при використанні даних методів на поверхні деталі може виникати як стискаюче, так і розтягуюче залишкове напруження. Величина і знак залишкового напруження залежать від методу нанесення покриття, а також хімічного складу матеріалу, що наноситься.

Працездатність напиленої поверхні залежить від складу напилюваного матеріалу, режимів напилення і режимів механічної обробки, зокрема, від режимів шліфування, оскільки воно є найпоширенішим методом фінішної обробки створеного поверхневого шару.

Поверхневий шар обробленої сталеві деталі, неоднорідний по будові (рис. 1.3) [1]. У ньому можна виділити граничний шар *l*, що складається з

адсорбованої плівки газів, вологи і охолоджуючої рідини, яку можна видалити лише нагрівом деталі у вакуумі; шар 2 — деформований метал з роздробленими і деформованими зернами. У ньому знаходяться оксиди і нітриди, порожнечі, надриви і тріщини; шар 3, що складається із зерен, сильно деформованих під дією інструменту. У ньому містяться включення структурно вільного цементита, що утворився під дією високих температур; шар 4 — метал з вихідною структурою.

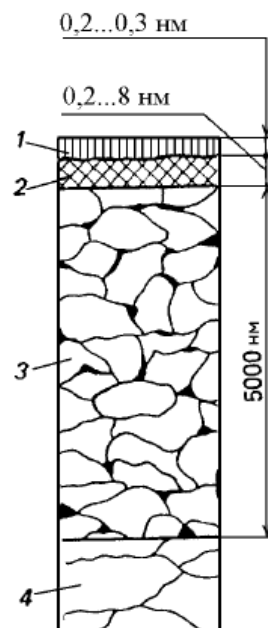


Рисунок 1.3 — Структура поверхневого шару шліфованої деталі з вуглецевої сталі

#### 1.4 Макрогеометрія поверхонь деталей машин

Під терміном макрогеометричні відхилення розуміють відхилення поверхні всієї деталі або великих її ділянок від номінальної. Величина цих відхилень визначається при вимірюванні лінійних розмірів деталі в різних перерізах. Утворюються вони через неточності оброблювального устаткування, погрішності установки деталей при обробці, температурні і механічні

деформації. Згідно ДСТУ 2498-94 [6], макрогеометричне відхилення  $\Delta$  визначається як найбільша відстань від точок реальної поверхні до ідеальної прилеглої поверхні, вимірювана по нормалі до останньої. Прилегла поверхня контактує з реальною як мінімум в одній точці і розташовується поза матеріалом деталі так, щоб відстань між найбільш віддаленими точками цих поверхонь була мінімальною.

В основу нормування відхилень форми покладений принцип прилеглих прямих, профілів, площин, поверхонь, прилеглого циліндра і кола.

Прилеглою називається пряма, дотична до реального профілю і розташована поза матеріалом деталі так, щоб відхилення від її найбільш віддаленої точки реального профілю в границях нормованої ділянки мало мінімальне значення. Це поняття відноситься і до прилеглого профілю, і до прилеглої площини.

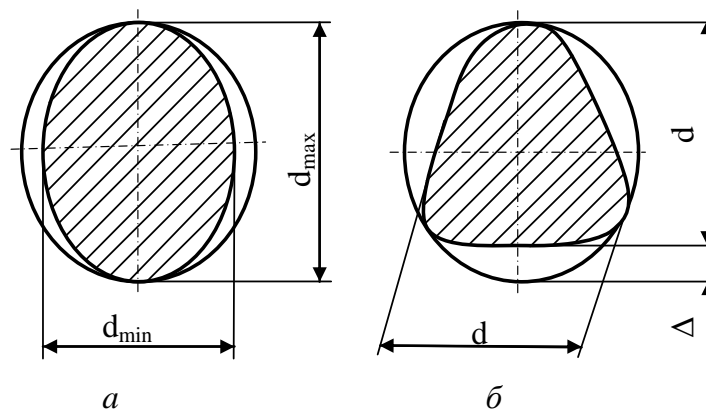
Прилеглим циліндром називається циліндр мінімального діаметру, описаний навколо реальної зовнішньої поверхні або максимального діаметру, вписаний в реальну внутрішню поверхню. Це поняття відноситься також і до прилеглого кола.

ДСТУ 2498-94 [6] передбачає п'ять видів відхилень форми:

- від циліндричності;
- від круглості (відхилення форми в поперечному перерізі для циліндричних поверхонь);
- від профілю подовжнього перерізу для циліндричних поверхонь;
- від прямолінійності;
- від площинності для плоских поверхонь.

**Відхилення від циліндричності** — найбільша відстань від точок реальної поверхні до прилеглого циліндра в границях нормованої ділянки. Відхилення від циліндричної форми якнайповніше можуть бути визначені комплексним показником — циліндричністю, що включає всі види відхилення форми поверхні від прямого круглого циліндра, тобто некруглість форми в поперечному перерізі і відхилення профілю подовжнього перерізу.

**Відхилення від круглості** — найбільша відстань від точок реального профілю до прилеглого кола. До диференційованих відхилень форми в поперечному перерізі відносяться овальність і огранювання. Овальність — відхилення від круглості, при якому дійсний профіль являється овалоподібною фігурою, найбільший і найменший діаметри якої (уздовж великої і малої осей овалу) знаходяться у взаємно перпендикулярних напрямках. Овальність визначається як половина різниці найбільшого  $d_{max}$  і найменшого  $d_{min}$  діаметрів в одному поперечному перерізі (рис. 1.4). Огранювання — відхилення, при якому профіль деталі є багатогранною фігурою з криволінійними гранями. Величина огранювання  $\Delta$  визначається як найбільша відстань від точок дійсного профілю до прилеглого кола.



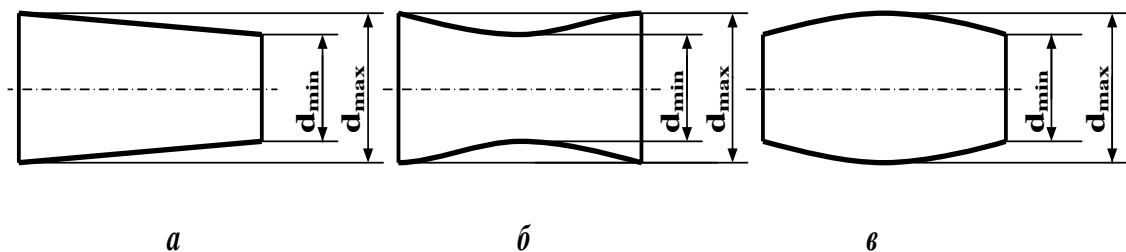
*a* — овальність; *б* — огранювання

Рисунок 1.4 — Відхилення форми циліндричних поверхонь в поперечному перерізі

Причиною появи овальності є овальність самої заготовки деталі, овальність опорних поверхонь шпинделя верстата, пружні деформації деталі (особливо тонкостінних) при закріпленні у верстаті. Причиною появи огранювання є зміна миттєвого центру обертання деталі, наприклад, при безцентровому шліфуванні. Огранювання може бути з парним і непарним

числом граней. Огранювання з непарним числом граней характеризується рівністю діаметру по гранях.

**Відхилення профілю циліндричної поверхні в подовжньому перерізі** визначається як найбільша відстань від точок дійсного профілю до відповідної сторони прилеглого профілю. Прилеглий профіль для цього випадку утворюється двома паралельними прямими. До диференційованих відхилень форми циліндричних поверхонь в подовжньому перерізі відносяться бочкоподібність, сідлоподібність, конусність (рис. 1.5). Бочкоподібність, сідлоподібність (корсетність) і вигнутість є наслідком непрямолінійності твірних, конусність — наслідком непаралельності твірних. Конусоподібність виникає через знос різця, неспівпадання осей шпинделя і пінолі задньої бабки верстата, відхилення від паралельності осі центрів і направляючих станини. Бочкоподібність найчастіше утворюється при обточуванні тонких довгих валів без люнетів у зв'язку з пружною деформацією.



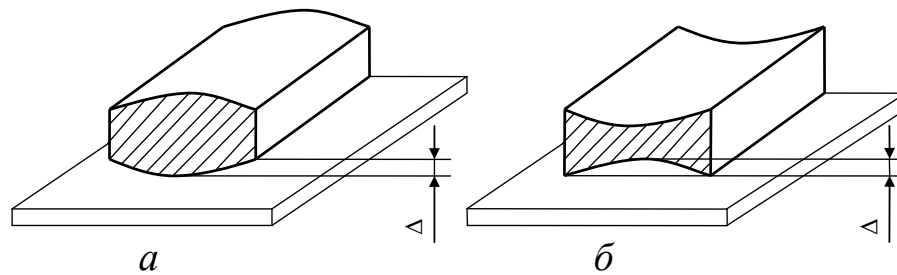
*a* — конусоподібність; *b* — сідлоподібність; *в* — бочкоподібність

Рисунок 1.5 — Відхилення профілю циліндричної поверхні в подовжньому перерізі

**Відхилення від прямолінійності в площині** — найбільша відстань від точок реального профілю до прилеглої прямої в границях нормованої ділянки.

**Відхилення від площинності** — найбільша відстань від точок реальної поверхні до прилеглої площини в будь-якому поперечному перерізі по довжині

виробу. Окремими видами відхилення від площинності є увігнутість і випуклість (рис. 1.6).



*a* — випуклість; *б* — увігнутість

Рисунок 1.6 — Відхилення від площинності

### 1.5 Хвилястість поверхні

**Хвилястість** займає проміжне положення між відхиленнями форми і шорсткістю поверхні.

Хвилястість поверхні є сукупністю нерівностей (виступів і западин), що періодично повторюються, утворюючих хвилю, крок якої  $S_B$  значно перевищує висоту  $H_B$  (рис. 1.7). Крок хвилі — це відстань між вершинами двох сусідніх хвиль, виміряна на профілі поверхні. Висота хвилі — відстань між вершиною і западиною. Як правило,  $S_B/H_B > 40$ . Розрізняють подовжню (уздовж напрямку обробки) і поперечну хвилястість. Крок хвилі  $S_B$  поверхні реальної деталі відповідає орієнтовно інтервалу 80 — 104 мкм, а  $H_B = 0,03 — 500$  мкм. Виникнення хвилястості пов'язане з динамічними процесами, що викликаються втратою стійкості системи верстат — пристосування — інструмент — деталь, унаслідок низькочастотних вібрацій верстата, пристосувань, інструменту або деталі, викликаних нерівномірністю зносу інструменту, наявністю невідновжених мас, неоднорідністю властивостей деталі.

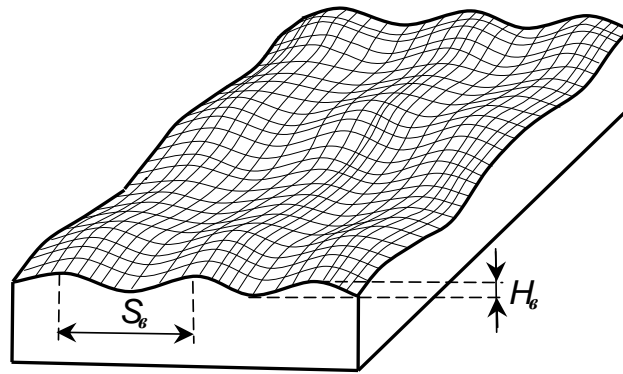


Рисунок 1.7 — Схема хвилястої поверхні

### 1.6 Шорсткість як геометричний стан поверхні

**Шорсткість поверхні** є сукупністю нерівностей з відносно малими кроками, створюючими рельєф поверхні на певній (базовій) довжині  $l$ . Інколи поєднання виступів і западин реальної поверхні називають мікрорельєфом поверхні.

Контур перерізу реальної поверхні площиною, перпендикулярною відповідній ідеальній геометричній поверхні, утворює профіль, що характеризує мікрогеометрію поверхні виробу. Графічне зображення реального профілю за даними вимірювань шорсткості називають профілограмою шорсткості. Оскільки через дану точку геометричної поверхні можна провести безліч нормальних перерізів, то шорсткість поверхні слід пов'язувати з тим або іншим напрямом.

Шорсткість обробленої поверхні є наслідком пластичної деформації поверхневого шару деталі при утворенні стружки, копіюванні нерівностей ріжучих кромek інструменту і терті його об заготовку, вириванні з поверхні часток матеріалу і інших причин.

Шорсткість обробленої поверхні у напрямі головного руху при різанні називають подовжньою, а у напрямі подачі — поперечною шорсткістю.





*Середнє арифметичне відхилення профілю  $Ra$*  визначається як середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю від середньої лінії в межах базової довжини

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \text{ або } Ra = \frac{1}{n} \sum_1^n |y_i|, \quad (1.1)$$

де  $n$  — число ділянок базової довжини, на яких визначається відхилення профілю  $y_i$  від середньої лінії (рис. 1.8). Чим більше  $n$ , тим точніше визначається  $Ra$ . Для реальних поверхонь  $Ra$  набуває значень в інтервалі 0,008 — 100 мкм.

*Висота нерівностей профілю по десяти точках  $Rz$*  є сумою середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів  $y_{pi}$  і глибин п'яти найбільших западин  $y_{vi}$  профілю в границях базової довжини:

$$Rz = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right), \quad (1.2)$$

де  $y_{pi}$  — висота  $i$ -го найбільшого виступу профілю;

$y_{vi}$  — глибина  $i$ -ї найбільшої западини профілю.

Величина  $Rz$  змінюється в інтервалі від 0,025 мкм до 1600 мкм.

*Найбільша висота нерівностей профілю  $Rmax$*  є повною висотою профілю, тобто відстанню між лінією виступів і лінією западин профілю в границях базової довжини:

$$Rmax = H_{max} + H_{min}. \quad (1.3)$$

*Середній крок нерівностей профілю  $Sm$*  — середнє значення нерівностей профілю в границях базової довжини:

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i}, \quad (1.4)$$

де  $S_{m_i}$  — відрізок середньої лінії між двома непарними (парними) точками її пересічення з профілем.

*Середній крок місцевих виступів профілю  $S$*  — це середнє значення кроків місцевих виступів профілю в границях базової довжини:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i. \quad (1.5)$$

Параметри  $S$  і  $S_m$  в комплексі з висотними параметрами  $R_a$  і  $R_z$  дозволяють визначити окрім висоти нерівностей ще і ухил, що має значення для антифрикційних характеристик поверхонь, що труться.

*Відносна опорна довжина профілю  $tp$*  — це відношення опорної довжини профілю ( $p$  до базової довжини:

$$tp = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l} = \frac{\eta_p}{l}, \quad (1.6)$$

де  $\eta_p$  є сумою довжин відрізків  $b_i$  в межах базової довжини, що відсікаються на заданому рівні  $p$  в матеріалі профілю лінією, еквідистантною середній лінії.

Опорна довжина профілю характеризує розподіл матеріалу в шорсткому шарі і грає важливу роль при розрахунках площі шорстких тіл (рис. 1.9).

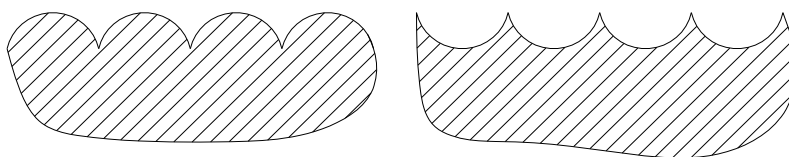
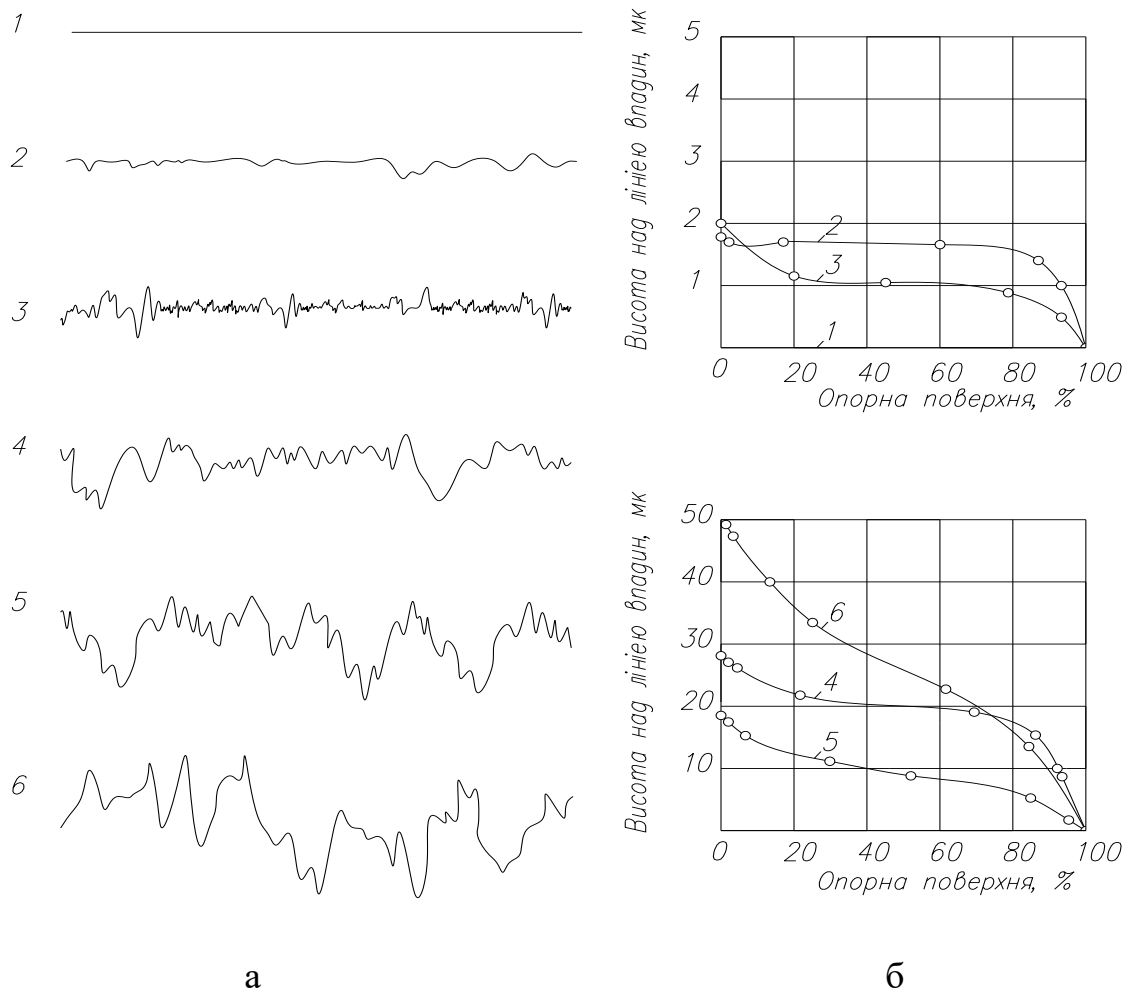


Рисунок 1.9 — Профілі поверхонь, що мають різну відносну опорну довжину профіля  $tp$ , але рівні висотні характеристики

Опорна крива профілю — це графічне зображення залежності опорної довжини профілю від рівня перерізу профілю.

Опорна крива профілю (рис. 1.10) характеризує структуру нерівностей в тому сенсі, що показує закономірність наростання площі опори у вибраному перерізі при зближенні (в процесі контакту) абсолютно гладкого тіла з даною поверхнею, що має нерівності. Така характеристика важлива в багатьох умовах експлуатації деталей машин.

Субмікрошорсткість поверхонь обумовлена структурною будовою твердого тіла. Вона є відхиленнями нанометричного масштабу. Виявляється вона як випадкове розташування виступаючих на поверхню твердого тіла кристалографічних площин, зерен, ультрамікротріщин, дислокацій, а також адсорбованих плівок островкового характеру. Розміри субмікрошорсткості на 2 — 3 порядки менші за розміри мікронерівностей.



а  
б

1 — ідеальна поверхня; 2 — поверхня після лаппінгування;  
3 — поверхня після шліфування; 4 — поверхня після фрезерування;  
5 — поверхня після тонкого розточування; 6 — поверхня після свердління

Рисунок 1.10 — Профільні криві (а) і криві несучої поверхні (б) для різних поверхонь

### 1.7 Висновки за розділом

Таким чином, якість поверхні деталей машин обумовлюється фізико-механічними, фізико-хімічними і геометричними характеристиками поверхні. Ці характеристики визначаються властивостями матеріалу і технологією виготовлення деталі, вони також можуть змінюватися в процесі обробки поверхні і експлуатації виробу.

Отже, якість поверхні — це комплекс властивостей, яких набуває поверхня деталі в процесі її виготовлення та експлуатації. Умовно їх можна розділити на три групи: фізико-механічні, фізико-хімічні та геометричні характеристики. Комплексний аналіз цих показників дає уявлення про стан поверхневого шару. Саме в такій класифікації ми будемо розглядати якість поверхні.

## 2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННЯХ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ

Контроль, як і вимірювання, полягає в експериментальному оцінюванні певних параметрів виробу. Засоби, методи та алгоритми контролю визначають за видом і фізичним характером параметрів, а також ступенем автоматизації процесу.

Контроль розмірів та якості поверхонь — це визначення їх придатності заданим розмірами чи показникам якості поверхонь [8, 9, 10]. Наприклад, за допомогою граничних калібрів, не вимірюючи розмірів і параметрів окремих поверхонь, визначають їх відповідність чи невідповідність вимогам, які є у робочих кресленнях виробів (заготовок, деталей тощо).

Контроль показників якості поверхонь деталей проводять за допомогою універсальних засобів вимірювальної техніки і спеціальними приладами. Розглянемо їх класифікацію та принцип дії.

### 2.1 Універсальні засоби вимірювальної техніки

**Штрихові ЗВТ** поділяються на металеві брускові та стрічкові лінійні міри (лінійки, рулетки, складані металеві метри) та металеві кутоміри (транспортири). Брускові штрихові міри довжини використовують для прямого вимірювання лінійних розмірів як шкали вимірювальних приладів, відлікових пристроїв оброблювальних верстатів і зразкові міри.

Штрихові ЗВТ здебільшого виготовляють зі стійких до спрацювання пружинних сталей і покривають хромом. Стандартні штрихові лінійки (ДСТУ ГОСТ 427:2009) [11]) мають довжину від 150 мм до 1000 мм з ціною поділок 1 мм. Зразкові міри довжини (брускові) можуть мати ціну поділки 0,1 мм і 0,2 мм. Їх переважно виготовляють зі спеціальних мідних стопів зі збільшеними розмірами, різного за формою поперечного перерізу, споряджають оптичними окулярами, які дають змогу забезпечити високу точність відліку вимірюваних

розмірів. Загальна довжина шкали брускових мір коливається від 60 мм до 2000 мм. Вони бувають шести класів точності (від 0 до 5) з допускними відхиленнями, для довжини 200 мм — відповідно від 0,6 мкм до 25 мкм. Лінійки можуть мати один чи два робочі торці, одну чи дві шкали.

Точність вимірювання штриховими лінійками згідно зі стандартами і залежно від класу їх точності може бути від 0,1 мм для зразкових та 0,5 мм для робочих лінійок.

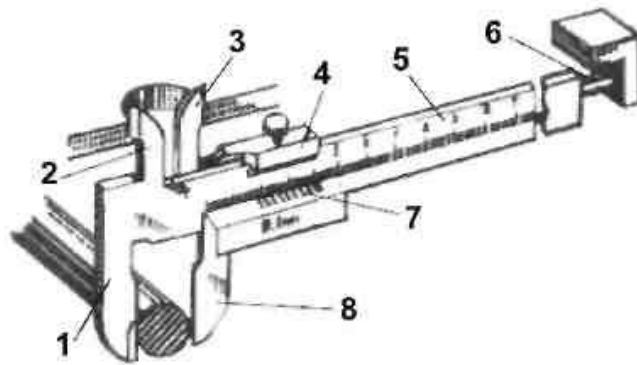
Вимірювання штриховими ЗВТ здійснюють, накладаючи їх на вимірювані поверхні виробів. У разі незручності вимірювання деяких розмірів використовують допоміжні технологічні пристрої (кронциркулі, глибиноміри тощо).

**Штангенінструменти та універсальні кутоміри** служать для вимірювання відповідно лінійних і кутових розмірів зовнішніх і ішутрішніх поверхонь, відстаней між ними, кутів нахилу, а також для розмічування заготовок перед обробленням їх поверхонь, різанням матеріалів.

Для штангенінструментів відмінною ознакою є наявність у них: основної та додаткової шкали. Основна шкала служить безпосередньо для вимірювання розмірів, а додаткова (ноніусна) — для підвищення точності відліку основної шкали. Наявність додаткової шкали дає змогу використати здатність людського ока, точніше визначати співпадання чи неспівпадання штрихів двох дотичних шкал, ніж оцінювати частку поділки основної шкали.

Найбільш поширений штангенінструмент — штангенциркуль (рис. 2.1). Залежно від конструкції і числа вимірювальних губок штангенциркулі виготовляються трьох видів і 8 типорозмірів. Штангенциркулі з межею вимірювання від 0 мм до 125 мм (150) мм і розміром відліку 0,1 мм мають двосторонні губки (рис. 2.1а), призначених для виміру зовнішніх (нижні губки) і внутрішніх (верхні губки) розмірів, і лінійки глибиноміра для вимірювання глибин пазів, проточок і т. д. Розмічальними губками штангенциркуля можна наносити паралельні лінії, кола та інші елементи контура деталей.





1 і 2 — нерухомі губки; 3 і 8 — рухомі губки; 4 — рухома рамка;  
5 — штанга з міліметровою шкалою; 6 — глибиномір; 7 — ноніус

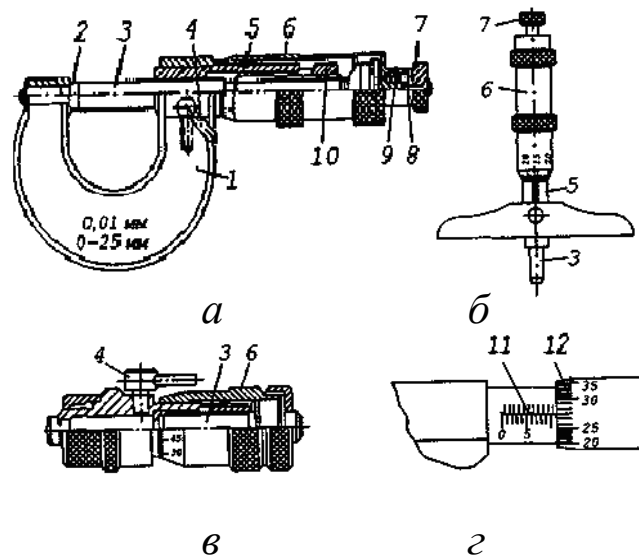
Рисунок 2.1 — Штангенциркуль

**Мікрометри** (ДСТУ ГОСТ 6507:2009 [12]; рис. 2.2) служать для вимірювання лінійних розмірів зовнішніх і внутрішніх поверхонь, глибин отворів, пазів, висоти уступів тощо. Відмінною конструктивною ознакою мікрометрів є наявність у них точного мікрометричного різьбового з'єднання з малим кроком (0,5 мм), яке служить для перетворення малих переміщень гвинта у більші лінійні переміщення на зовнішній циліндричній поверхні барабана (гайки). Тому ціна поділки додаткової шкали з  $n$  поділками:

$$i = P/n, \quad (2.1)$$

де  $P$  — крок різьби, мм.

Результат вимірювання отримують як суму показів основної шкали  $l_1$  (рис. 2.2а) та допоміжної  $l_2$  (рис. 2.2б), що нанесена вздовж циліндричної поверхні нерухомої гайки 5 (рис. 2.2а) та торцевої поверхні барабана 6, який жорстко закріплений на гвинті 3 та разом з ним може рухатися вздовж своєї осі відносно вимірювальної п'ятки 2 скоби 1.



*a* — мікрометрична скоба;  
*б* — глибиномір; *в* — нутромір; *г* — пристрій відліку

Рисунок 2.2 — Мікрометричні засоби вимірювання

Гладкі мікрометричні скоби (рис. 2.2*a*) служать для вимірювання розмірів зовнішніх поверхонь, глибиноміри (рис. 2.2*б*) для вимірювання глибини отворів, а мікрометричні нутроміри (рис. 2.2*в*) — для вимірювання внутрішніх поверхонь. П'ятка 2 гладкого мікрометра (рис. 2.2*a*), яку часто роблять регульованою, служить для точного виставлення шкали на нульову позначку.

Згідно з ГОСТ 7470-92 [13] визначений такий ряд діапазонів вимірювання для гладких мікрометричних скоб і глибиномірів: 0 мм...25 мм; 25 мм...50 мм; 50 мм...75 мм; 75 мм...100 мм; 100 мм...200 мм (з двома кінцевими мірами довжиною 125 мм і 175 мм); 300 мм...2000 мм.

Існують також цифрові мікрометри. Вони дають змогу зменшити втомлюваність працівників під час багатьох вимірювань, підвищити продуктивність їх праці та точність вимірювання, що пояснюється меншою кількістю помилок у результатах вимірювання.

Допускні похибки мікрометрів встановлені у відповідних стандартах для кожного типу та залежно від класу їх точності. Наприклад, допускна похибка

гладких мікрометрів становить від  $\pm 0,002$  мм для 1 класу точності та діапазону вимірювання до 100 мм, до  $\pm 0,01$  мм для 2 класу точності та діапазону вимірювання 500...600 мм.

**Вимірювальні головки** широко застосовуються для побудови ЗВТ та контрольно-вимірювальних пристроїв, у яких використовують відносний спосіб вимірювання. Вимірювальною головкою називають ЗВТ з порівняно малим діапазоном показів шкали та значною чутливістю. Такі пристрої здебільшого складаються зі стояка (корпуса, основи тощо), предметного столика та вимірювальної головки [12].

Прикладом такого ЗВТ може бути вертикальний пристрій, зображений на рис. 2.3. Пристрій складається з основи 1, предметного столика 2, напрямної колони 12 з гвинтовою різьбою, підпори 11, у якій закріплена вимірювальна головка, встановлюють вимірювальну головку на заданій висоті над предметним столиком шляхом переміщення підпори 11 та закріплюючи її у заданому положенні затискачем 10.

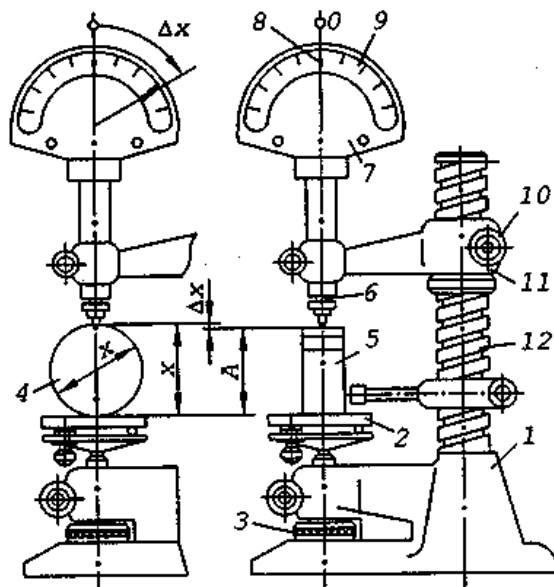


Рисунок 2.3 — Контрольно-вимірювальний пристрій для дослідження відхилень форми поверхонь

Вимірювальна головка служить для визначення відхилень  $\Delta x$  вимірюваного розміру від заданого за допомогою блока кінцевих мір розміру  $A$ . Встановивши спочатку на предметний столик блок 5 кінцевих мір чи еталонний виріб з відомим розміром, налагоджують вимірювальну головку на нульову позначку її шкали 9. Для цього переміщують підпору 11 до зіткнення щупа 6 вимірювальної головки 7 з верхньою поверхнею блока кінцевих мір, а після цього плавним переміщенням предметного столика 2 за допомогою ручки 3 гвинтового механізму досягають точного встановлення покажчика 8 шкали вимірювальної головки навпроти нульової позначки шкали 9. Потім, замінивши блок 5 вимірюваним виробом 4, за показами стрілки на шкалі 9 знаходять відхилення розміру виробу від заданого розміру блока кінцевих мір. Для отримання самого розміру виробу  $x$  залежно від знаку відхилення (переміщення покажчика вправо чи вліво від нульової позначки шкали) додають чи віднімають отримане відхилення від розміру  $A$ , тобто:

$$x = A \pm \Delta x, \quad (2.2)$$

де  $x$  — вимірюваний розмір виробу, мм;

$A$  — заданий розмір блока кінцевих мір, мм;

$\Delta x$  — відхилення покажчика вимірювальної головки від нульової позначки шкали, мм.

За умови забезпечення заданої жорсткості конструкцій столиків чи корпусів зазначених пристроїв досягають високої точності (до  $\pm 0,001$  мм) вимірювання.

Найбільш поширені конструкції вимірювальних головок завдяки простоті та надійності: конструкції механічні, оптичні та комбіновані.

**Універсальні оптичні ЗВТ** широко застосовуються завдяки їх високій точності, надійності та довговічності. До таких засобів належать довгоміри, інструментальні та універсальні мікроскопи, проектори тощо [14].

*Довгоміри* використовують для вимірювань абсолютних розмірів зовнішніх і внутрішніх поверхонь. Залежно від конструкції довгоміри бувають горизонтальні та вертикальні. Діапазон вимірювання горизонтального довгоміра 0 мм...200 мм, а вертикального — 0 мм...500 мм. Ціна поділки шкали довгомірів 0,001 мм.

*Інструментальні мікроскопи* (ГОСТ 8074-82 [15]) призначені для вимірювання лінійних і кутових розмірів виробів. За конструкцією їх поділяють на малі — з діапазоном вимірювання 0 мм...75 мм; великі — з діапазоном вимірювання 0 мм...150 мм; бінокулярні — з діапазоном вимірювання 0 мм...150 мм; з проекційними екранами та цифровим відліком результатів вимірювання.

Порядок вимірювань за допомогою інструментальних мікроскопів такий: різні точки поверхні виробу, розміщеного на предметному столику, візують окуляром мікроскопа, повертають стіл з виробом навколо вертикальної осі і за допомогою мікрометричних та оптичних відлікових пристроїв визначають координати заданих точок. За отриманими результатами вимірювань знаходять лінійні та кутові розміри виробу.

Для візування точок виробів інструментальні мікроскопи мають змінні об'єктиви з різним ступенем збільшення (у 10, 15, 30 і 50 разів з відповідними полями зору 21, 14, 7 і 4,2 мм), а для вимірювання кутових розмірів використовують спеціальну кутомірну окулярну головку.

**Принцип дії інтерференційних ЗВТ** ґрунтується на хвильовій природі світлових променів. Колір світлових променів залежить від довжини (частоти) їх хвиль, що знаходиться у межах від 0,38 мкм до 0,78 мкм. Є джерела світла, що випромінюють хвилі всіх довжин, і джерела світла, які випромінюють хвилі тільки однієї довжини, лінійчастого спектра.

Для точного вимірювання розмірів і відхилень від площинності використовують інтерференцію світла, отриману за допомогою плоскопаралельних і клиноватих пластинок. Інтерференційні смуги, які видно крізь скляну пластину, мають бути прямолінійними і паралельними до ребра

клина. Найконтрастнішими вони бувають біля самого ребра клина. Виникнення інтерференційних смуг (рис. 2.4) відбувається по схемі: промінь світла  $S$ , що падає на скляну пластину під кутом  $\alpha$ , у точці  $A$  поділяється на два промені  $S'$  і  $S''$ . Промінь  $S'$ , що перебуває у густішому середовищі, відбившись від границі середовищ  $p$  різною густиною, запізнюватиметься на довжину напівхвилі. Після виходу зі скляної пластини промені  $S'$  і  $S''$  будуть інтерферувати. Підсилення чи послаблення світла під час інтерференції залежатиме від різниці шляхів променів  $S'$  і  $S''$ . Різницю шляху визначають за товщиною клина  $d$  у місці розділення променя  $S$ .

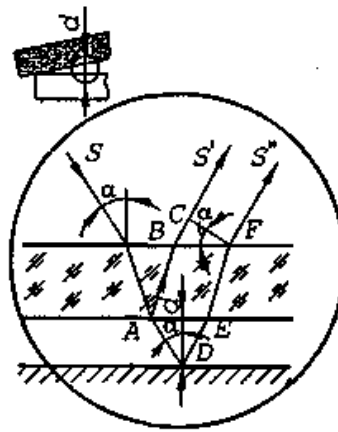


Рисунок 2.4 — Схема виникнення інтерференційних смуг

Вертикальний контактний інтерференційний компаратор (рис. 2.5) призначений для вимірювання розмірів і відхилень плоскопаралельності лінійних кінцевих мір відносним способом. Основним вузлом компаратора є трубка інтерферометра.

Світло від джерела  $1$  (рис. 2.5) проходить через конденсор  $2$ , щілину  $3$  і далі або через світлофільтр  $4$  на розділювальну напівпосріблену пластину  $6$ . Частина променів світла, відбита від поверхні пластини  $6$ , проходить до поворотного дзеркала  $5$  і, відбившись від нього, вертається назад до пластини  $6$ . Решта променів світла, що пройшла через пластину  $6$  і компенсатор  $7$ , направляється до рухомого дзеркала  $8$ , закріпленого до вимірювального щупа

9, і, відбившись від нього, також повертається до пластини 6. Компенсатор 7 забезпечує рівну довжину шляхів розділених променів світла у склі. Тому пластину 6 і компенсатор 7 роблять однакової товщини з однієї марки оптичного скла. Відбиті від основного 5 і рухомого 8 дзеркал промені зустрічаються та інтерферують на нижній площині пластини 6. За допомогою об'єктива 10 інтерференційне зображення проектується на площину сітки 11, яку видно через окуляр 12. Основне дзеркало 5 разом з рухомим дзеркалом 8 утворюють повітряний клин. Змінюючи кут повертання дзеркала 5, змінюють ширину інтерференційних смуг та їх кількість на заданій ділянці шкали. Відповідно змінюється чутливість компаратора та ціна поділки його шкали, яку встановлюють для монохроматичного (переважно зеленого) світла. На всій робочій ділянці шкали добре видно інтерференційні темно- та світлозелені смуги. Для встановлення заданої ціни поділки шкали повертають дзеркало 5 так, щоб на ділянці шкали з  $n$  поділок розмістилось  $k$  інтерференційних смуг, кількість яких:

$$k = \frac{2ni}{\lambda}. \quad (2.6)$$

Найбільшу допускну похибку вимірювання компаратора визначають як:

$$\Delta_B = \pm \left( 0,03 + 1,5n^3 \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right), \quad (2.7)$$

де  $\Delta_B$  — похибка вимірювання компаратора, мкм;

$n$  — кількість поділок шкали від нульової риски;

$\Delta\lambda$  — похибка довжини хвилі за атестатом компаратора, мкм;

$\lambda$  — довжина хвилі променів, яку пропускає фільтр, мкм.

Інтерференційні вимірювання за допомогою стандартних скляних пластин широко застосовуються у машинобудуванні завдяки своїй простоті та

відносно низькій вартості. Ці вимірювання використовують для визначення середніх розмірів і відхилень від плоскопаралельності лінійних кінцевих мір, а також відхилень від площинності робочих поверхонь різних вимірювальних засобів.

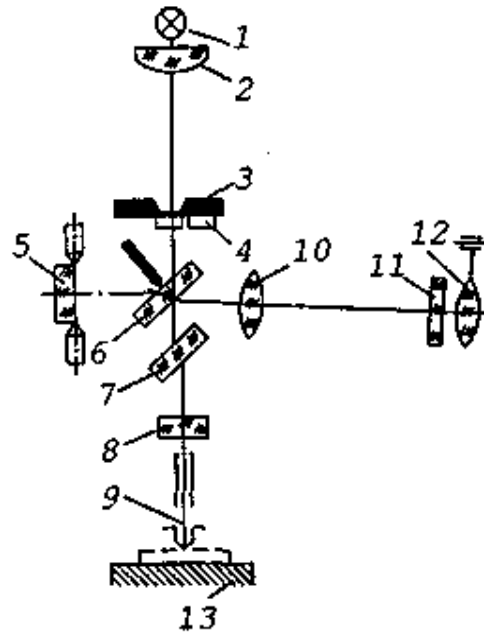
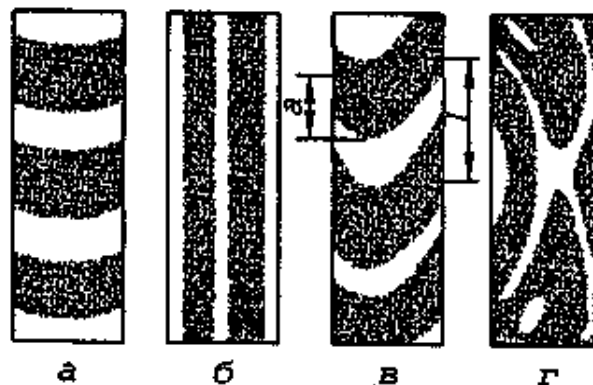


Рисунок 2.5 — Вертикальний контактний інтерференційний компаратор

На рис. 2.6 зображені інтерференційні смуги при контролі площинності зразків. Відхилення від площинності визначають за відношенням величини  $a$  інтерференційної смуги до її ширини  $l$  (рис. 2.6в).





$a$  — кінцева міра з незначним відхиленням від площинності;  $b$  — пластина, встановлена на довге ребро;  $v$  і  $z$  — кінцеві міри зі значними відхиленням від площинності

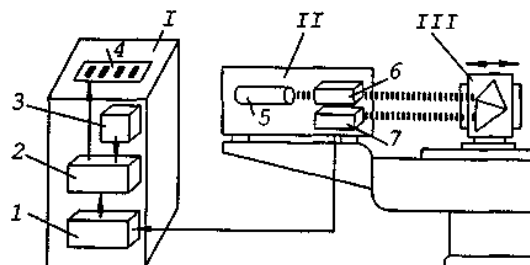
Рисунок 2.6 — Інтерференційне зображення при контролі площинності зразків:

**Використання лазерних засобів вимірювання** дуже розширило можливості вимірювання лінійних і кутових розмірів, а також спростило способи їх визначення.

Лазери — це найінтенсивніші серед використовуваних сучасною технікою джерел світла. Інтенсивність лазера вища від найбільшої інтенсивності некогерентних джерел світла майже у  $10^5$  разів [9].

Використання лазерів, особливо газових видимого діапазону, дуже спростило способи визначення лінійних і кутових розмірів. Одним із поширених способів використання лазерів є метод контролю геометрії елементів складних конструкцій (наприклад, кузова автомобіля).

Розглянемо блокову схему абсолютного лазерного калібратора американської фірми "Culter Hammer" (рис. 2.7), призначеного для вимірювання лінійних розмірів виробів, безконтактного налагодження та контролю розміщення різальних інструментів металооброблювальних верстатів, калібрування засобів вимірювання тощо.

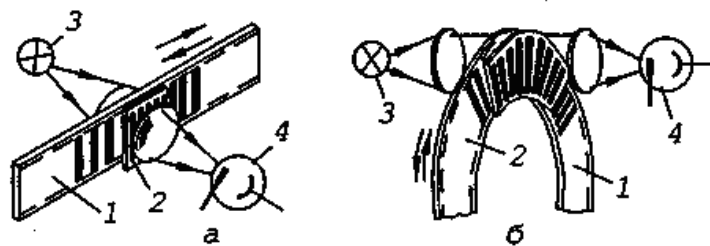


$I$  — цифровий блок;  $II$  — лазерна установка;  $III$  — відбивач

Рисунок 2.7 — блокова схема лазерного калібратора

Переміщення відбивача III, встановленого на рухомій частині верстата чи іншого об'єкта, зумовлює змінне інтерференційне зображення, яке сприймається та перетворюється в електричні сигнали фотодетектором 7, а цифрові вичислювальні пристрої 1 і 2 перетворюють кількість інтерференційних смуг в одиниці лінійних розмірів з автоматичним урахуванням поправок на вплив довкілля за допомогою перетворювача 3 і видають результати вимірювання за допомогою цифрового перетворювача 4. Діапазон вимірювання лінійних розмірів калібратора 0 мм...2500 мм з точністю до  $\pm 0,75$  мкм. Використання стабілізованих лазерів дає змогу підвищити точність вимірювання до  $\pm 0,002$  мкм.

У фотоелектричних засобах вимірювання (рис 2.8) інформація про вимірювану величину сприймається фотоелементами, які перетворюють її в електричні сигнали, за різницею амплітуд чи фаз яких визначають вимірювані величини. Як оптичні міри у фотоелектричних засобах вимірювання використовують вимірювальні растри, дифракційні та кодові ґратки, штрихові міри тощо.



*a* — схема з лінійним растром; *б* — схема з круговим растром

Рисунок 2.8 — Схема фотоелектричних ЗВТ:

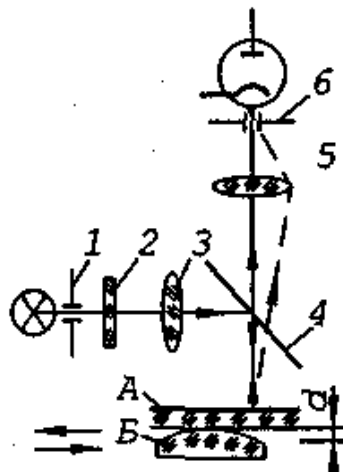
Лінійний чи круговий растри (рис 2.8) прикріплюють до рухомих частин вимірюваних об'єктів, її растр 2, освітлювач 3 та фотодіод 4 — до нерухомих. Під час руху вимірювального растра 1 у напрямку, вказаному стрілками, за

растровим полем освітлення відповідно змінюється і електричний струм у фотоелементі. Отримані електричні сигнали подаються до відлікових, записувальних і виконавчих механізмів верстатів, машин тощо.

**Схема інтерференційного фотоелектричного засобу вимірювання відхилень від площинності** зображена на рис. 2.9. Монохроматичний промінь світла через щілинну діафрагму 1, світлофільтр 2 і об'єктив 3, відбившись частково від напівпрозорої пластини 4, падає на поверхню *A* плоскопаралельної пластини і через неї на поверхню *B* досліджуваного виробу.

Промені світла, що падають на поверхні *A* і *B* перпендикулярно, відбиваються від них у протилежний бік і, проходячи через пластину 4, об'єктив 5 і щілинну діафрагму 6, інтерферують і потрапляють на фотодіод. Якщо площини *A* і *B* паралельні, то різниця шляху для інтерферованих променів дорівнює нулю, а на інтерференційному зображенні у цьому місці з'являється темна пляма.

Переміщення предметного столика разом з досліджуваним виробом за наявності нерівностей досліджуваної поверхні зумовлює утворення повітряних клинів з різними кутами та відповідну появу інтерференційного зображення з темними та світлими місцями. Зміна світла від переважання світлих чи темних плям зумовлює відповідну зміну електричного струму в колі фотодіода. Таким способом, переміщуючи досліджувану поверхню відносно скляної пластини з поверхнею *A*, визначають величини відхилень її від площинності.



## Рисунок — 2.9 Схема інтерференційного фотоелектричного ЗВТ

**Струнні засоби вимірювання** побудовані на використанні струнних перетворювачів частоти [16], застосовують їх для вимірювання та контролю багатьох фізичних величин (лінійних і кутових розмірів, температури, тиску). Вони мають високі характеристики та дають змогу отримувати частотну інформацію про результати вимірювань, яка з високою точністю та надійністю може передаватися на значні відстані, легко оброблятися засобами обчислювальної техніки та видаватися у цифровій формі.

Принцип дії перелічених засобів ґрунтується на взаємозв'язку вимірюваної величини та ступеня натягування струни вимірюваного перетворювача, від якого залежить частота її власних коливань, що перетворюється у дискретну інформацію про вимірювану величину.

### 2.2 Спеціальні засоби контролю та вимірювання розмірів і якості поверхонь виробів

**Відхилення форми** визначають універсальними ЗВТ та спеціальними засобами, для створення яких використовують розмічувальні плити, кутники, призми, рівні, оптичні та механічні вимірювальні головки, натягнені струни, лазерні джерела світла, кінцеві міри тощо [17].

Вимірюють і контролюють відхилення від прямолінійності та площинності, наприклад виробів 5 (рис. 2.10а), за допомогою лінійки 2, кінцевих мір довжини  $l$  і  $b$ , рівня 3, набору щупів, які вставляють між лінійкою та кінцевою мірою  $b$  і вимірювальної головки зі штативом 4.

Відхилення від прямолінійності значних вертикальних ліній та поверхонь знаходять за допомогою вертикальних струнних рівнів у комплекті з оптичними вимірювальними головками, а відхилення від площинності виробів 1 (рис. 2.10б) контролюють поворотним плоскоміром 3 з вимірювальною

головкою 2 чи оптичним засобом (рис. 2.10в), якими вимірюють відстані від контрольованої поверхні виробу 1 до оптичної осі трубки 4 за допомогою автоколіматора, дзеркала 2 та вимірювального компенсатора 3, встановлених на столі 5.

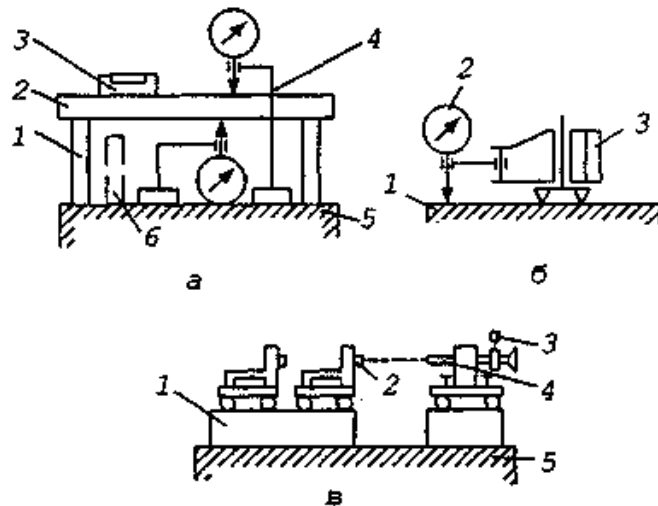


Рисунок 2.10 — Спеціальні ЗВТ для вимірювання відхилень форми виробів

Оскільки похибки вимірювання зумовлюються точністю використовуваних елементів, залежно від заданої точності параметрів відповідно добирають точність вимірювальних головок та інших складових частин контрольно-вимірювальних пристроїв.

**Вимірювання та контроль параметрів шорсткості поверхні.** Кількісну оцінку параметрів шорсткості поверхонь виробів роблять безконтактним способом за допомогою оптичних засобів вимірювання (мікроскопів, мікроінтерферентів тощо) та контактним способом засобами вимірювання з голчастими вимірювальними головками (профілометрами, профілографами тощо).

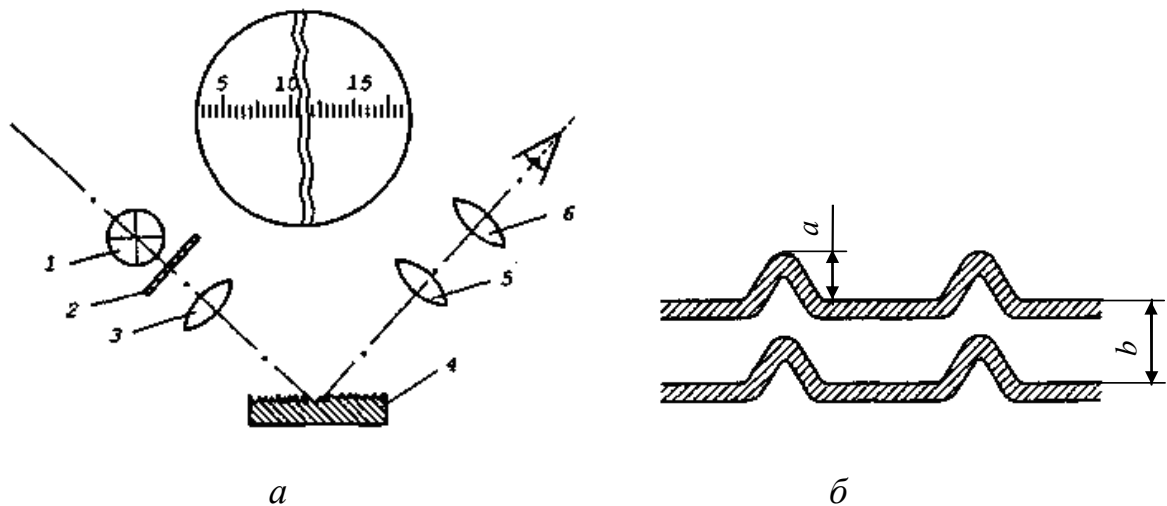
Завдяки оптичним засобам вимірювання визначають параметри шорсткості  $Rz$  і  $Rmax$  у межах від 0,1 мкм до 320 мкм,  $S$  і  $Sm$  — від 0,001 мм до 6,3 мм, а за допомогою голчастих профілографів і профілометрів залежно від

типу вимірювального засобу — параметри  $Ra$  від 0,008 мкм до 100 мкм,  $Rz$  і  $Rmax$  від 0,025 мкм до 250 мкм,  $S$  і  $Sm$  від 0,003 мм до 12,5 мм  $t_p$  від 0 до 100% [9].

У **безконтактних оптичних вимірювальних засобах**, принцип дії яких полягає у вимірюванні параметрів шорсткості за проекцією світлового перерізу досліджуваної поверхні за допомогою нахиленого світлового плоского променя (рис. 2.11а), світловий промінь проходить від джерела світла 1 через діафрагму 2 з вузькою щілиною, конденсор 3 і проектує світлу смужку поверхні 4 за допомогою об'єктиву 5 у фокальну площину окуляра 6.

Висоту мікронерівностей знаходять за допомогою окуляра мікроскопа (рис. 2.11б). Отримують світлову криву нерівностей поверхні (з тінями від виступів), розміри якої визначають за прозорою шкалою мікрметра.

Принцип дії інтерферометрів полягає у використанні інтерференції світлових променів, відбитих від зразкової та вимірюваної поверхонь.



*a* — схема інтерференційного вимірювання; *б* — викривлення інтерференційних смуг

Рисунок 2.11 — Принцип дії інтерферометра

Зображення поверхні разом з інтерференційними смугами розглядають в окуляр інтерферометра (рис. 2.11б), а висоту нерівностей її профілю  $R$  визначають за співвідношенням викривлення інтерференційних смуг  $a$  до ширини їх інтервалу  $b$  за формулою:

$$R = \frac{a \cdot \lambda}{b \cdot 2}, \quad (2.9)$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі джерела світла, мкм.

Принцип дії растрових мікроскопів полягає в утворенні муарових смуг від накладання зображень елементів двох періодичних структур (слідів оброблення та дифракційних ґраток), а мікронерівності поверхонь визначаються ступенем спотворення муарових смуг.

**У контактних засобах вимірювання шорсткості поверхонь за використовують вертикальні коливання голки і гострого алмазного наконечника, що рухається по досліджуваній поверхні (рис. 2.12). Ці коливання передаються коромислу 4, що може хитатися на опорі 3 і змінювати проміжок (магнітний опір) в обох колах магнітопроводу 7 диференційного трансформатора. Це зумовлює відповідні електричні імпульси в електричних мотках 6, що живляться від джерел електричного струму 2 і 5.**

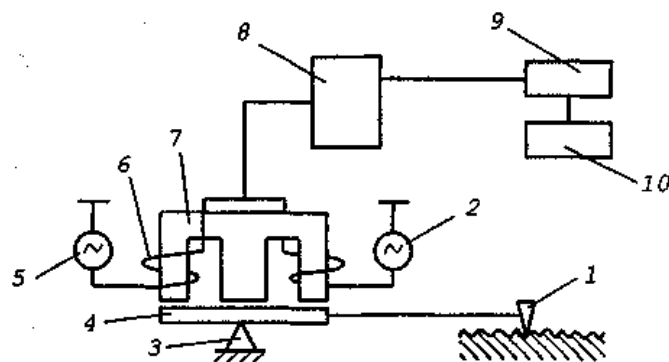


Рисунок 2.12 — Принципова схема індикаторних ЗВТ з індукційним перетворювачем

Хитання коромисла перерозподіляє індуктивності, змінюючи відповідно вихідну напругу диференційного трансформатора, амплітуда якої характеризує висоту мікронерівностей вимірюваної поверхні, а частота (залежно від заданої швидкості протягування вимірювальної головки) — їх крок. Електричні сигнали підсилюються у блоці 8 і передаються у блок оброблення інформації 9, а далі — у записувальний чи показувальний блок 10.

Замість магнітно-індуктивного використовують також механотронні, п'єзоелектричні перетворювачі переміщень голки в електричні сигнали. Як показувальні та записувальні засоби використовують аналогові або цифрові прилади.

Для вимірювання шорсткості важкодоступних внутрішніх поверхонь застосовують імерсійно-репліковий інтерферометр, на якому вимірюють параметри шорсткості не самої досліджуваної поверхні, а її відбитка (репліки).

### 2.3 Контроль хімічного складу

Контроль хімічного складу проводиться з використанням хімічних і спектральних методів аналізу.

**Хімічні методи аналізу**, в основі яких лежать хімічні реакції визначуваних речовин в розчинах, включають, головним чином, гравіметричний і кольорометричний аналізи. Необхідно відзначити, що хімічний аналіз трудомісткий, він не є універсальним і не забезпечує високої чутливості (особливо при малих концентраціях визначуваних елементів).

**Спектральний аналіз** — фізичний метод якісного і кількісного визначення складу речовини по його спектрах.

Для аналізу хімічного складу сталей, чавунів і кольорових сплавів широко застосовуються спектрографи (ІСП-30, ДФС-13, ДФС-8) і квантометри (ДФС-41, ДФС-51, МФС-4, «Папуас-4»), в основу роботи яких покладена схема емісійного спектрального аналізу. При проведенні аналізу між двома електродами, одним з яких є аналізована проба, збуджується імпульсний



електричний розряд. Випромінювання збуджених в розряді атомів елементів, що входять до складу проби, проходить через поліхроматор з увігнутими дифракційними ґратами і розкладається в спектр. Кожному хімічному елементу відповідає своя сукупність спектральних ліній, інтенсивність яких залежить від концентрації елементу в пробі. При якісному аналізі отриманий спектр інтерпретують за допомогою таблиць і атласів спектрів елементів. Для кількісного аналізу проби із спектру вибирають одну або декілька аналітичних ліній кожного аналізованого елементу.

**Рентгеноспектральний аналіз.** В порівнянні з оптичними спектрами рентгенівські характеристичні спектри містять менше число ліній, що спрощує їх розшифровку. Ця перевага обумовлює усе більш широке застосування рентгенівського аналізу в заводських лабораторіях.

В промисловості для контролю хімічного складу сталей і сплавів застосовують флуоресцентні рентгеноспектрометри (Спарк-1-2М, Lab-X3000, ED 2000, MDX 1000) оснащені ЕОМ, що дозволяє автоматизувати процес обробки спектрів і підвищити оперативність.

## 2.4 Контроль механічних властивостей виробу

Як правило, механічні властивості контролюються при випробуваннях: на одноосне розтягування, стискування, на твердість, на ударну в'язкість. Форма і розміри зразків для випробувань повинні відповідати вимогам ГОСТ 1497–84 [19] і ГОСТ 9454–78 [20].

**Випробування на розтягування** проводяться на розривних випробувальних машинах, що складаються з наступних основних частин: механізму для навантаження (деформації) зразка; механізму для передачі розтягуючої сили; механізму для вимірювання розтягуючої сили. Зазвичай застосовуються машини з розривним зусиллям 20, 40, 50, 300 і 500 кН.

На рис 2.13 приведена схема універсальної гідравлічної випробувальної машини УГИМ-50, забезпеченої автодіаграмним апаратом для запису діаграми розтягування  $F — \Delta l$ , де  $\Delta l$  – подовження зразка в процесі деформації.

Механізм для вантаження зразка діє від гідравлічного приводу. Переміщення верхнього захвату відбувається під дією поршня гідравлічного циліндра. Механізм, вимірюючий силу, що викликає деформацію зразка, є важільно-маятниковим.

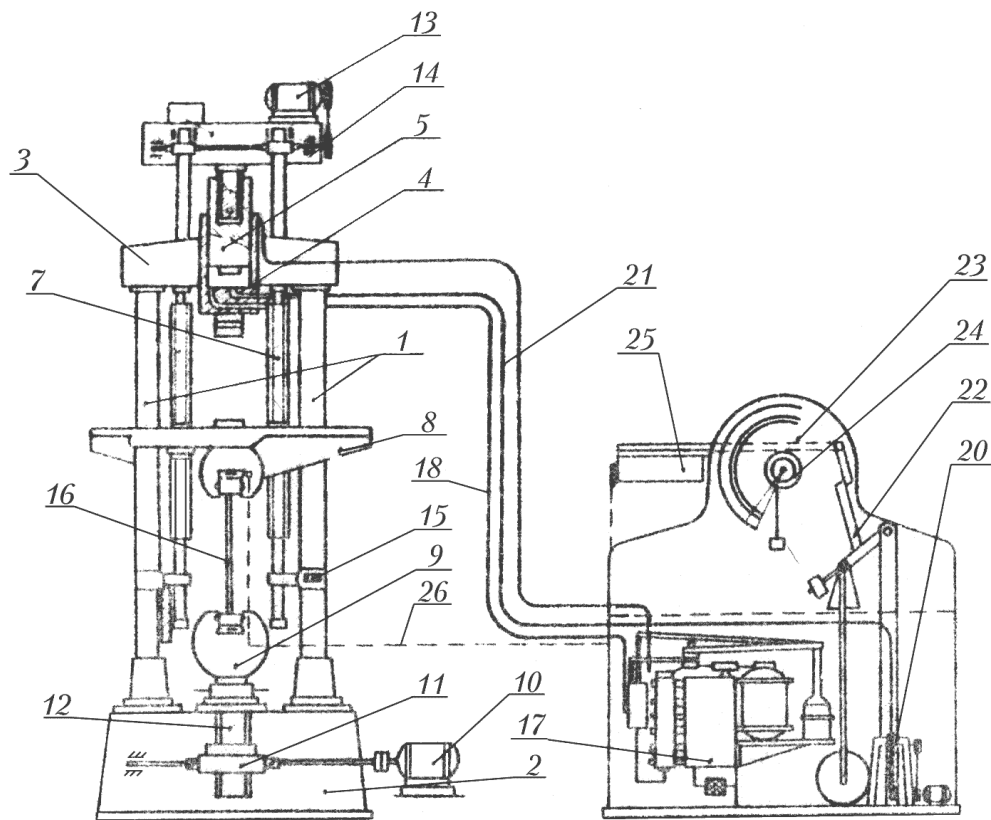


Рисунок 2.13 — Загальний вигляд універсальної гідравлічної випробувальної машини УГИМ-50

Основні частини і принцип дії універсальної машини УГИМ-50 наступні: колони 1 машини, закладені у фундаментну плиту 2, зв'язані поперечкою 3, в яку впресований робочий циліндр 4 з рухомим в ньому поршнем 5. До поршня через поперечку 6 на ходових гвинтах 7 підвішена траверса 8, до якої прикріплений верхній захват навантажуючого механізму. Нижній захват 9

може переміщатися від електродвигуна 10 за допомогою черв'ячної 11 і гвинтової 12 передач.

На відміну від більшості інших моделей у машини УГИМ-50 траверсу 8 можна переміщати уздовж ходових гвинтів 7. Це дозволяє встановлювати її по габаритах зразка, не вдаючись до гідравлічного приводу. Приводний пристрій траверси 8 складається з електродвигуна 13, встановленого на верхній поперечці 6, і передачі 14. Кнопкове управління 15 електродвигунами 13 і 10 змонтовано на одній з колон машини.

Розтягування зразка 16 здійснюється переміщенням траверси 8 при підйомі поршня 5 під дією тиску масла, що нагнітається в робочий циліндр машини насосом 17 по трубопроводу 18.

Вимір статичних навантажень здійснюється маятниковим силовимірювачем 19. Силовимірювальний циліндр маятника 20 зв'язаний трубопроводом 21 з робочим циліндром 4. При навантаженні зразка і збільшенні тиску масла в циліндрі 20 маятник відхиляється, а штовхач 22 переміщує зубчасту рейку 23. Остання повертає шестерню 24 і стрілку шкали.

Самописний діаграмний апарат 25 для запису кривої розтягування приводиться в обертання ниткою 26, пропущеною через ряд роликів і сполученою з рухливим захватом траверси 8.

Масштаб запису подовження при роботі з великим шківом барабана 1:1 і з малим шківом — 4:1. Масштаб сил залежить від поясу навантаження.

Шкала маятникового силовимірювача має три пояси навантаження: від 0 т до 10 т (I шкала), від 0 т до 25 т (II шкала), і від 0 т до 50 т (III шкала), з ціною поділки відповідно 20 кг, 50 кг 100 кг або 0,2 кН; 0,5 кН і 1,0 кН.

Зміна моменту сили від ваги маятника при переході з одного поясу навантажень на іншій здійснюється двома змінними грузами.

По характеристиках деформації залежно від прикладеного розтягуючого зусилля визначаються механічні властивості випробовуваного металу.

Границя текучості  $\sigma_{0,2}$  визначається як відношення навантаження  $F_{0,2}$  до площі початкового поперечного перерізу зразка  $S_0$ :

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0}, \quad (2.10)$$

$F_{0,2}$  —напруження, при якому залишкова деформація зразка досягає 0,2% від початкової розрахункової довжини зразка.

Границя міцності  $\sigma_B$  визначається як відношення максимального навантаження  $F_{\max}$  до площі початкового поперечного перерізу зразка  $S_0$ :

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{S_0}. \quad (2.11)$$

Відносне подовження визначається як відношення приросту довжини зразка  $\Delta l$  після розриву до первинної розрахункової довжини  $l_0$ . Зазвичай це відношення помножують на 100 і отримують значення відносного подовження у відсотках:

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100, \quad (2.12)$$

де  $\Delta l = (l_k - l_0)$  — приріст довжини зразка, мм.

**Випробування на стискування** проводиться на спеціальних пресах або універсальних установках, відповідних вимогам ГОСТ 7855-68 [21].

При випробуванні пластичних матеріалів (маловуглецевій сталі, міді та ін.) через великі деформації (сплющення) вдається визначити лише межу текучості. Крихкі матеріали (напр., чавун) руйнуються при стискуванні, витримуючи при цьому значно більші напруження, ніж при розтягуванні. Для цих матеріалів межа міцності при випробуванні на стискування має велике практичне значення.

Випробування на стискування проводиться на зразках циліндричної або кубічної форми. Торцеві поверхні зразків мають бути строго паралельні. Для зменшення тертя об опорні поверхні їх покривають спеціальним мастилом. При стискуванні так само, як і при розтягуванні, можна повністю визначити всі характеристики механічних властивостей матеріалу; проте найчастіше визначається лише межа міцності (наприклад, для чавунних виробів).

В процесі випробування на стискування може бути записана або побудована діаграма стискування, тобто залежність між стискуючим зусиллям  $F$  і абсолютним укороченням зразка  $\Delta h$ . Оскільки одноосне стискування відрізняється від розтягування лише знаком, то основні розрахункові формули мають аналогічний вигляд. Діаграму умовної напруги при стискуванні будують в координатах: умовна напруга  $\sigma$  — відносне укорочення (осідання)  $\varepsilon$ .

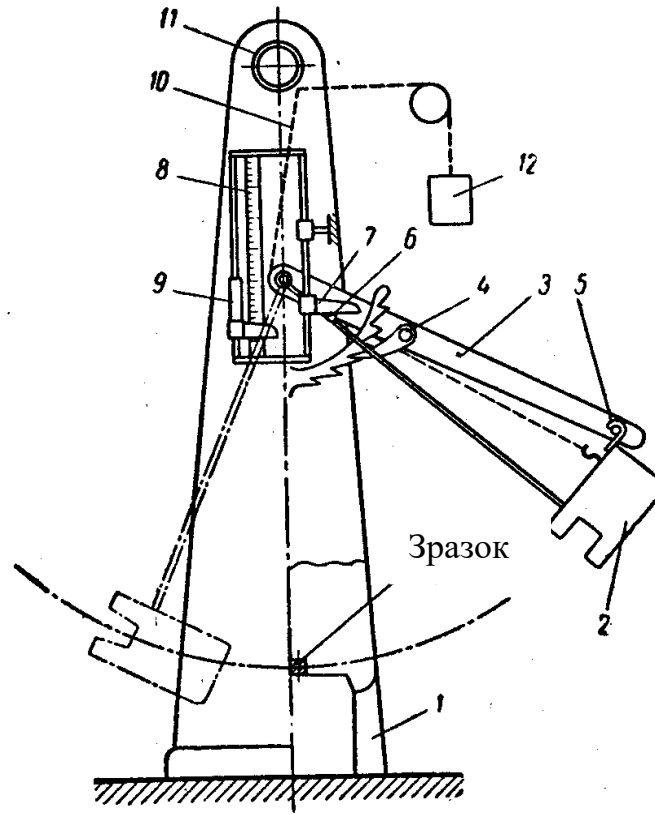
**Випробування на згинання.** Цей вигляд випробування проводиться головним чином для визначення механічних властивостей крихких матеріалів. При згинанні усувається істотний недолік методу випробування на розтягування — перекіс зразка, що призводить до його передчасного руйнування. Випробування проводиться на спеціальних або на універсальних розривних машинах, які забезпечені опорами, що розсуються. Зразки для випробування мають циліндричну форму.

**Випробування на ударну в'язкість.** При визначенні в'язкості сталі найбільшого поширення набув спосіб випробування квадратних надрізаних зразків на ударне згинання, яке добре виявляє схильність сталі до крихкого руйнування. Випробування проводяться на маятникових копрах (рис. 2.14), схема розташування зразка на копрі приведена на рис. 2.15.

Відношення затраченої роботи  $A_H$  до площі поперечного перерізу зразка в місці надрізу  $F$  називається ударною в'язкістю матеріалу:

$$a_H = \frac{A_H}{F}, \quad (2.13)$$

де  $a_H$  — ударна в'язкість, кДж/м<sup>2</sup>.



1 — стійка; 2 — маятник; 3 — підйомна рама; 4 — важіль храпового механізму; 5 — фіксатор маятника; 6 — плече маятника; 7 — планка вимірювального пристрою; 8 — шкала; 9 — покажчик, що переміщається уздовж осі шкали; 10 — трос; 11 — нерухомий блок; 12 — груз

Рисунок 2.14 — Загальний вигляд маятникового копра

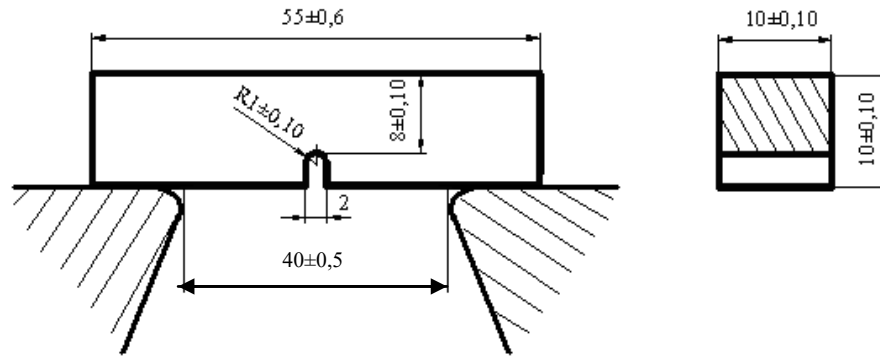
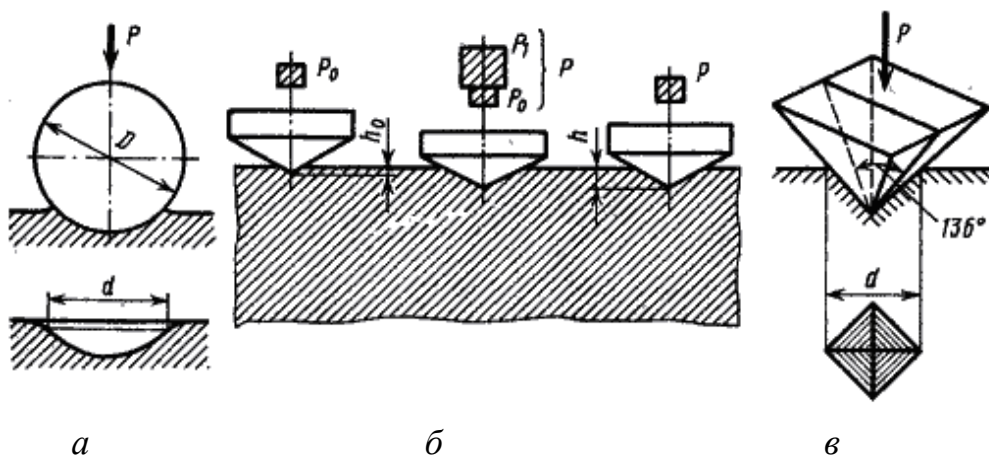


Рисунок 2.15 — Розташування зразка на копрі

**Визначення макро-, і мікротвердості.** Твердість оцінюють шляхом втискування в поверхню зразка стандартного тіла (індентора), що не деформується при випробуванні. Твердість оцінюють по глибині проникнення індентора (метод Роквелла), або по величині відбитку від втискування алмазного конуса (метод Брінелля) чи піраміди (метод Віккерса).

У всіх випадках відбувається пластична деформація матеріалу. Чим більший опір матеріалу пластичній деформації, тим вище твердість. Схеми випробувань представлені на рис. 2.16.



*a* — по Брінеллю; *б* — по Роквеллу; *в* — по Віккерсу

Рисунок 2.16 — Схеми визначення твердості

В результаті втискування індентора з великим навантаженням поверхневі шари матеріалу, що знаходяться під наконечником і поблизу нього, пластично деформуються. Після зняття навантаження залишається відбиток.

**Вимірювання мікротвердості** має на меті визначити твердість окремих зерен, фаз і структурних складових сплаву (а не «усереднену» твердість, як при вимірюванні макротвердості). В даному випадку об'єм, що деформується втискуванням, має бути меншим об'єму (площі) вимірюваного зерна.

Навантаження, що прикладається, вибирається невеликим. Крім того, мікротвердість вимірюють для характеристики властивостей дуже малих за розмірами деталей. Мікротвердість визначають втискуванням алмазної піраміди.

Прилад типу ПМТ-3 (рис. 2.17) має штатив 1 вертикального мікроскопа з тубусом, що переміщається вгору і вниз за допомогою макрометричного і мікрометричного гвинтів. Прилад забезпечений двома об'єктивами для перегляду мікрошліфа при збільшеннях в 478 і 135 разів. Окуляр збільшує в 15 разів.

Окулярний мікрометр має нерухому сітку, залишковий мікрометричний барабанчик і каретку з рухливою сіткою. На нерухомій сітці завдовжки 5 мм нанесені штрихи з цифрами і косинець з прямим кутом, вершина якого збігається з цифрою 0. На рухливій сітці нанесений косинець з прямим кутом і дві риски.

Алмазна пірамідка має кут між гранями при вершині  $136^\circ$ , тобто такий же, як і в піраміді для вимірювання по Віккерсу (що полегшує перерахунок на числа Віккерса). Навантаження для втискування піраміди створюється грузами, що встановлюються на шток 13. У приладі застосовують грузи від 1 г до 200 г залежно від особливостей структури, що вивчається, і завдань дослідження. Встановлений мікрошліф переглядають через окуляр.

Вимірювання отриманого відбитку проводять не менше двох-трьох разів. Числа твердості обчислюються за формулою:

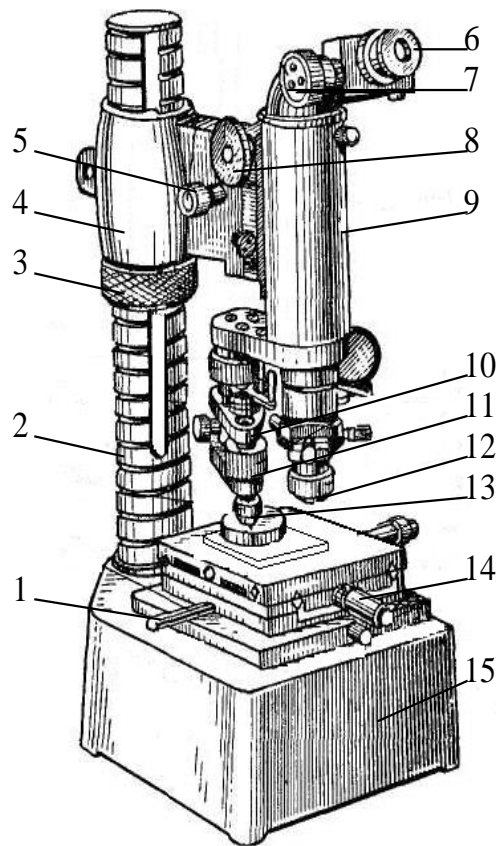


$$HV = 1854 \cdot P/d^2 \quad (2.16)$$

де  $P$  — величина прикладеного навантаження, в Н;

$d$  — діагональ відбитка, мкм.

Необхідно врахувати, що при дуже малих навантаженнях (менше 20 кгс) можна отримати недостатньо точні результати. Прилад дозволяє фотографувати мікроструктуру зразка з отриманими відбитками.



1 і 14 — гвинти предметного столика; 2 — стійка; 3 — кільцева гайка;

4 — кронштейн; 5 — механізм мікроподачі; 6 — мікроскоп;

7 — окулярний мікрометр; 8 — мікрометричний гвинт; 9 — тубус;

10 і 11 — кронштейни механізму вантаження; 12 — об'єктив; 13 — шток з алмазною пірамідою; 15 — станина

Рисунок 2.17 — Схема приладу ПМТ-3 для вимірювання мікротвердості

## 2.5 Висновки за розділом

Вимірювання та контроль параметрів шорсткості поверхонь є технічно складним завданням, оскільки до сьогодні відсутні прості та надійні засоби для вимірювання мікронерівностей поверхонь різної форми та величини із високою точністю. Через технічні труднощі перелічені вище засоби переважно дають умовні значення параметрів шорсткості або мають малу точність. Тому часто на практиці шорсткість поверхонь визначають за допомогою простіших та дешевих способів вимірювання, наприклад, порівнюючи їх візуально чи на дотик з еталонними зразками (ГОСТ 9378-93 [18]), виготовленими із заданих матеріалів, за допомогою заданих способів оброблення тощо.

## 3 АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### 3.1 Поняття надійності

**Надійність** — це властивість об'єкту зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції за заданих умов експлуатації, технічного обслуговування, зберігання і транспортування (ДСТУ 2860-94 [22]). До параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції, відносять кінематичні і динамічні параметри, параметри міцності, точності функціонування, продуктивності, швидкості і т.п.

Сучасні автомобілі складаються з великої кількості взаємодіючих елементів і систем. Відмова в роботі хоча б одного відповідального елемента складної системи може привести до порушення роботи всієї системи і автомобіля в цілому.

Недостатня надійність деталей машин приводить до величезних витрат на ремонт, простою, інколи до аварій, пов'язаних з людськими жертвами.

У теорії надійності розглядають наступні об'єкти:

- виріб — одиниця продукції, що випускається даним підприємством, цехом і т.д., наприклад підшипник, ремінь, верстат, автомобіль;
- елемент — проста при даному розгляді складова частина виробу, в завданнях надійності це може бути деталь або вузол;
- система — сукупність елементів, що спільно діють, призначена для самостійного виконання заданих функцій.

Поняття елемента і системи трансформуються залежно від поставленого завдання. Машина, наприклад, при встановленні її власної надійності розглядається як система, що складається з окремих елементів — механізмів, деталей, систем, а при вивченні надійності автоматичної лінії — як елемент [23].

Надійність характеризується наступними основними станами і подіями:

**Працездатність** — це стан виробу, при якому він здатен норрисьно виконувати задані функції (з параметрами, встановленими в технічній документації).

**Справність** — стан виробу, при якому він задовольняє всім, не лише основним, але і допоміжним, вимогам. Справний виріб обов'язково являється працездатним.

**Несправність** — стан виробу, при якому він не відповідає хоча б одній з вимог технічної документації. Розрізняють несправності що приводять до відмов і не приводять до них.

**Відмова** — це подія, що полягає в повній або частковій втраті працездатності. Відмови ділять на відмови функціонування, при яких виконання своїх функцій даним елементом припиняється (наприклад, поломка зубів шестерні), і відмови параметричні, при яких деякі параметри об'єкта змінюються в недопустимих межах (наприклад, втрата точності верстата).

Причини відмов діляться на випадкові і систематичні.

Випадкові причини — це непередбачені перевантаження, дефекти матеріалу і погрішності виготовлення, не виявлені контролем, помилки обслуговуючого персоналу і ін. Випадкові чинники переважно викликають відмови при діях в несприятливих умовах.

Систематичні причини — це закономірні явища, що викликають поступове накопичення пошкоджень: вплив середовища, часу, температури — корозія, старіння; навантаження і робота тертя — втома, повзучість, знос; функціональні дії — засмічення, залипання, витік.

Відповідно до цих причин і характеру розвитку і прояву відмови ділять на раптові (поломки від перевантажень, заїдання), поступові по розвитку і раптові по прояву (втомні руйнування), і поступові (знос, старіння, корозія). Раптові відмови внаслідок своєї несподіванки небезпечніші, ніж поступові. Поступові відмови є виходами параметрів за межі допуску в процесі експлуатації або зберігання.

По причинах виникнення відмови можна також розділити на: конструкційні, викликані недоліками конструкції; технологічні, викликані недосконалістю або порушенням технології; експлуатаційні, викликані неправильною експлуатацією.

Відмови відповідно до своєї фізичної природи бувають пов'язані з руйнуванням деталей або їх поверхонь (поломки, знос, корозія), або не пов'язані з руйнуванням (засмічення каналів подачі палива, мастила, ослаблення з'єднань). Відповідно до цього відмови усувають: а) заміною деталі; б) регулюванням або очищенням.

За часом виникнення відмови ділять на припрацьовочні (виникають на початку експлуатації), відмови при нормальній експлуатації (за період до появи відмов зносу) і знос.

Розглянемо властивості виробів в аспекті проблем надійності.

Будучи комплексною властивістю, надійність виробів визначається їх безвідмовністю, довговічністю, ремонтпридатністю і придатністю до зберігання.

**Безвідмовність** — властивість об'єкту безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або напрацювання [22]. Показниками безвідмовності є вірогідність безвідмовної роботи, середнє напрацювання вцілому, середнє напрацювання на відмову, інтенсивність відмов і ін. Час роботи виробу вцілому, виражений в годинах, називається напрацюванням і по своїй суті є випадковою величиною. Термін служби виробу, визначуваний його напрацюванням до досягнення граничного регламентованого стану (граничний знос і т.п.), називається ресурсом.

**Довговічність** — властивість виробу зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту. Граничний стан виробу характеризується неможливістю його подальшої експлуатації, зниженням ефективності або безпеки. Для невідновних виробів поняття довговічності і безвідмовності практично збігаються.

**Ремонтопридатність** — пристосованість виробу до попередження і виявлення причин виникнення відмов і пошкоджень, а також до підтримки і відновлення працездатності шляхом технічного обслуговування і ремонтів. До показників ремонтпридатності відносять вірогідність і середній час відновлення, питому і середню трудомісткість технічного обслуговування і ремонту і ін.

**Придатність до зберігання** — властивість об'єкту зберігати значення показників безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності підчас і після зберігання і транспортування.

Таким чином, надійність характеризується властивостями, які виявляються в процесі експлуатації виробу і дозволяють судити про те, наскільки виріб задовольняє покладеним на нього вимогам.

Оскільки процес експлуатації машин — один з основних процесів, розглянемо експлуатаційні властивості більш детально.

### 3.2 Аналіз експлуатаційних властивостей деталей машин

До групи експлуатаційних властивостей деталей машин відносяться: витривалість, зносостійкість, втомна міцність, контактна жорсткість, корозійна стійкість герметичність з'єднань, міцність посадок і ін.

**Зносостійкість** — експлуатаційна властивість, що визначає здатність поверхневих шарів деталей чинити опір руйнуванню при терті-ковзанні, терті-коченні, а також при мікропереміщеннях, обумовлених дією вібрацій. В результаті зносу деталей машин знижується ККД, втрачається точність, знижується міцність, збільшуються динамічні навантаження, які є наслідком збільшення зазорів в сполученнях, підвищується шум при роботі. Дослідження по впливу на зносостійкість параметрів стану і фізико-механічних властивостей поверхневого шару свідчать про можливість управління зносостійкістю деталей машин шляхом проведення раціональних методів обробки.

Відповідно до ДСТУ 2823-94 [24] зносостійкість — це властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя, оцінюване величиною, зворотній швидкості зношування або інтенсивності зношування. Зносостійкість залежить від складу і структури оброблюваного матеріалу, вихідної твердості і шорсткості поверхні, стану у відповідь деталі.

**Знос** — зміна розмірів, форми, маси або стану поверхні виробу внаслідок руйнування (зносу) мікрооб'ємів поверхневого шару виробу при терті.

Знос деталей машин залежить від умов тертя, властивостей матеріалу і конструкції. Знос можна розглядати як механічний процес, ускладнений дією фізичних і хімічних чинників, що викликають зниження міцності поверхневого шару. За умовами зовнішньої дії на поверхневий шар розрізняють знос: механічний (він буває абразивним, ерозійним, втомним і кавітацією), молекулярно-механічний (виявляється у вигляді схоплювання і заїдання), корозійно-механічний (виявляється у формі окислювального зношування при фретинг-корозії). Знос призводить до зниження функціональних якостей виробів і до втрати їх споживчої цінності. Збільшенню зносостійкості виробів сприяють як вживання матеріалів з високою зносостійкістю, так і конструктивні рішення, що забезпечують компенсацію зносу, резервування зносостійкості і інше; загальне поліпшення умов тертя (вживання високоякісних змащувальних матеріалів, захисту від абразивної дії).

**Втомна міцність** — це здатність деталей машин чинити опір руйнуванню протягом певного проміжку часу при дії на них знакозмінних навантажень.

**Втома** — це процес поступового виникнення і розвитку тріщин під впливом багатократних повторюваних силових дій на метал.

Характер втомного руйнування залежить від виду напруженого стану, у зв'язку з чим розрізняють втому при розтягуванні-стискуванні, згинанні, крученні, і контактну втому.

Найчастіше напруження в деталях змінюються в часі по синусоїдальному закону. Число циклів до моменту руйнування залежить від величини напруження і змінюється у широких межах. При великих напруженнях для

руйнування буває досить 5-10 циклів. При менших — деталь витримує мільйони і мільярди циклів, а при незначних — здатна працювати необмежено довго.

Після руйнування на поверхні зламу деталі (рис. 3.1) виявляються зазвичай дві яскраво виражені зони. У одній зоні (А) кристали майже не розрізняються неозброєним оком, поверхня зламу має згладжені контури. У іншій зоні (Б) явно виступають ознаки свіжого крихкого руйнування, кристали мають гостре ограновування і блискучу чисту поверхню [3].

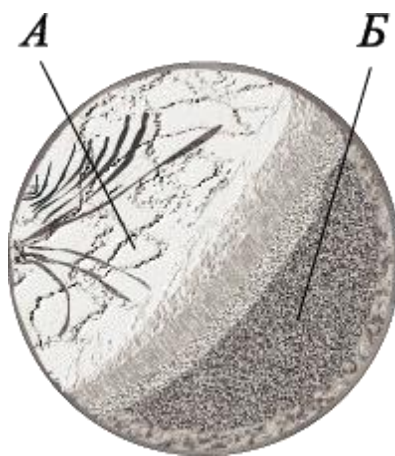


Рисунок 3.1 — Поверхня зламу при втомному руйнуванні [3]

Початок руйнування носить місцевий характер. У зоні підвищеного напруження, обумовленого конструктивними, технологічними або структурними чинниками, може утворитися мікротріщина. При багатократній зміні напруження кристали, розташовані в зоні тріщини, починають руйнуватися і тріщина проникає в глиб тіла.

Дотичні поверхні в зоні тріщини перебувають в контактній взаємодії, внаслідок чого кристали стираються, а поверхні набувають зовнішнього вигляду дрібнозернистої структури. Так утворюється одна із зон поверхні майбутнього зламу.



В результаті розвитку тріщини переріз ослаблюється. На останньому етапі відбувається раптове руйнування. Злам має характерну поверхню з неушкодженими чистими кристалами.

Слід зазначити, що межа втоми не є характеристикою лише властивостей матеріалу, як, наприклад, модуль пружності. Розрахункова напруга для зразка не визначає повністю процес втомного руйнування. В результаті утворення тріщини величина напруженостей і закони їх розподілу в зразку безперервно міняються залежно від умов подальшого розвитку тріщини. Останні ж у свою чергу залежать від абсолютних розмірів зразка, від характеру прикладення зовнішніх сил і якості поверхні деталі. Все це неминуче позначається на граничному числі циклів і на величині межі втоми.

В результаті вказаних обставин, наприклад, межа втоми, отримана в умовах циклічного розтягування і стискування, виявляється на 10-20% нижче, ніж межа втоми, отримана при згинанні. Межа втоми при крученні суцільних зразків відрізняється від межі втоми, отриманої для порожнистих зразків, і т.п.

Найбільш характерними деталями, схильними до втомного руйнування, є колінчасті вали, шатуни, шатунні болти, зуби шестерень, кільця підшипників, пружини, торсіонні вали.

**Герметичність з'єднань** визначає їх здатність утримувати витік газу або рідини. В результаті проведених досліджень з'ясувалося, що герметичність з'єднань разом з геометрією ущільнення, фізико-механічними властивостями його матеріалу і чинниками зовнішньої дії також залежить від параметрів шорсткості, хвилястості, макровідхилення і зміцнення контактуючих поверхонь.

**Контактна жорсткість** визначає здатність поверхневих шарів деталей, що знаходяться в контакті, чинити опір дії сил, що прагнуть їх деформувати. Контактна жорсткість значно впливає на точність роботи механізмів, на точність установки деталей на верстатах і в пристосуваннях, на точність обробки деталей, а в результаті — на якість машинобудівних виробів.

### 3.3 Висновки за розділом

Отже, надійність автомобіля залежить від надійності елементів і систем, з яких вона складається, а надійність останніх визначаються їх якістю. Тому проблема якості і надійності деталей машин є актуальною в машинобудуванні.

Як було сказано раніше, надійність характеризується властивостями, що виявляються в процесі експлуатації виробу, тому ми будемо розглядати якість поверхні в аспекті забезпечення експлуатаційних властивостей деталей машин.

## 4. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНІ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### 4.1 Аналіз впливу фізико-механічних властивостей поверхні

**Зносостійкість**, в першу чергу, визначається якістю поверхні деталей. На процеси тертя і зносу впливають такі фізико-механічні властивості поверхневого шару, як твердість і залишкове напруження, глибина і міра деформаційного зміцнення, структурний стан металу [25].

Попереднє зміцнення (підвищення твердості) металу поверхневого шару сприяє підвищенню зносостійкості деталі. При цьому зменшується стирання і зминання поверхонь при безпосередньому контакті, а також взаємне проникнення, що виникає при механічній і молекулярній взаємодії. Підвищення твердості перешкоджає розвитку спільної пластичної деформації деталей, яка сприяє захопленню, що є найбільш інтенсивним видом зносу.

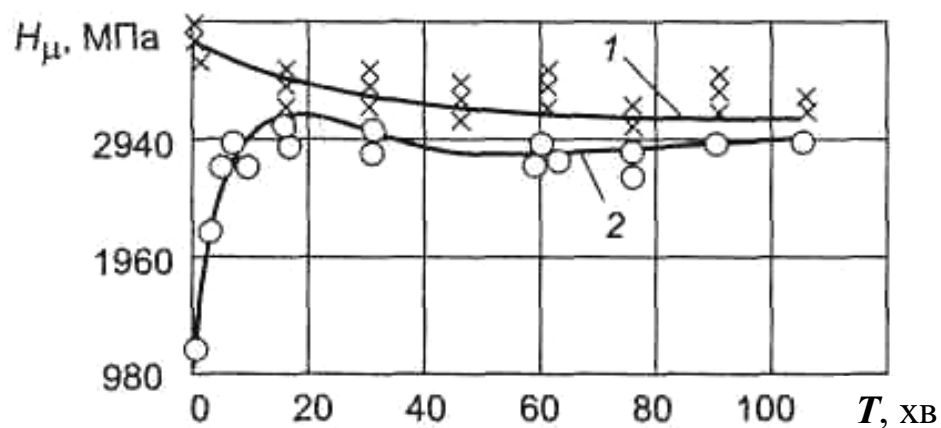
Попередній наклеп активує поверхневий шар. При цьому з більшою швидкістю утворюються тверді хімічні сполуки металу з киснем, характерні для окислювального зносу, який протікає з меншою інтенсивністю.

Крім того наклеп, знижуючи початковий знос, істотно впливає на загальний знос деталей в процесі експлуатації. Важливо відзначити, що позитивний вплив попереднього наклепу на зносостійкість деталей виявляється як в умовах рідинного тертя, так і в умовах сухого.

В період припрацювання на поверхнях, що труться, формується не лише оптимальна шорсткість, але і оптимальна мікротвердість металу поверхневого шару.

У тих випадках, коли мікротвердість поверхневого шару до початку процесу зносу невелика, а саме зношування відбувається при великих навантаженнях, в процесі припрацювання мікротвердість збільшується і тривалість припрацювання визначається інтенсивністю її зростання (рис. 4.1). Якщо ж мікротвердість металу поверхневого шару до зносу досить велика, то

тривалість припрацювання залежить від швидкості зносу і пластичного зминання нерівностей поверхні. При цьому за рахунок зносу найбільш зміцненого поверхневого шару може статися зниження мікротвердості до деякого оптимального значення, при якому забезпечується рівність несучої здатності поверхні і зовнішнього навантаження. У останньому випадку досягнення оптимальної мікротвердості безпосередньо не пов'язане з періодом припрацювання і може статися до його закінчення або в зоні сталого зносу.



1 і 2 — поверхні з різною початковою мікротвердістю

Рисунок 4.1 — Зміна мікротвердості зразків із сталі 20 в процесі зносу [1]

Позитивний вплив наклепу на зносостійкість поверхонь, що працюють в умовах тертя, виявляється до певної міри первинного наклепу.

При подальшому збільшенні навантаження перезміцнені і крихкі зони металу відшаровуються від його основної маси, починається прискорений його знос. Таким чином, залежність зносостійкості від глибини і міри наклепу поверхневого шару не являється монотонною: максимальне зниження зносу досягається після обробки з певними (оптимальними) значеннями міри ( $U_H$ ) і глибини наклепу ( $h_H$ ).

Тому зміцнення металу поверхневого шару в процесі механічної обробки деталей і під час спеціальних зміцнюючих операцій слід проводити при строго регламентованому наклепі, що запобігає виникненню перенаклепу. Необхідно також враховувати, що наклеп — явище оборотне, тобто при підвищенні температури можливе зменшення або повне зняття наклепу в металі поверхневого шару. У зв'язку з чим наявність наклепу за певних умов зносу ефективно (наприклад, сухе тертя ковзання при високих швидкостях).

При виконанні зміцнюючої обробки в поверхневому шарі деталі виникає не лише зміцнення (підвищення твердості), але і відбувається утворення залишкових напружень. Зокрема, при механічній обробці пластична деформація сприяє утворенню залишкового напруження стискування.

У початковий період тертя деталей в їх поверхневому шарі такі напруження, створені попередньою обробкою, являються пружними і знімаються під дією протікаючих пластичних деформацій незалежно від їх знаку.

Одночасно в поверхневому шарі в результаті тертя виникає залишкове напруження стискування, яке залежить від умов тертя і пластичних властивостей металів, що труться, і не залежить від величини і знаку залишкового напруження, створеного попередньою обробкою до початку тертя.

В процесі тертя і знос в металі поверхневого шару протікає інтенсивна пластична деформація, яка не може бути створена жодною механічною обробкою. Абсолютно природно, що пластична деформація повністю знімає залишкові напруження в поверхневому шарі, що збереглися в ньому до зносу, тому таке напруження не встигає проявити свого впливу на знос деталей.

Напружений стан всього перерізу деталі (наприклад, розтягуючі внутрішні напруження в стінках втулки, напресованої на іншу деталь) може вплинути на характер і інтенсивність зносу.

**Втомна міцність** деталей машин залежить від зміцнення металу поверхневого шару. Зміцнення металу до певних меж зменшує амплітуду циклічної пластичної деформації і запобігає виникненню субмікроскопічних

порушень суцільності (розпушування), що породжують розвиток втомних тріщин.

У деталей з твердим зміцненим шаром при циклічних навантаженнях, виникають напруження, які перевищують границю міцності, і в результаті зароджуються втомні тріщини, частіше за все, не в зміцненому шарі деталі, а в її глибині. Утворення подібних тріщин під зміцненим шаром і їх подальше збільшення відбуваються при вищих напруженнях і більшому числі циклів навантаження, ніж в умовах відсутності зміцнення.

Вплив наведених факторів приводить до помітного підвищення втомної міцності деталей машин в результаті зміцнення їх поверхневого шару.

Як показують результати численних досліджень, при наклепуванні металу поверхневого шару, підвищення втомної міцності деталей машин, що працюють в умовах нормальної кімнатної температури, може досягти 25–30 %.

Знак і величина залишкового напруження також суттєво впливають на втомну міцність деталей машин. Залишкові напруження стискування більшою мірою підвищують межу витривалості, ніж знижують її такі ж по величині залишкові напруження розтягування. Для сталей підвищеної твердості підвищення межі витривалості завдяки дії стискуючого напруження досягає 50 %, а зниження її під дією розтягуючих — 30 %.

Особливо великий вплив залишкового напруження на границю витривалості здійснюється в тому разі, коли різниця міцності сталі при розтягуванні і стискуванні є значною. Тому границя витривалості твердих сталей залежить від величини і знаку залишкового напруження особливо сильно, тоді як в м'яких і пластичних сталей ця залежність виявляється у меншій мірі.

При високій температурі нагріву і циклічному навантаженні залишкові макронапруження незалежно від їх значення і знаку мало або взагалі не впливають на опір втомі. Це обумовлено перш за все швидкою релаксацією залишкового напруження при нагріві деталей.

Теплота, що виділяється в зоні різання при різних методах механічної обробки в певних умовах (напружені режими різання, притуплювання ріжучого інструменту і засалювання абразивного круга надмірно високої твердості, недостатнє охолодження і ін.), викликає структурні зміни металу поверхневого шару. При обробці металів, що сприймають гартування, може статися часткове гартування металу поверхневого шару, а при обробці загартованих металів — відпуск різної міри.

Структурні зміни металу поверхневого шару при його механічній обробці є серйозною причиною зниження якості деталей.

Ділянки м'якого металу мають знижену зносостійкість. Зазвичай в зонах відпущеного металу розвиваються залишкові напруження розтягування, що знижують втомну міцність деталей. При цьому на границі ділянок із зміненою структурою часто утворюються шліфувальні тріщини, які являються зонами втомних руйнувань.

На втомну міцність впливають розмір зерна і границі зерен металу деталі. При внутрішньозеренному руйнуванні границі зерен грають роль бар'єрів, що перешкоджають поширенню втомних тріщин. Тому дрібнозерниста структура повинна чинити вищий опір втомі, ніж крупнозерниста. У крупнозернистому металі тріщина поширюється на більшу відстань (пропорційно розміру зерна), ніж в дрібнозернистому.

Проте якщо термічна обробка, що приводить до подрібнення зерна, ослабляє міцність границі зерен, то поширення тріщин через границі зерен полегшується і переваги дрібнозернистої структури в порівнянні з крупнозернистою не спостерігаються.

**Корозійна стійкість** деталей визначається такими характеристиками якості поверхні, як: кристалічна структура матеріалу, шорсткість, внутрішні напруження, наявність різних структурних дефектів. Встановлено, що чим вище щільність упаковки кристалічної структури, тим нижче швидкість корозії. Із збільшенням шорсткості поверхні корозійна стійкість металів знижується, оскільки полегшується змочування і збільшується число активних місць.

На гладкій поверхні після тонкої обробки (шліфовки, поліровки) формується щільніша і однорідніша плівка оксидів, що захищає метал від корозії. При утворенні плівок на поверхні деталі має значення відповідність кристалографічної структури металу і плівки. Швидкість корозії максимумна на дефектах структури, перехідних областях і межах зерен.

Величина зерна робить незначний вплив на швидкість корозії. Лише для випадку міжкристалітної корозії збільшення розміру зерна збільшує швидкість корозії, оскільки загальна протяжність меж зерен, де йде локальне руйнування, стає меншим.

Деформація металу в процесі нагріву може викликати порушення суцільності плівок і збільшувати з цієї причини швидкість корозії.

Найбільш небезпечним виглядом корозії є корозійне розтріскування при одночасній дії корозійного середовища і розтягуючого зовнішнього або внутрішнього напруження. Встановлено, що внутрішні напруження розтягування знижують, а стискування — підвищують опір корозійному розтріскуванню сплавів. Причинами, що викликають внутрішні напруження при механічній обробці, є пластична деформація, нагрівання і пов'язані з цим фазові перетворення в поверхневих шарах, а також насичення воднем сталей, що відбувається в кислих середовищах. Корозійне розтріскування характеризується утворенням міжкристалітних, транскристалітних і змішаних тріщин з розгалуженнями, напрям яких перпендикулярний розтягуючому напруженню.

Тому створення в поверхневих шарах металів стискуючого напруження шляхом обдування дробом або обкатки роликком, поверхнєве зміцнення струмами високої частоти або дробоструйним наклепанням, використання захисних покриттів збільшує корозійну стійкість сплавів.

При поверхневому наклепі або дробоструйній обробці на поверхні металу виникають напруження стискування, які ефективно запобігають корозійному розтріскуванню, поки стислі шари залишаються суцільними і не ушкоджуються в результаті загальної корозії.



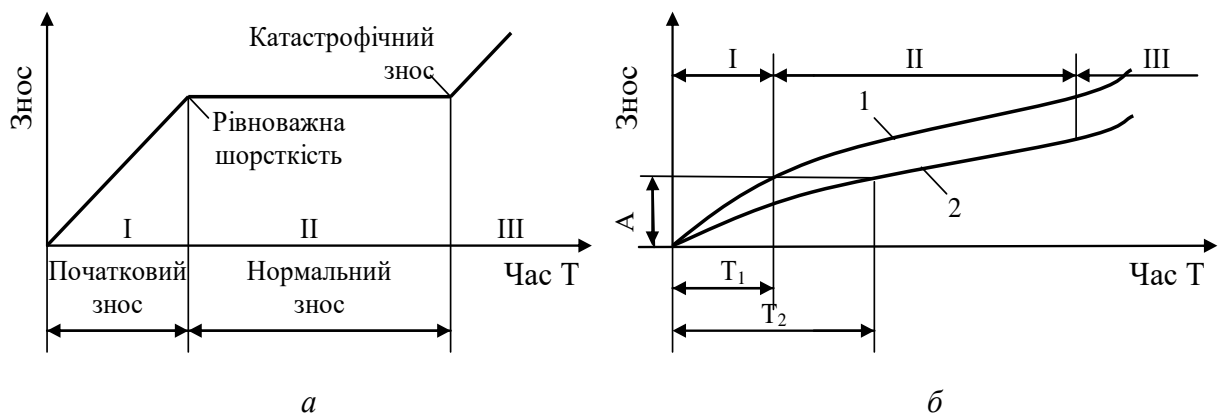
#### 4.2 Аналіз впливу фізико-хімічних властивостей поверхні

Фізико-хімічні властивості поверхні характеризуються наявністю на металевій поверхні різних плівок, міцно пов'язаних з основним металом. Працездатність поверхні визначається властивостями матеріалу, з якого виготовлена деталь, і хімічним складом поверхневого шару. Конструкційні сталі володіють високою втомною і статичною міцністю. Легування низко- і середньовуглецевих сталей марганцем, нікелем, хромом, молібденом, ванадієм і іншими елементами приводить до збільшення межі міцності і сприяє циклічній міцності. При цьому поверхневий шар металу володіє великою активністю, тому поверхнево-активне середовище впливає на процеси деформації і руйнування твердих тіл. шляхом фізичної адсорбції поверхнево-активних речовин з довкілля, значно знижуючи їх опір деформації і руйнуванню. Ефект зниження міцності був встановлений проф. П. А. Ребіндером і названий його ім'ям [1].

Фізико-хімічні властивості поверхні істотно впливають на зносостійкість деталей, на інтенсивність зносу пар, що труться. При значних висотних параметрах мікронерівностей поверхні створюються сприятливі умови для захоплення і інтенсивної молекулярно-механічної взаємодії. Підвищеному початковому зносу в період припрацювання сприяє виникнення в точках контакту високих миттєвих температур і зрив оксидної плівки, яка покриває метали, що супроводжується молекулярним зчепленням металів, що труться, і утворенням вузлів захоплення. Порушення захисної плівки металу в умовах тертя залежить від хімічної схожості контактуючих поверхонь. Для підвищення зносостійкості і корозійної стійкості деталей застосовують технології напилення або осадження спеціальних покриттів. При цьому велике значення має відповідність кристалографічної структури металу і плівки.

#### 4.3. Аналіз впливу геометричних характеристик поверхні

**Тертя і знос деталей** в значній мірі пов'язані з макронерівностями, хвилястістю, мікронерівностями, а також з напрямом штрихів (слідів) обробки. При взаємному переміщенні контактуючих поверхонь, що мають мікронерівності, спочатку відбувається зріз, відламування і пластичне зрушення вершин нерівностей, оскільки їх контакт відбувається по вершинах нерівностей. Залежність зносу від часу роботи поверхонь, що труться, видно з графіків (рис. 4.2). Спочатку порівняно швидко (ділянка I) за період часу  $T_1$  відбувається початковий знос (припрацювання). При правильному режимі змазування знос протікає повільно (ділянка II), що обумовлюється утворенням рівноважної шорсткості. Цей період часу визначає термін служби деталі. Катастрофічний знос пари характеризується ділянкою III.



а — загальна схема зносу; б — знос поверхонь з різними параметрами шорсткості

Рисунок 4.2 — Типові графіки зносу в часі

На рис. 4.2 крива 2 характеризує знос поверхонь з меншими початковими мікронерівностями, ніж крива 1. В цьому випадку величина і час припрацювального зносу зменшуються, а інтенсивність експлуатаційного зносу залишається такою ж. При меншій шорсткості контактуючих поверхонь час роботи деталей буде більшим ( $T_2 > T_1$ ) [1].

Коефіцієнт тертя пов'язаний з напрямом нерівностей і їх висотою. При поєднанні поверхонь, що мають однаковий напрям нерівностей, і при їх перпендикулярному напрямі до руху, коефіцієнт тертя досягає максимального значення. При перпендикулярному напрямі нерівностей поверхонь, що труться, або при їх хаотичному розташуванні, що спостерігається при суперфінішуванні, коефіцієнт тертя мінімальний.

В процесі тертя шорсткість поверхні змінюється в розмірах і навіть формою, набуваючи напрямку у бік руху деталі, і прагне до деякого стабільного значення. Вихідна шорстка поверхня вигладжуватиметься, а вихідна гладка ставати шорсткою. За однакових зовнішніх умов тертя однойменних матеріалів після припрацювання обидві шорсткості будуть однаковими, набувши так званого значення рівноважної (оптимальної) шорсткості, яка забезпечує мінімальний знос і зберігається в процесі тривалої експлуатації. Якщо оптимальну для даних умов тертя висоту нерівностей вдається створити в процесі механічної обробки, то в процесі зносу вона не змінюється, а час припрацювання і знос виявляються найменшими.

Як високі і гострі, так і досить пологі мікронерівності під впливом сил тертя прагнуть до деякого проміжного значення. Очевидним є те, що високі гострі мікронерівності згладжуються під впливом напруження, що виникає на виступах. Причини, що приводять до руйнування гладких поверхонь, які мають пологі мікронерівності, пов'язані з низькою швидкістю відновлення захисної плівки і швидким її зносом на гладких поверхнях. Цим і обумовлена неможливість існування поверхонь, що мають високу гладкість, тобто великі плями контакту. Процес формування рівноважної шорсткості схематично зображений на рис. 4.3. Зліва показаний контакт ідеально гладких поверхонь. В процесі тертя виникаючі мікрозадири поступово згладжуються і нерівності доходять до рівноважної конфігурації. Дуже високі і гострі виступи, зображені на правій частині графіка, поступово згладжуються і також приходять до рівноважної шорсткості. Якщо в останньому випадку (права частина кривої) протікання процесу залежить від механічних властивостей тіл (твердості, межі

текучості), то порушення захисної ролі плівки (ліва частина кривої) залежить від молекулярних, атомарних характеристик, поверхневої енергії, хімічної схожості, а головне від газового або рідинного голодування, що виникають унаслідок звуження зазору.

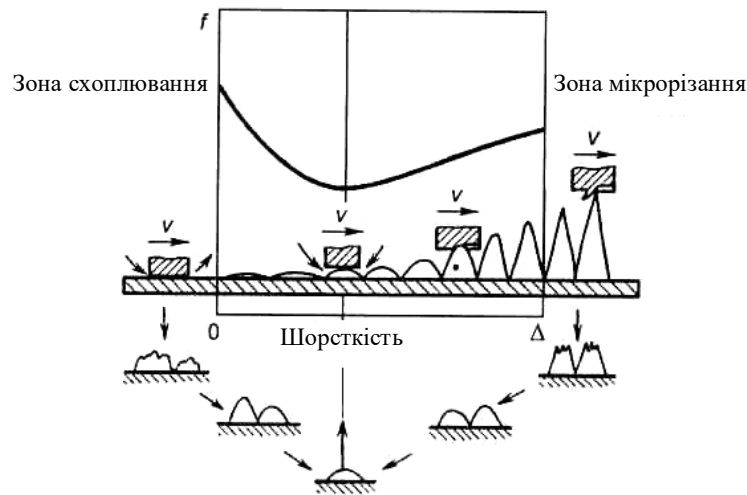


Рисунок 4.3 — Схема формування рівноважної шорсткості

Вихідна шорсткість (технологічний мікрорельєф), визначена технологією виготовлення деталей, впливає на зносостійкість з'єднання переважно лише через припрацювання. Під припрацюванням розуміється процес зміни мікрогеометрії поверхні тертя і фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалу в початковий період тертя, що зазвичай виявляється за постійних зовнішніх умов в зменшенні роботи тертя, температури і інтенсивності зносу.

Рівноважна шорсткість для сталого процесу відповідає мінімальному значенню сил тертя за інших незмінних умов. В процесі припрацювання вихідний (технологічний) мікрорельєф перетворюється в експлуатаційний (рис. 4.4).

Підвищеному початковому зносу в період припрацювання в деяких випадках сприяє виникнення в точках контакту високих миттєвих температур і

зрив оксидної плівки, що покриває метали, що супроводжується молекулярним зчепленням металів, що труться, і утворенням вузлів схоплювання.

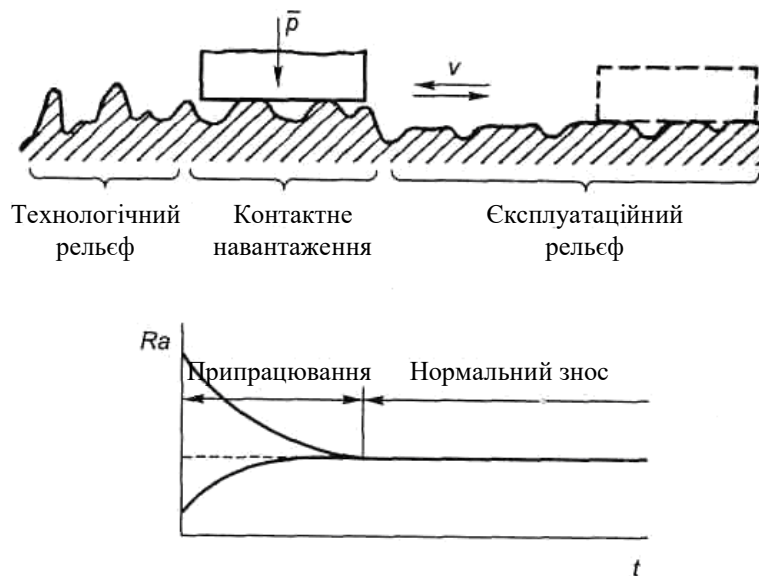


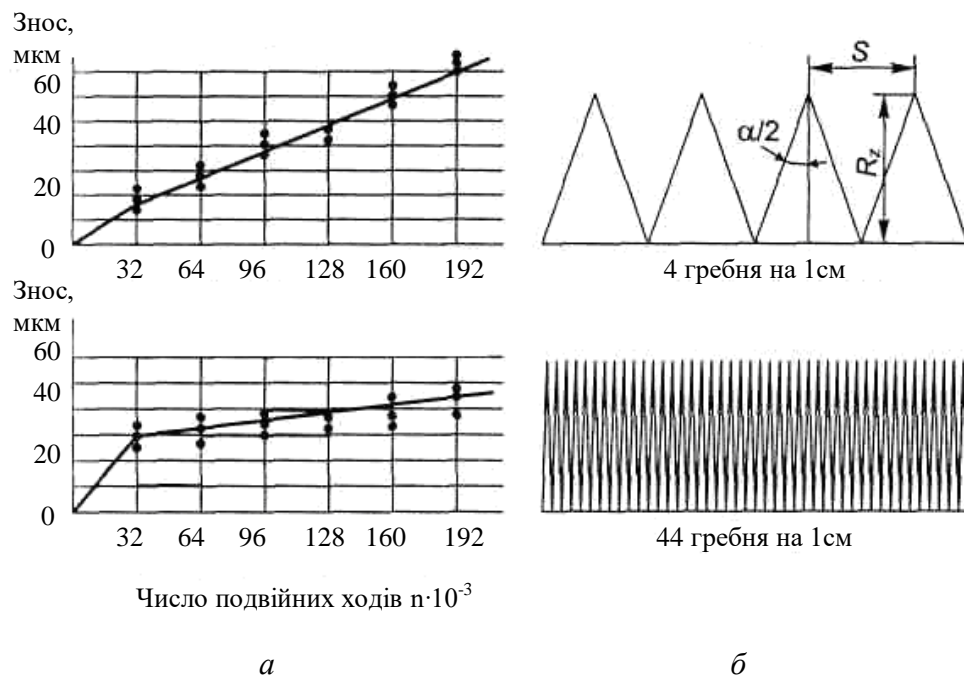
Рисунок 4.4 — Схема трансформації технологічного мікрорельєфу поверхні в експлуатаційний

Розглядаючи диференціювання характеристики шорсткості поверхні, необхідно відзначити, що висота мікронерівностей поверхні робить складний вплив на інтенсивність зносу. При дуже малих значеннях  $Rz$  створюються сприятливі умови для схоплювання і інтенсивної молекулярно-механічної взаємодії. Із збільшенням висоти мікронерівностей доля молекулярної складової сили тертя знижується, але при цьому зростає механічна складова. В результаті із збільшенням  $Rz$  збільшується знос поверхні. При великих значеннях висот мікронерівностей і відносно низькій твердості протилежної поверхні знос може набути абразивного характеру.

Шорсткість і хвилястість поверхні для процесу зносу не обмежуються впливом висоти нерівностей і розмірів фактичної поверхні контакту, а пов'язані також з кроком і формою нерівностей. На рис. 4.5б представлені форми

нерівностей двох зразків, що мають однакові висотні характеристики і форму кривих опорної поверхні, а на рис. 4.5а — криві зносу цих зразків.

Наведені дані показують, що в умовах проведеного дослідження тонкі і багаточисельні нерівності забезпечують більшу зносостійкість, ніж крупні нерівності великого кроку. Через  $n = 160\,000$  подвійних ходів знос поверхні з нерівностями малого кроку досяг 40 мкм, тоді як знос поверхні з нерівностями великого кроку досяг 60 мкм. Крім того, в зразка з нерівностями більшого кроку до моменту закінчення дослідження не закінчився період припрацювання.



*a* — криві зносу поверхонь; *б* — поверхні з різною формою нерівностей при однакових висотних параметрах [1]

Рисунок 4.5 — Знос поверхонь з різною формою мікронерівностей

Під терміном «оптимальна мікрогеометрія» необхідно розуміти оптимальні значення всіх характеристик мікрогеометрії (висота, крок і форма нерівностей (радіус западин, радіус виступів, кут нахилу нерівностей та ін.))

або певного комплексного вираження, що відображає властивості шорсткої поверхні і її впливу на зносостійкість.

Як таке вираження доцільно використовувати комплексну безрозмірну характеристику шорсткості поверхні:

$$\Delta = \frac{R_{max}}{\rho \cdot b^{1/\gamma}}, \quad (4.1)$$

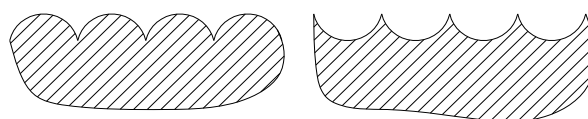
де  $R_{max}$  — найбільша висота нерівностей профілю, мкм;

$\rho$  — радіус закруглення вершин нерівностей, мкм;

$b$  і  $\gamma$  — параметри кривої опорної поверхні.

В процесі припрацювання, не дивлячись на значне коливання окремих характеристик мікрогеометрії, має місце монотонне зменшення комплексу  $\Delta$ . Отже, встановлення оптимальних параметрів шорсткості поверхні при нормуванні дозволяє зменшити знос деталей при експлуатації.

При розгляді впливу мікрогеометрії на **втомну міцність** деталей машин необхідно мати на увазі, що западини мікрорельєфу є концентраторами напруження. З цієї точки зору особливо небезпечні глибокі западини з малим радіусом закруглення дна (рис. 4.6а). Такі западини грають роль щонайпотужніших концентраторів напруження, що різко знижує втомну міцність. Западини мікронерівностей із закругленою формою дна (рис. 4.6б), навпаки, збільшують межу витривалості. Шорсткість поверхні значно впливає на втомну міцність деталей, виготовлених з високоміцних легованих і інших сталей, що працюють в умовах циклічних навантажень.



а

б

*a* — западини мікрорельєфу з малим радіусом закруглення дна;

*б* — западини із закругленою формою дна

Рисунок 4.6 — Профілі поверхонь, що мають різну форму мікронерівностей:

**Втомна міцність** деталей значно залежить від шорсткості їх поверхонь. Наявність на поверхні деталі, що працює в умовах циклічного і знакозмінного навантажень, окремих дефектів і нерівностей сприяє концентрації напруження, яка може перевищити межу міцності металу. В цьому випадку поверхневі дефекти і оброблювальні ризики грають роль джерела виникнення субмікроскопічних порушень суцільності металу поверхневого шару і його розпушування, що є першопричиною утворення втомних тріщин.

Експериментальні графіки (рис. 4.7) показують, що при збільшенні параметра шорсткості відпаленої сталі 45 з  $Rz = 3,2$  мкм до  $Rz = 75$  мкм межа її витривалості знижується з 285 МПа до 200 МПа, тобто на 30 %. Особливо різко знижується межа витривалості при збільшенні шорсткості найбільш гладких поверхонь [1].

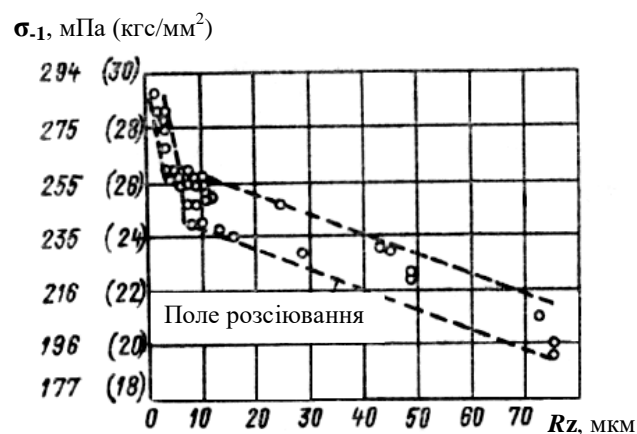


Рисунок 4.7 — Залежність границі витривалості від висоти нерівностей

[1]



**Контактна жорсткість** вузлів машин залежить від висоти нерівностей поверхонь, кроку нерівностей, опорної довжини профілю, взаємного розташування слідів обробки і інших чинників. Наприклад, при перпендикулярному розташуванні слідів обробки жорсткість стику максимальна. Величина пластичної деформації при контакті зменшується при збільшенні відносної опорної довжини профілю і при зменшенні шорсткості.

**Герметичність з'єднань** разом з геометрією ущільнення, фізико-механичними властивостями матеріалу і чинниками зовнішньої дії також залежить від стану контактуючих поверхонь: параметрів шорсткості  $Ra$ , хвилястості  $Wz$  і макровідхилення  $H_{max}$ .

Можливості різних методів обробки зовнішніх і внутрішніх поверхонь обертання в забезпеченні вказаних параметрів стану поверхневого шару представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 — Можливості методів обробки поверхонь обертання

Метод обробки	Параметри стану поверхневого шару					
	Обробка зовнішніх поверхонь обертання			Обробка внутрішніх поверхонь обертання		
	$Ra$ , мкм	$Wz$ , мкм	$H_{max}$ , мкм	$Ra$ , мкм	$Wz$ , мкм	$H_{max}$ , мкм
Точіння	0,80-2,50	1,60-4,00	40,00-100,00	0,80-2,00	2,50-6,25	20,00-80,00
Шліфування	0,20-1,25	0,50-4,00	10,00-40,00	0,32-1,60	1,25-6,25	10,00-40,00
Обкатування	0,05-1,00	0,40-2,50	6,00-40,00	0,05-0,32	1,60-5,00	5,00-40,00

Графіки залежності герметичності з'єднання, що характеризується витіком  $Q$ , від шорсткості  $Ra$  при різних методах обробки (точіння, шліфування, обкатування) поверхонь обертання представлені на рис. 4.8.

На підставі аналізу графіків встановлено, що при обробці поверхонь обертання методами поверхнево-пластичної деформації витік знижується, тобто герметичність підвищується, в 1,3 — 1,7 разів порівняно з алмазно-

абразивною обробкою за однакових умов експлуатації за рахунок поліпшення параметрів стану поверхневого шару [1].

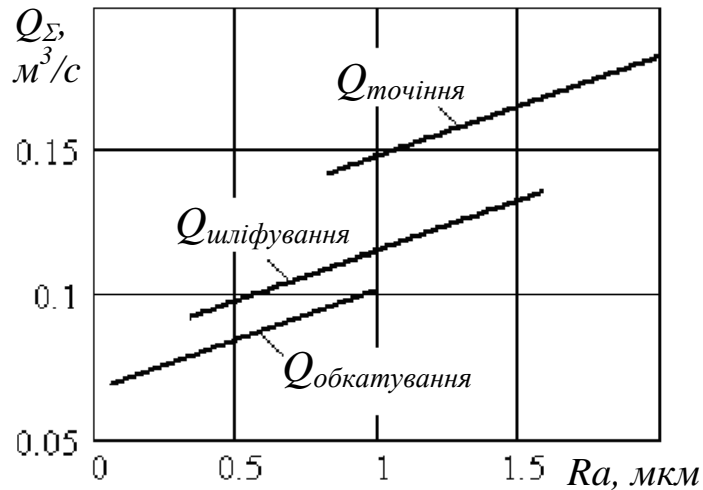


Рисунок 4.8 — Графіки залежності виточу від шорсткості поверхні при різних методах обробки поверхонь [2]

**Точність сполучення**, встановлена кресленням і визначається зазором в з'єднанні, в значній мірі залежить від шорсткості дотичних поверхонь.

Раніше вказувалося, що в період початкового зносу висота нерівностей може зменшитися на 65 %— 75 %. При малих розмірах деталей і шорсткості поверхонь з  $Rz = 3$  — 10 мкм подвійна висота нерівностей  $2Rz$  однакова з полем допуску на виготовлення деталі. Це означає, що в період початкового зносу поверхонь додатковий зазор в з'єднанні може досягти значення допуску на виготовлення деталі і точність з'єднання буде повністю порушена. Замість заданого кресленням з'єднання сьомого квалітета точності фактично виникає з'єднання восьмого або дев'ятого, порушується характер посадок і т.п.

Щоб запобігти цьому необхідно у випадках відповідальних сполучень, від яких вимагається тривале збереження встановленої конструктором точності, проводити обробку деталей досягаючи мінімальної шорсткості поверхонь, що труться.

При цьому рекомендується встановлювати необхідну висоту шорсткості залежно від заданої точності проектованого сполучення за допомогою розрахунку по формулам:

при діаметрі сполучення понад 50 мм:

$$R_z = (0,10 - 0,15) T; \quad (4.1)$$

при діаметрі сполучення від 18 до 50 мм:

$$R_z = (0,15 - 0,20) T; \quad (4.2)$$

при діаметрі сполучення менше 18 мм:

$$R_z = (0,20 - 0,25) T, \quad (4.3)$$

де поле допуску  $T$  деталі і висота нерівностей  $R_z$  виражені в мікрометрах.

**Міцність пресових з'єднань** безпосередньо пов'язана з шорсткістю з'єднаних поверхонь. Із збільшенням висоти нерівностей поверхонь міцність пресових з'єднань знижується. Наприклад, міцність пресового з'єднання маточини вагонного колеса з віссю при висоті нерівностей 36,5 мкм виявилася на 40 % нижчою за міцність такого ж з'єднання з висотою нерівностей 18 мкм (не дивлячись на те, що натяг в другому з'єднанні був на 15 % меншим) [2].

Шорсткість поверхні впливає також на **якість покриттів**. Параметри нерівностей відносно тонких покриттів залежать від параметрів нерівностей основи. При нанесенні покриттів на основу з дуже малою висотою нерівностей можливе зменшення міцності зчеплення нанесеного покриття з металом і відшарування покриття. Для підвищення якості покриттів необхідно нормувати крокові і висотні параметри шорсткості.

При нормуванні шорсткості поверхонь деталей, що входять в з'єднання, слід враховувати, що експлуатаційні характеристики з'єднання залежать не

лише від шорсткості поверхні окремих деталей, але і від їх взаємного поєднання. Наприклад, для підвищення контактної жорсткості необхідно, аби обидві контактуючі поверхні мали приблизно однакову шорсткість.

В обґрунтованих випадках встановлюють вимоги до напрямку нерівностей поверхні. Наприклад, найменший коефіцієнт тертя і знос деталей досягається тоді, коли напрям руху не збігається з напрямом нерівностей, зокрема, при довільному напрямі нерівностей. Нерівності з довільним напрямом отримуються, наприклад, при суперфінішуванні і хонінгуванні.

При виборі числових значень параметрів шорсткості поверхні слід враховувати, що експлуатаційна шорсткість зазвичай відрізняється від технологічної. Вибрана шорсткість в більшості випадків не повинна істотно відрізнятися від експлуатаційної шорсткості.

Зносостійкість, втомна міцність, контактна жорсткість, герметичність з'єднань і інші експлуатаційні характеристики деталей машин у великій мірі залежать від хімічного складу і структури матеріалу, з якого виготовлені деталі, від показників мікротвердості і шорсткості поверхонь, що зрештою визначається технологією їх виготовлення.

#### 4.4 Дослідження якості поверхонь деталей машин

Випробування були проведені на шатунних болтах  $\varnothing 10$  мм двигуна ЗМЗ-406 (рис. 4.9).



Рисунок 4.9 — Шатунні болти для дослідження

**Шорсткість і профіль поверхні** досліджуваних зразків визначали профілографом-профілометром TR-200 (рис 4.10), дані з якого безпосередньо передавалися на ПК і систематизувалися. Погрішність виміру середнього арифметичного абсолютних значень відхилень профілю  $Ra$  складала  $\leq 10\%$ , відтворюваність величини, що відображується, — не більше  $6\%$ , діапазон вимірювання —  $0,005-16$  мкм.

Додатково визначали наступні параметри: висоту нерівностей профілю по десяти точках  $Rz$ , середній крок нерівностей профілю  $Sm$  і відносну опорну довжину профілю  $tp$ . Вимірювання проводили при кімнатній температурі і вологості не більше  $90\%$ . Дані, отримані в результаті дослідження, систематизували і знаходили середні значення параметрів шорсткості (таблиця. 4.2).

Інтерфейс профілографа-профілометра TR-200 сполученого з ПК і визначувані характеристики для прикладу зображені на рис. 4.11.

Таблиця 4.2 — Результати вимірювання шорсткості

№ п/п	$Ra^{cp}$ , (мкм)	$Rz^{cp}$ , (мкм)	$S^{cp}$ , (мм)	$Sm^{cp}$ ,(мм)	$t_{50}^{cp}$ , (%)
1	1,460	6,079	0,049	0,074	63,625
2	0,526	2,382	0,041	0,061	55,967
3	0,376	1,663	0,071	0,101	90,233
4	0,647	2,944	0,041	0,065	68,467
5	0,554	2,671	0,037	0,062	73,333
6	0,398	1,600	0,063	0,036	83,800
7	0,644	2,712	0,040	0,067	45,400
8	0,340	1,528	0,050	0,088	81,700
9	0,530	2,598	0,037	0,056	68,033
10	0,339	1,534	0,050	0,084	75,100



Рисунок 4.10 — Профілограф-профілометр TR-200

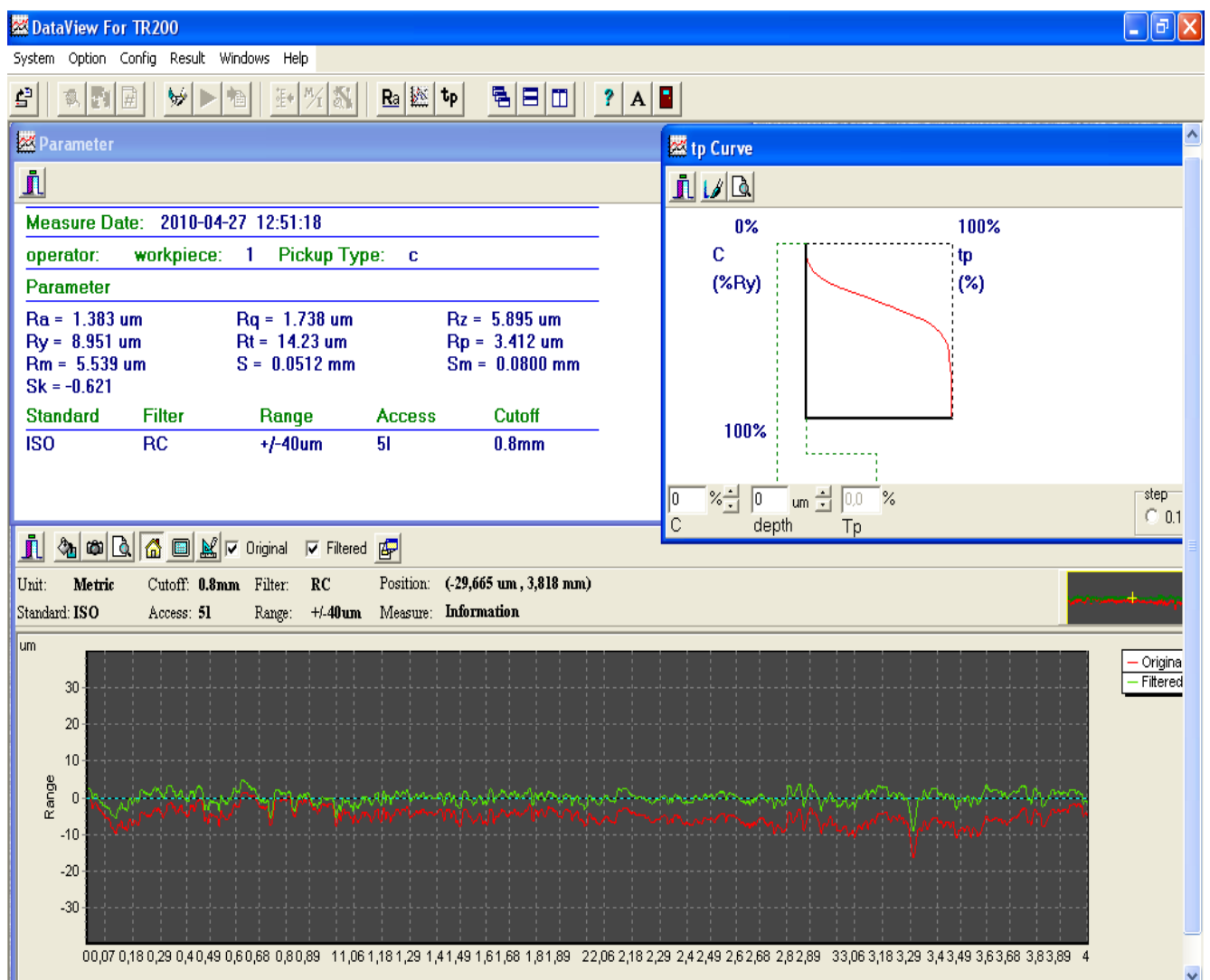


Рисунок 4.11 — Приклад інтерфейсу профілографа-профілометра TR-200, з'єднаного з ПК

Для визначення макровідхилень поверхонь болтів використовували мікрометр гладкий з електронним відліковим пристроєм мод. МКЦ(5)-50 (рис 4.12), похибка вимірів якого складає 0,002 мм.

Вимірювання геометричних параметрів проводили в трьох поперечних перерізах болта і в двох взаємоперпендикулярних площинах. Схема вимірювання приведена на рис. 4.13.



Рисунок 4.12 — мікрометр гладкий мод. МКЦ(5)-50

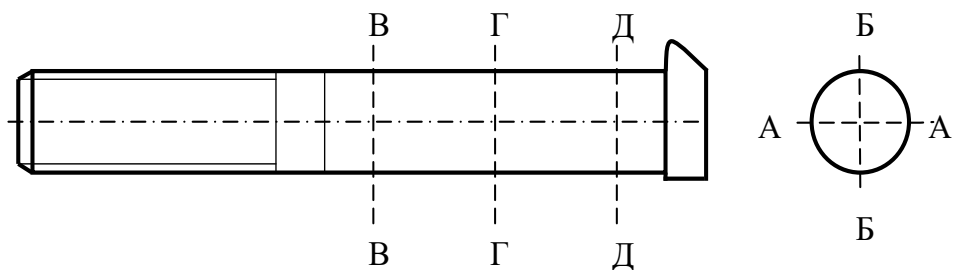


Рисунок 4.13 – Схема вимірювання болтів

Проаналізувавши отримані дані зробили відповідні висновки про відхилення форми (таблиця. 4.3). Кількісну оцінку відхилень визначили по формулі:

$$\Delta = \frac{d_{r\max} - d_{r\min}}{2}, \quad (4.4)$$

де  $d_{r\max}$  — найбільший реальний розмір поверхні;

$d_{r\min}$  — найменший реальний розмір поверхні.

Таблиця 4.3 — Результати вимірювань макрогеометрії болтів

№ п/п	(В-В) <sup>А</sup>	(В-В) <sup>Б</sup>	(Г-Г) <sup>А</sup>	(Г-Г) <sup>Б</sup>	(Д-Д) <sup>А</sup>	(Д-Д) <sup>Б</sup>	Відхилення форми
1	9,979	9,983	9,972	9,978	9,980	9,980	Сідлоподібність $\Delta=0,004$
2	10,000	10,001	9,995	9,979	10,000	10,001	Сідлоподібність $\Delta=0,011$
3	10,124	10,148	10,104	10,133	10,118	10,139	Сідлоподібність $\Delta=0,010$
4	10,103	10,088	10,082	10,085	10,077	10,112	Сідлоподібність $\Delta=0,013$
5	9,980	9,988	9,985	9,988	9,988	9,989	Конусоподібність $\Delta=0,004$
6	10,119	10,141	10,100	10,121	10,138	10,135	Сідлоподібність $\Delta=0,019$
7	9,990	9,990	9,989	9,989	9,986	9,987	Конусоподібність $\Delta=0,002$
8	10,121	10,143	10,106	10,135	10,116	10,136	Сідлоподібність $\Delta=0,008$
9	9,998	9,999	9,992	9,994	10,003	10,002	Сідлоподібність $\Delta=0,003$
10	10,124	10,142	10,000	10,115	10,123	10,137	Сідлоподібність $\Delta=0,062$

Для визначення мікротвердості поверхонь використовували мікротвердомер ПМТ-3. Індентором служив діамантовий наконечник у формі піраміди з квадратною основою і кутом при вершині 136 ° (індентор Віккерса). З метою оцінки твердості поверхневого шару варіювали навантаження на індентор (50 г–200 г). Після зняття навантаження визначали довжину діагоналей  $d$  відбитку і розраховували значення мікротвердості по формулі:



$$H = 1854 P/d^2, \quad (4.5)$$

де  $P$  — величина прикладеного навантаження, в гс;

$d$  — діагональ відбитка, мкм.

Отримані дані систематизували і обробляли за допомогою методів математичної статистики в середовищі Microsoft Excel. Значення мікротвердості усереднювались по всій вибірці (таблиця. 4.4).

Таблиця 4.4 — Результати вимірювання мікротвердості

Зразок, № п/п	Навантаження на індентор, г	Глибина проникнення індентора, мкм	Значення мікротвердості поверхні, кгс/мм <sup>2</sup>	$X_{cp}$
1	200	5,43	256,97	371,80
2	200	3,88	502,3	
3	200	5,38	260,98	
4	200	4,91	313,47	
5	200	4,42	388,1	
6	200	5,32	267,18	
7	200	4,85	322,34	
8	200	4,69	344,31	
9	200	4,41	389,02	
10	200	3,36	673,34	

Після описаних вище досліджень шатунних болтів деякі з них (2, 4, 5, 7, 8, 9) піддали поверхневому зміцненню – іонному бомбардуванню, і провели повторні вимірювання шорсткості (таблиця. 4.5) і мікротвердості (таблиця. 4.6).

Таблиця 4.5 — Параметри шорсткості болтів після ІБ

№ П/П	$Ra^{cp}$ , (мкм)	$Rz^{cp}$ , (мкм)	$S^{cp}$ , (мм)	$Sm^{cp}$ , (мм)	$t_{50}$ , (%)
2	0,531	2,520	0,038	0,066	72,033
4	0,742	2,982	0,0505	0,0762	69,800
5	0,581	2,814	0,036	0,056	71,900
7	0,543	2,756	0,036	0,0551	79,433
8	0,411	1,493	0,072	0,1414	54,367
9	0,618	2,727	0,043	0,077	59,633

Таблиця 4.6 — Значення мікротвердості болтів після ІБ

Зразок, №П/П	Значення мікротвердості поверхні, кгс/мм <sup>2</sup>		Зміна мікротвердості порівняно з вихідним станом поверхні, %
	Навантаження на індентор 200 г	Навантаження на індентор 50 г	
2	509,14	514,72	+2,47
4	274,15	289,53	-12,54
5	390,88	408,18	+0,72
7	324,44	333,05	+0,65
8	283,69	286,01	-17,66
9	395,57	404,24	+1,68

#### 4.5 Висновки за розділом

В результаті дослідження якості поверхонь шатунних болтів ми отримали дані про стан їх поверхневого шару. Варто зазначити, що жоден з досліджуваних болтів не був в експлуатації. З аналізу результатів видно, що показники мають досить великий розкид даних, і в межах вибірки представлені болти різного рівня якості, що безумовно відобразиться на їх надійності. В результаті обробки поверхонь іонним бомбардуванням нам вдалося дещо врівноважити показники шорсткості, а щодо мікротвердості — зміцнений шар настільки тонкий, що це суттєво не вплинуло на показники твердості вцілому. Тому болти № 1, 3, 4, 6, 7, 8 матимуть нижчі показники міцності і при експлуатації можуть зруйнуватися швидше за інші. Буде сприяти розриву і їх сідлоподібна форма.

## ВИСНОВКИ

1. Якість поверхні деталей машин обумовлюється фізико-механічними, фізико-хімічними і геометричними характеристиками поверхні. Ці характеристики визначаються властивостями матеріалу і технологією виготовлення деталі, вони також можуть змінюватися в процесі обробки поверхні та експлуатації виробу.

2. Експлуатаційні властивості деталей машин визначаються насамперед станом поверхневого шару деталей. На надійність виробу в процесі експлуатації впливають такі властивості поверхневого шару, як твердість і залишкове напруження, структурний стан металу, наявність захисної плівки чи спеціальних покриттів, висота і форма нерівностей профілю тощо. Тому важливо досягти оптимального набору показників якості поверхні в процесі виготовлення деталі.

3. При дослідженнях шатунних болтів були обрані засоби вимірювання для визначення таких особливостей поверхонь, як шорсткість, профіль, макровідхилення та мікротвердість.

Шорсткість і профіль поверхні досліджуваних зразків визначали профілографом-профілометром TR-200, дані з якого безпосередньо передавалися на ПК і систематизувалися. Визначили, що похибка виміру середнього арифметичного абсолютних значень відхилень профілю  $Ra$  складала  $\leq 10\%$ , відтворюваність величини, що відображується, — не більше  $6\%$ , діапазон вимірювання —  $0,005$  мкм- $16$  мкм.

Для визначення макровідхилень поверхонь болтів використовували мікрометр гладкий з електронним відліковим пристроєм мод. МКЦ(5)-50, погрішність вимірів якого складає  $0,002$  мм. Проаналізувавши отримані дані зробили відповідні висновки про відхилення форми та визначили кількісну оцінку відхилень.

Для визначення мікротвердості поверхонь використовували мікротвердомер ПМТ-3. Індентором служив діамантовий наконечник у

формі піраміди з квадратною основою і кутом при вершині  $136^\circ$  (індентор Віккерса).

Отримані дані систематизували і обробляли за допомогою методів математичної статистики в середовищі Microsoft Excel.

Дослідження шатунних болтів показали, що показники якості поверхонь у вихідному стані мають досить великий розкид значень, що безумовно відобразиться на їх надійності.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Жарський І.М. Технологічні методи забезпечення надійності деталей машин: Навч. посібник / І.М. Жарський (і ін.) — Мн.: Вищ. шк., 2005. — 299с.
2. Васильев А.С. и др. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, М.Л. Хейфец. – Мн.: ФТИ НАНБ, 2002. — 216 с.
3. Skoblo T. S., Romaniuk S. P., Sidashenko A. I., Garkusha I. E., Taran V. S., Taran A. V., Demchenko S. V. Study of degradation mechanism of metal-cutting tools and their hardening by ZrN PVD coatings. *Problems atomic sci. and techn. Ser. Plasma Physic.* 2018. №. 6. P. 300–303.
4. База даних мікроструктур металлов и сплавов. [URL:http://www.microstructure.ru/rudbview](http://www.microstructure.ru/rudbview). (дата звернення: 16.02.2020).
5. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов — М.: Машиностроение, 2000. — 320с.
6. ДСТУ 2498-94: Основні норми взаємозамінюваності. Допуски форми і розташування поверхонь. Основні терміни і визначення.
7. ДСТУ 2413-94: Основні норми взаємозамінності. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення.
8. Гаврилюк В.І. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання: Навч. Посібник / В.І. Гаврилюк, М.Л. Кукляк. — К.: УМК ВО, 1990. — 216 с.
9. Никифорец Э.Н. Сборник задач по метрологическому обеспечению в авиационной технике: Учеб. пособие / Под ред. М.Н. Черновского. — М.: Изд-во МАИ, 1990. — 106 с.
10. Ряховский О.А., Клыпин А.В.. Детали машин. – М.: Дрофа, 2002. – 288 с.
11. ДСТУ ГОСТ 427:2009: Линейки измерительные металлические. Технические условия.

12. ДСТУ ГОСТ 6507:2009: Микрометры. Технические условия.
13. ГОСТ 7470-92: Глубиномеры микрометрические. Технические условия.
14. Детали машин: Учеб. Для вузов / Л.А.Андрюченко, Б.А. Байков, И.К. Ганулич и др.; Под ред. О.А. Ряховского. -М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 544с.
15. ГОСТ 8074-82: Микроскопы инструментальные. Типы, основные параметры и размеры. Технические требования.
16. Иванов, М. Р, Финогенов, В. А. Детали машин. — 12-е изд., испр. — М. : Высшая школа, 2008. – С. 20-23
17. Боженко Л. І. Стандартизація, метрологія та кваліметрія у машинобудуванні: Навч. посібник. — Львів: Світ, 2003. — 328 с.
18. ГОСТ 9378-93: Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Общие технические условия.
19. ГОСТ 1497–84: Металлы. Метод испытаний на растяжение.
20. ГОСТ 9454–78: Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.
21. ГОСТ 7855-68: Отливки из чугуна. Методы механических испытаний.
22. ДСТУ 2860-94: Надійність техніки. Терміни та визначення.
23. Гордин П.В., Росляков Е.М., Эвелеков В.И. Детали машин и основы конструирования: Учебное пособие. – СПб.: СЗТУ, 2006. С. 94-96
24. ДСТУ 2823-94: Зносостійкість виробів тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення.
25. Шетулов Д. И., Андреев В. В. Прогнозирование долговечности деталей машин по нестандартным физико-механическим параметрам конструкционных материалов . *Изв. АН РФ. Металлы*. Москва, 1998. № 3. С. 55–59.

ДОДАТОК А  
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
Механічний факультет

Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ  
бакалавра

Методи та засоби вимірювання при дослідженнях особливостей поверхонь деталей машин

Завідувач кафедри д-р техн. наук, проф.

О. В. Полярус

Нормоконтролер канд. техн. наук, доц.

О. С. Букреєва

Керівник канд. техн. наук, доц.

Н. В. Діденко

Студент гр. ММ-41-16

Д. К. Масляник

Харків-2020



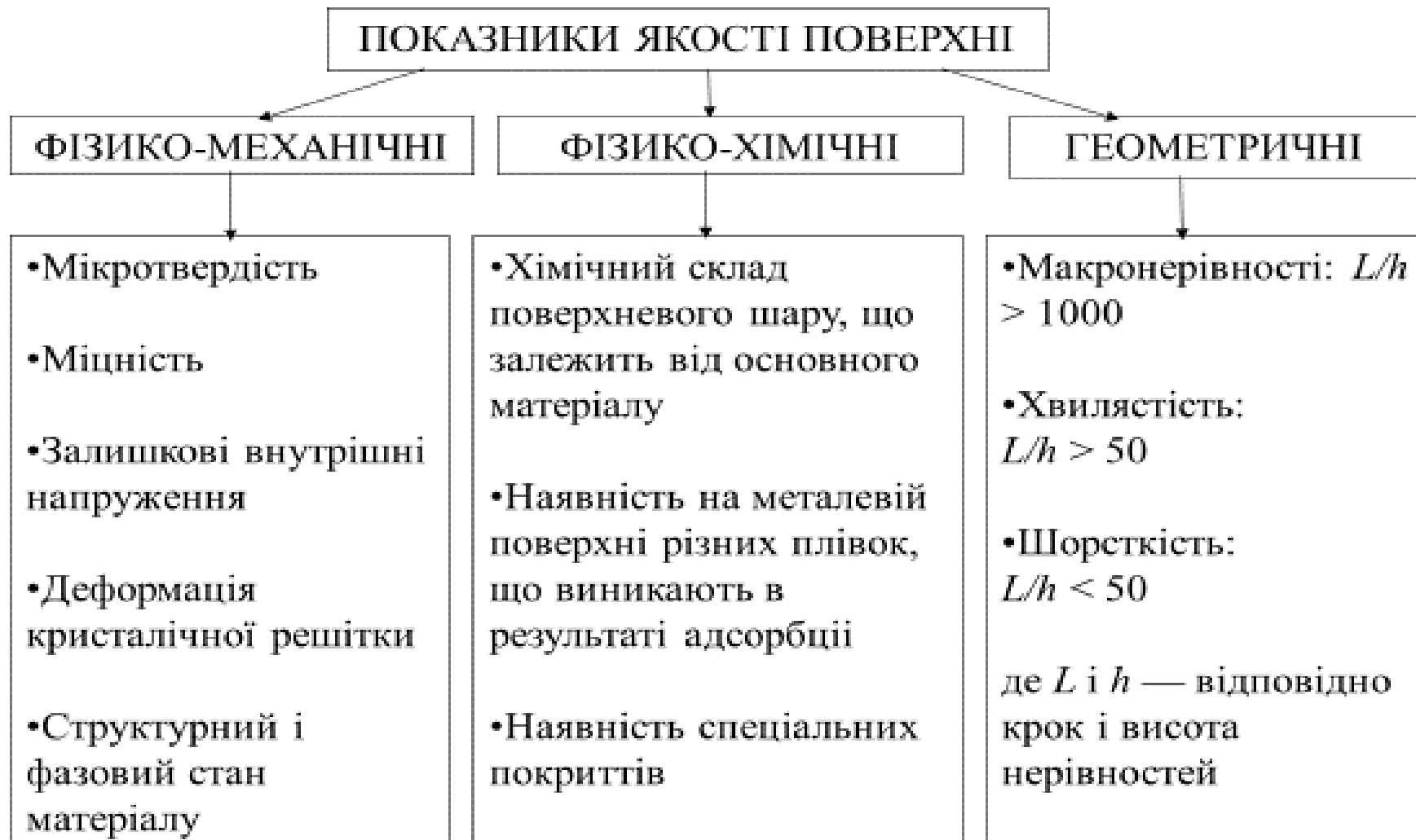
**Мета роботи:** Проаналізувати існуючі методи та засоби вимірювання при дослідженнях особливостей поверхні.

**Предмет дослідження** — особливості поверхні деталей машин.

**Об'єкт дослідження** — конструкційні сталі після різної механічної обробки поверхні.

**Задачі дослідження:**

- аналіз основних показників якості поверхні деталей машин;
- аналіз методів та засобів вимірювання при дослідженнях особливостей поверхні;
- експериментальне дослідження поверхні шатунних болтів;



## ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

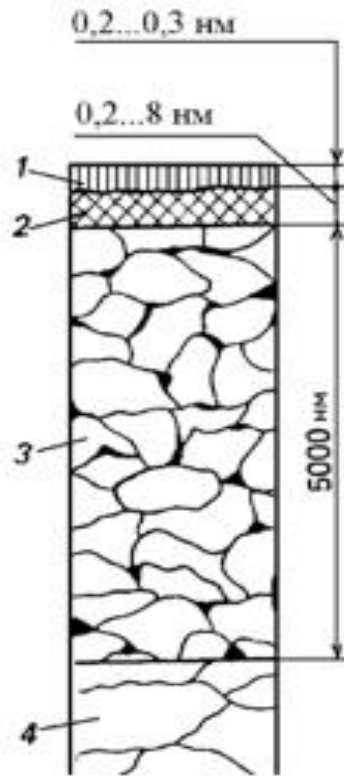


Рисунок 1 — Структура поверхностного слоя шлифованной детали из углеродистой стали

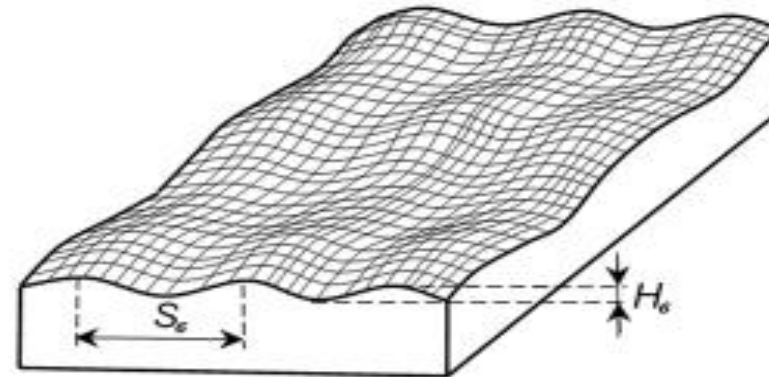


Рисунок 2 — Схема волнистой поверхности

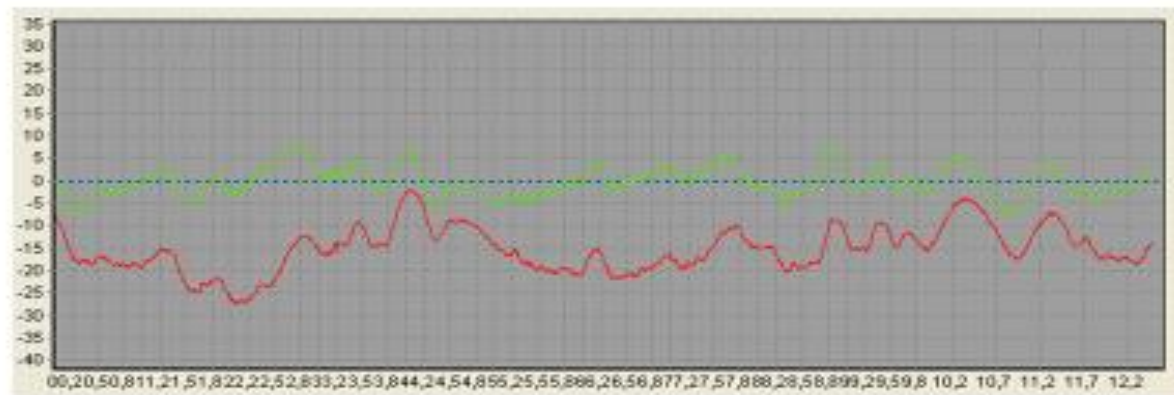
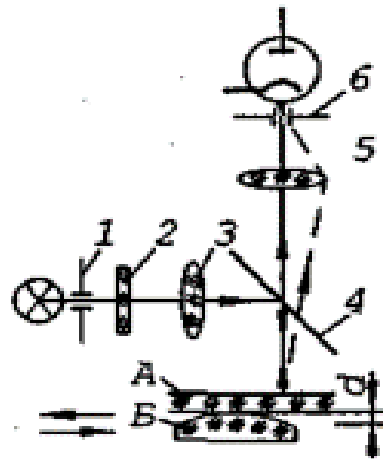


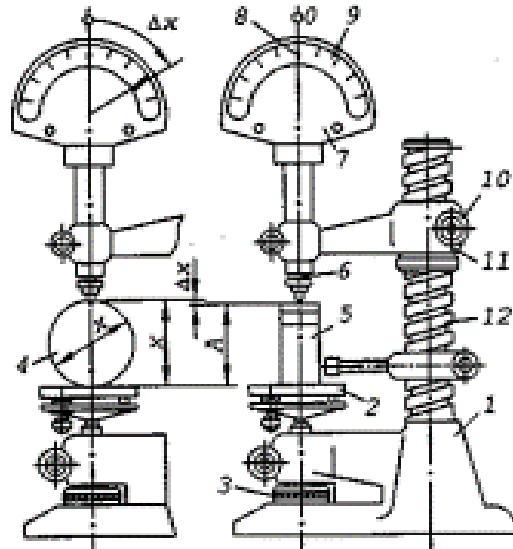
Рисунок 3 — Профилограмма поверхности для определения шероховатости

## ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ВІДХИЛЕНЬ ФОРМИ ПОВЕРХОНЬ



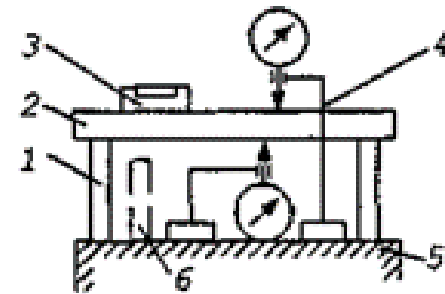
- 1 — щільна діафрагма;  
 2 — світлофільтр; 3 — об'єктив;  
 4 — напівпрозора пластинка;  
 5 — об'єктив; 6 — щільна  
 діафрагма, А — поверхня  
 плоскопаралельної пластинки;  
 Б — поверхня виробу

Рисунок 4 — Схема  
 універсального інтерференційного  
 фотоелектричного ЗВТ



- 1 — основа; 2 — предметний столик;  
 3 — ручка гвинтового механізму;  
 4 — вимірюваний виріб; 5 — блок  
 кінцевих мір; 6 — вимірювальна головка;  
 7 — шуп; 8 — покажчик шкали;  
 9 — шкала; 10 — затискач; 11 — підпора;  
 12 — напрямна колона

Рисунок 5 — Контрольно-вимірювальний  
 пристрій для дослідження відхилень  
 форми поверхонь



- 1 і 6 — міри довжини;  
 2 — лінійка; 3 — рівень;  
 4 — вимірювальна головка зі  
 штативом; 5 — виріб

Рисунок 6 — Схема  
 спеціального ЗВТ для  
 вимірювання відхилень форми

## МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ШОРСТКОСТІ

Метод візуальної оцінки

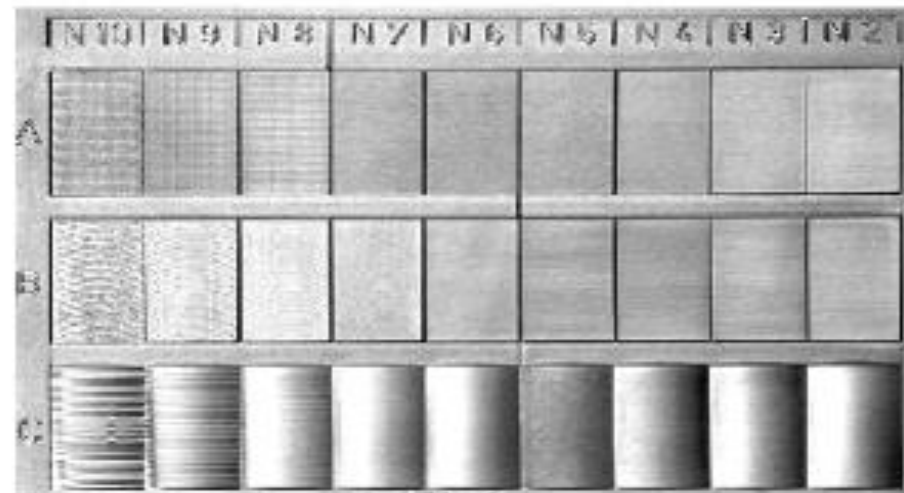
Щуповий метод

Безконтактні оптичні методи

### 1. Метод візуальної оцінки



Рисунок 7 — Зразки шорсткості поверхонь (ГОСТ 9378–93)

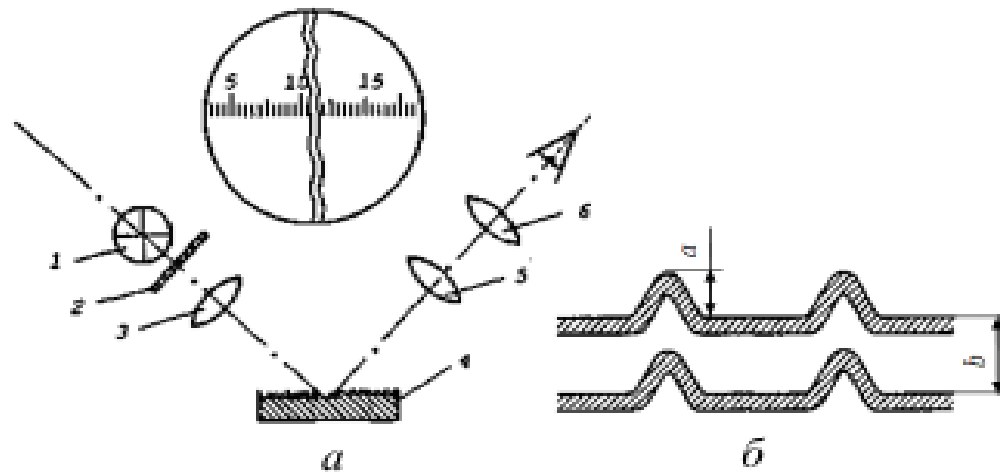


А — токарна обробка; Б — торцеве фрезерування; С — плоске шліфування

Рисунок 8 — Виконання зразків по способам обробки поверхні у відповідності з параметрами шорсткості по ІСО 2632-2 - 85

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ШОРСТКОСТІ

### 2. Мікроінтерференційний метод



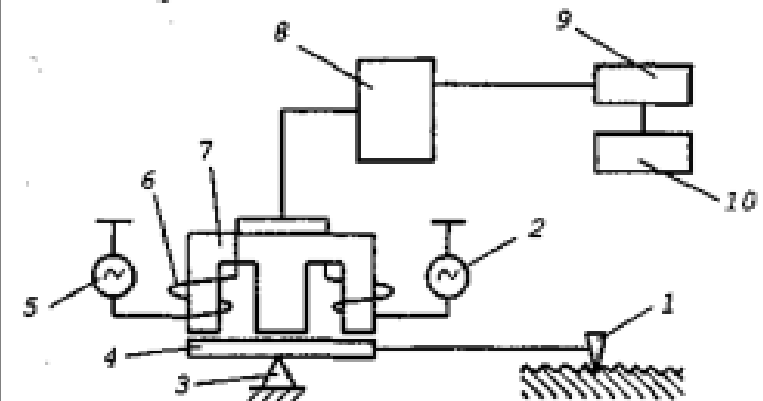
- 1 — джерело світла; 2 — щілинна діафрагма;  
3 — конденсор; 4 — досліджувана поверхня;  
5 — об'єктив; 6 — окуляр

Рисунок 9 — Принцип дії мікроінтерферометра (а) і  
схема викривлень інтерференційних смуг (б)

$$Ra = \frac{a \cdot \lambda}{b \cdot 2}$$

де  $a$  і  $b$  характеристики викривлення інтерференційних смуг;  $\lambda$  — довжина хвилі джерела світла, мкм.

### 3. Щуповий метод



- 1 — голка з алмазним наконечником;  
2 і 5 — джерела електричного струму з  
частотою  $10\,000\text{ с}^{-1}$ ; 3 — опора;  
4 — коромисло; 6 — котушка;  
7 — магнітопровід; 8 — блок підсилення  
електричних сигналів; 9 — блок обробки  
інформації; 10 — записувальний чи  
показувальний блок

Рисунок 10 — Принципова схема  
індикаторних ЗВТ з індукційним  
перетворювачем

## ВИМІРЮВАННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ

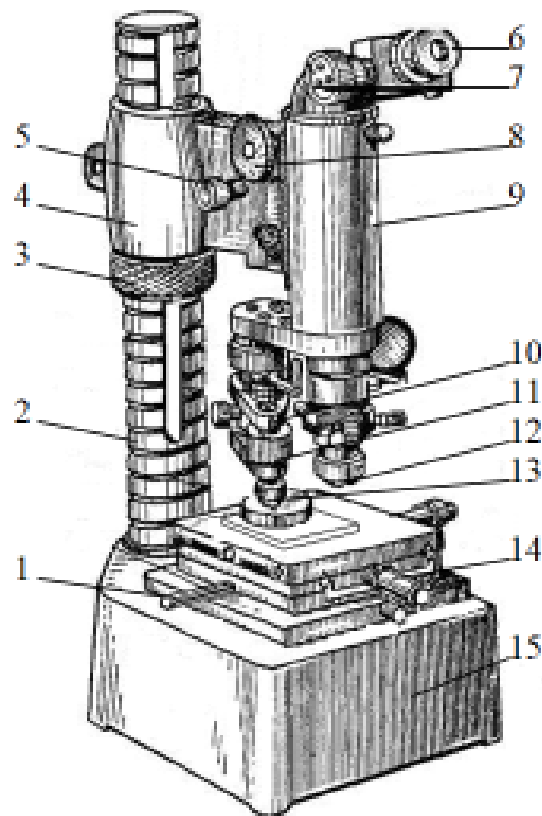


Рисунок 11 — Схема приладу ПМТ-3 для вимірювання мікротвердості

- 1 і 14 — гвинти предметного столика;
- 2 — стійка;
- 3 — кільцева гайка;
- 4 — кронштейн;
- 5 — механізм мікроподачі;
- 6 — мікроскоп;
- 7 — окулярний мікрометр;
- 8 — мікрометричний гвинт;
- 9 — тубус;
- 10 і 11 — кронштейни механізму вантаження;
- 12 — об'єктив;
- 13 — шток з алмазною пірамідою;
- 15 — станина

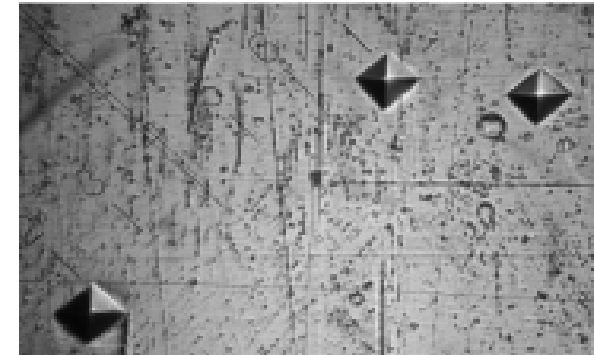


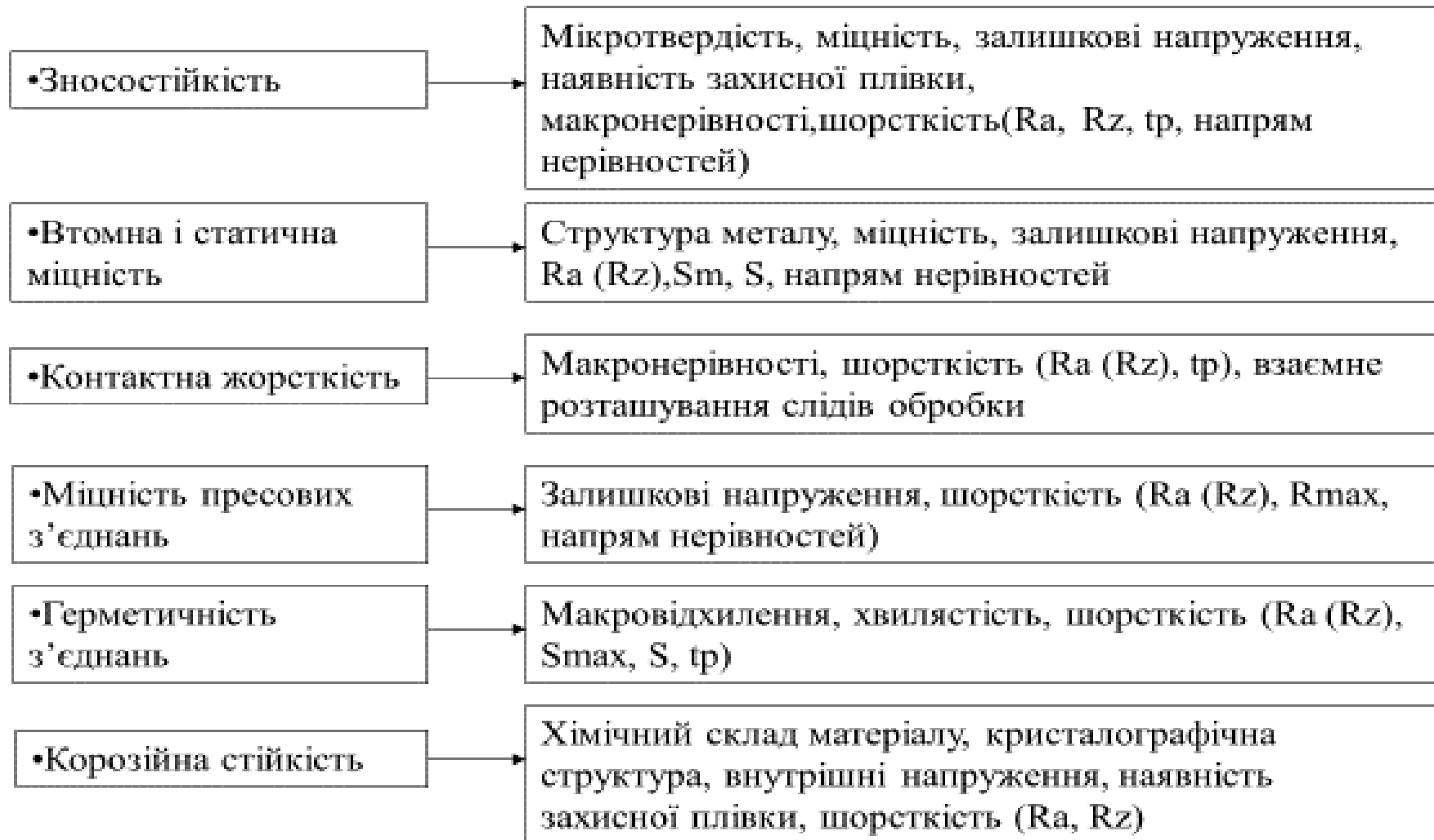
Рисунок 20 — Фотографія, отримана цифровим фотоапаратом при визначенні мікротвердості на ПМТ-3

$$HV = 1854 \cdot P/d^2,$$

де  $P$  — величина прикладеного навантаження, в гс;

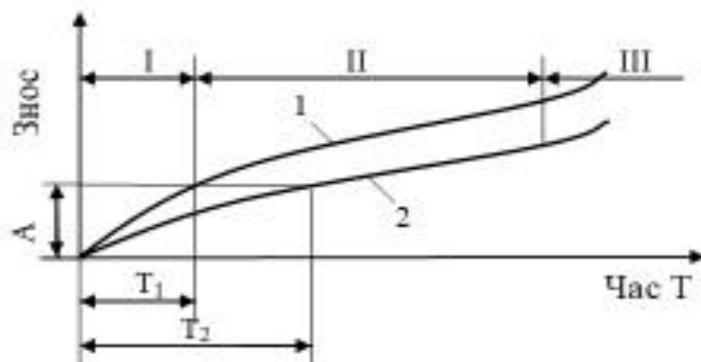
$d$  — діагональ відбитка, мкм.

## ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ОСНОВНІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБІВ





## ЗНОСОСТІЙКІСТЬ І ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ



1 і 2 — поверхні з різними параметрами шорсткості  
Рисунок 13 — Типові графіки зносу в часі

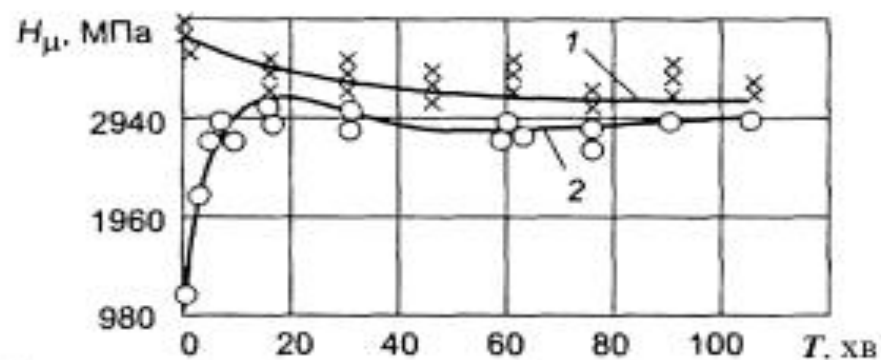
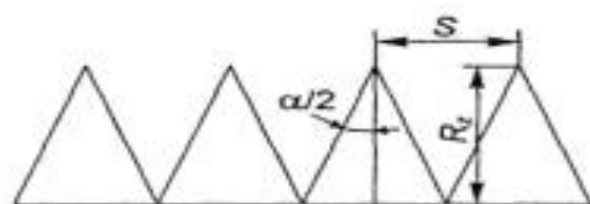


Рисунок 14 — Зміна мікротвердості зразків із сталі 20 в процесі зносу

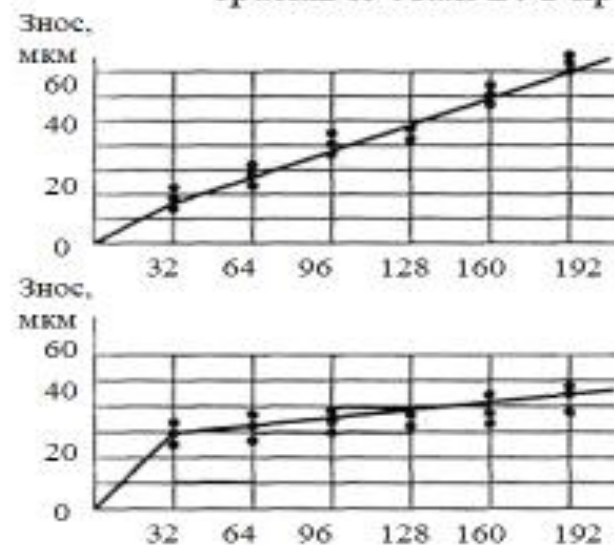


4 гребня на 1 см



44 гребня на 1 см

Рисунок 15 — Знос поверхонь з різною формою мікронерівностей



## ВТОМНА МІЦНІСТЬ І ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ

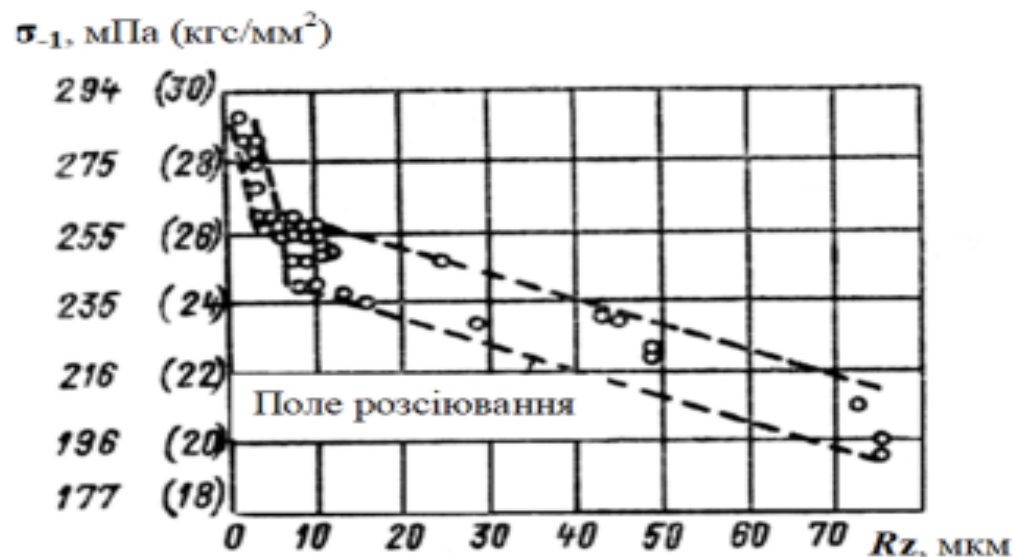
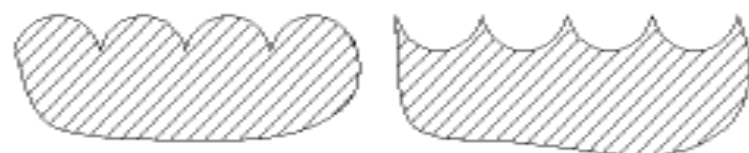


Рисунок 16 — Залежність границі витривалості від висоти нерівностей

При збільшенні параметра шорсткості відпаленої сталі 45 з  $Rz = 3,2$  до  $Rz = 75$  границя її витривалості знижується з 285 до 200 МПа, тобто на 30 %.



*a*

*б*

*a* — западини мікрорельєфу з малим радіусом закруглення дна;  
*б* — западини із закругленою формою дна

Рисунок 17 — Профілі поверхонь, що мають різну форму мікронерівностей

## СТАТИЧНА МІЦНІСТЬ

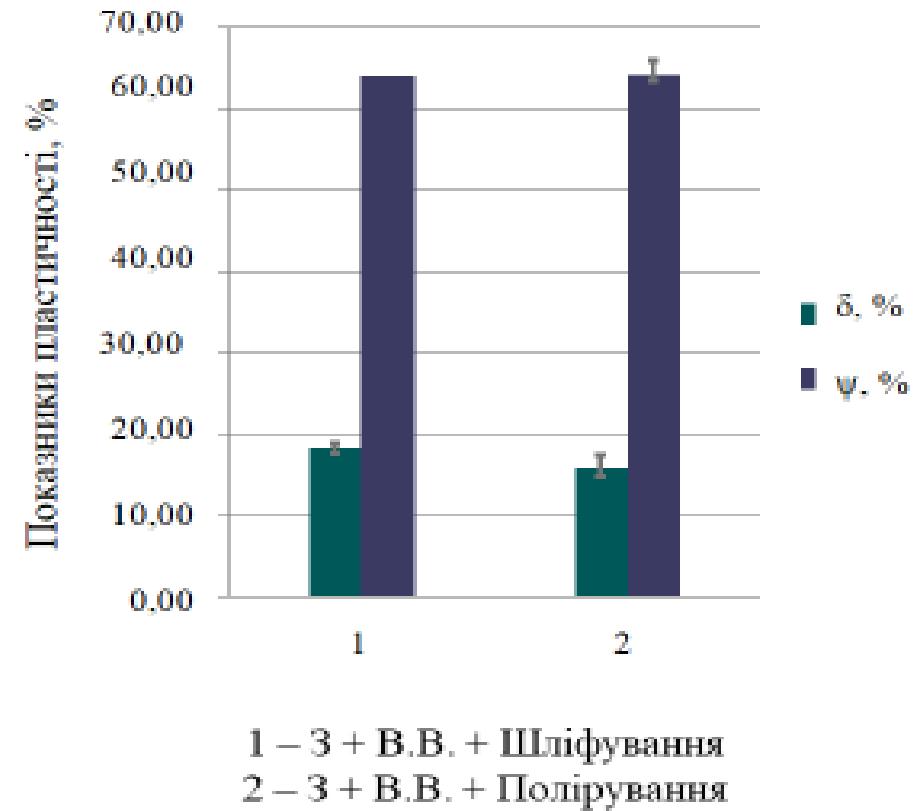
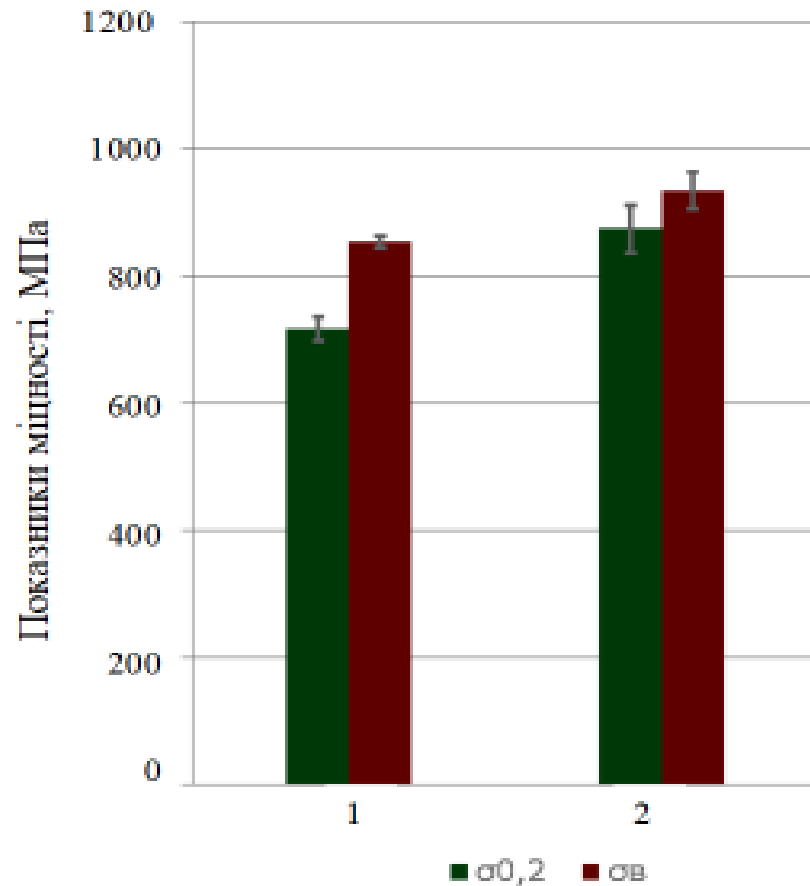


Рисунок 18 — Показники міцності та пластичності в залежності від висоти мікронерівностей

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН. ВИМІРЮВАННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ



Рисунок 19 — Шатунні болти для дослідження

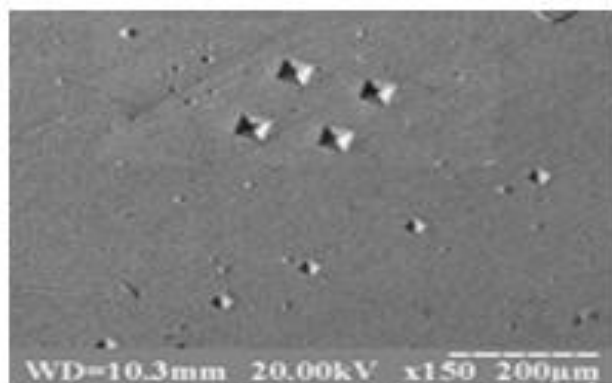


Рисунок 20 – Фотографія, отримана цифровим фотоапаратом при визначенні мікротвердості на ПМТ-3

Таблиця 1 — Результати вимірювання

Зразок, № п/п	Глибина Проникнення індентора, мкм	Значення Мікротвердості поверхні,	$X_{\text{ср}}$
1	5,43	256,97	371,80
2	3,88	502,3	
3	5,38	260,98	
4	4,91	313,47	
5	4,42	388,1	
6	5,32	267,18	
7	4,85	322,34	
8	4,69	344,31	
9	4,41	389,02	
10	3,36	673,34	

$$HV = 1854 \cdot P/d^2,$$

де  $P$  — величина прикладеного навантаження, в гс;  
 $d$  — діагональ відбитка, мкм.

## ВИМІРЮВАННЯ ШОРСТКОСТІ БОЛТІВ



Рисунок 21 — Профілограф-профілометр TR-200

Таблиця 2 — Результати вимірювань

№ п/п	$Ra^{CP}$ , (МКМ)	$Rz^{CP}$ , (МКМ)	$S^{CP}$ , (ММ)	$Sm^{CP}$ , (ММ)	$t_{50}^{CP}$ , (%)
1	1,460	6,079	0,049	0,074	63,625
2	0,526	2,382	0,041	0,061	55,967
3	0,376	1,663	0,071	0,101	90,233
4	0,647	2,944	0,041	0,065	68,467
5	0,554	2,671	0,037	0,062	73,333
6	0,398	1,600	0,063	0,036	83,800
7	0,644	2,712	0,040	0,067	45,400
8	0,340	1,528	0,050	0,088	81,700
9	0,530	2,598	0,037	0,056	68,033
10	0,339	1,534	0,050	0,084	75,100

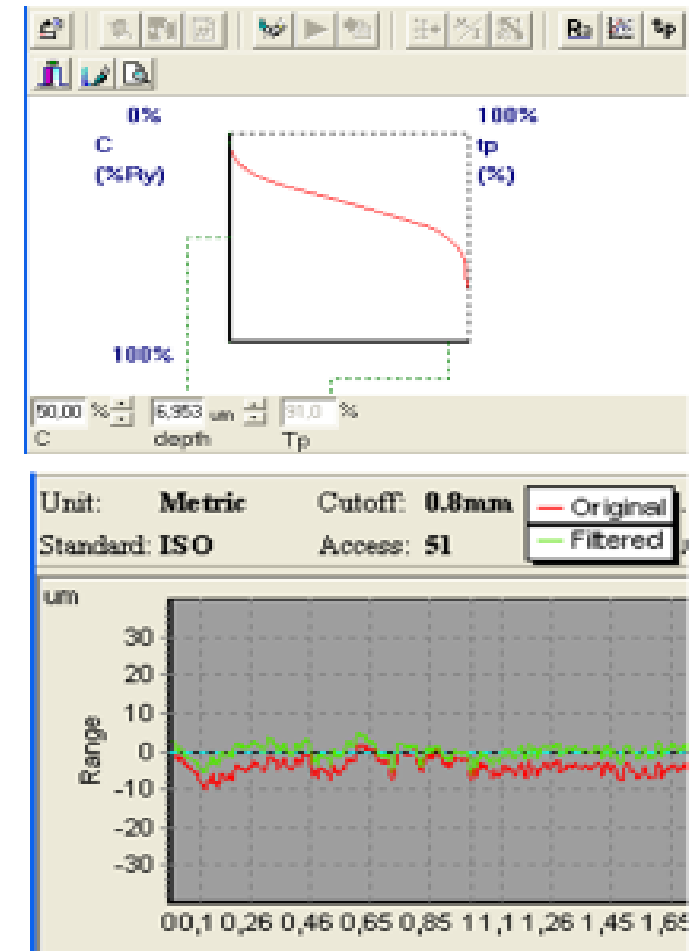


Рисунок 22 — Інтерфейс профілографа TR-200

## ДОСЛІДЖЕННЯ МАКРОГЕОМЕТРІЇ БОЛТІВ

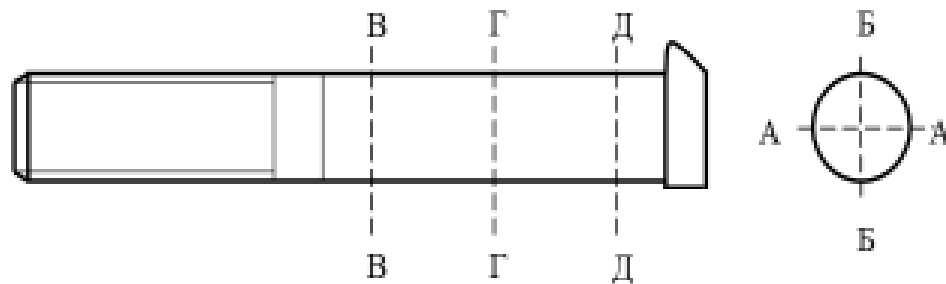


Рисунок 23 – Схема вимірювання болтів



Рисунок 24 — мікрометр гладкий мод. МКЦ(5)-50

Таблиця 3 — Результати вимірювань макрогеометрії болтів

№ п/п	Відхилення форми
1	Сідлоподібність, $\Delta=0,004$
2	Сідлоподібність, $\Delta=0,011$
3	Сідлоподібність, $\Delta=0,010$
4	Сідлоподібність, $\Delta=0,013$
5	Конусоподібність, $\Delta=0,004$
6	Сідлоподібність, $\Delta=0,019$
7	Конусоподібність, $\Delta=0,002$
8	Сідлоподібність, $\Delta=0,008$
9	Сідлоподібність, $\Delta=0,003$
10	Сідлоподібність, $\Delta=0,062$

$$\Delta = \frac{d_{r\max} - d_{r\min}}{2}$$

де  $d_{r\max}$  — найбільший реальний розмір поверхні;  
 $d_{r\min}$  — найменший реальний розмір поверхні

## ВИСНОВКИ

1. Якість поверхні деталей машин обумовлюється фізико-механічними, фізико-хімічними і геометричними характеристиками поверхні. Ці характеристики визначаються властивостями матеріалу і технологією виготовлення деталі, вони також можуть змінюватися в процесі обробки поверхні та експлуатації виробу.

2. Експлуатаційні властивості деталей машин визначаються насамперед станом їх поверхневого шару. На надійність виробу впливають такі властивості поверхневого шару, як твердість, залишкові напруження і структурний стан металу, наявність захисної плівки чи спеціальних покриттів, висота і форма нерівностей профілю тощо.

3. При дослідженнях шатунних болтів були обрані засоби вимірювання для визначення таких особливостей поверхонь, як шорсткість, профіль, макровідхилення та мікротвердість.

Шорсткість і профіль поверхні досліджуваних зразків визначали профілографом-профілометром TR-200, дані з якого безпосередньо передавалися на ПК і систематизувалися. Визначили, що похибка виміру середнього арифметичного абсолютних значень відхилень профілю  $R_a$  складала  $\leq 10\%$ , відтворюваність величини, що відображується, — не більше  $6\%$ , діапазон вимірювання —  $0,005-16$  мкм.

Для визначення макровідхилень поверхонь болтів використовували мікрометр гладкий з електронним відліковим пристроєм мод. МКЦ(5)-50, погрішність вимірів якого складає  $0,002$  мм. Проаналізувавши отримані дані зробили відповідні висновки про відхилення форми та визначили кількісну оцінку відхилень.

Для визначення мікротвердості поверхонь використовували мікротвердомер ПМТ-3. Індентором служив діамантовий наконечник у формі піраміди з квадратною основою і кутом при вершині  $136^\circ$  (індентор Віккерса).

Отримані дані систематизували і обробляли за допомогою методів математичної статистики в середовищі Microsoft Excel.

Дослідження шатунних болтів показали, що показники якості поверхонь у вихідному стані мають досить великий розкид значень, що безумовно відобразиться на їх надійності.