

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Є.В. Басова

**ЦИФРОВИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ
(DIGITAL METROLOGY)
ТА АНАЛІЗ ВІДХИЛЕНЬ CAD-МОДЕЛЕЙ**

Лабораторний практикум з навчальної дисципліни «Сучасні тенденції
машинобудівних виробництв» для студентів усіх форм навчання за
спеціальністю G9 «Прикладна механіка» та G11 «Машинобудування за
спеціалізаціями»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № ___ від 05.06.2026 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2026

УДК 621.7:004.9:620.1

A 107

Рецензенти:

Ю.В. Широкий, канд. техн. наук, доцент, НАУ «ХАІ»
В.В. Субботіна, док. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ»

Басова Є.В.

A107 Цифровий контроль якості (Digital Metrology) та аналіз відхилень CAD-моделей : лабораторний практикум з навчальної дисципліни «Сучасні тенденції машинобудівних виробництв» для студентів усіх форм навчання за спеціальністю G9 «Прикладна механіка» та G11 «Машинобудування за спеціалізаціями» / Є.В. Басова. – Харків : НТУ «ХПІ», 2026. – 28 с.

ISBN

У лабораторному практикумі наведено теоретичні основи сучасної цифрової метрології та методику виконання практичних робіт у дистанційному форматі із використанням систем САД-інспекції, 3D-сканування та програмного забезпечення аналізу геометричних відхилень. Розглянуто принципи роботи оптичної, конфокальної, сканувальної електронної та атомно-силової мікроскопії, а також сучасні підходи цифрового контролю якості деталей машинобудування.

Практикум містить покрокові рекомендації щодо виконання аналізу відхилень між САД-моделлю та цифровим сканом реальної деталі, побудови карт відхилень, оцінювання параметрів поверхні та формування висновків щодо якості виробу. Особливу увагу приділено цифровим технологіям контролю у концепції Industry 4.0 та сучасним тенденціям розвитку машинобудівних виробництв.

Видання призначене для студентів технічних спеціальностей, пов'язаних із машинобудуванням, прикладною механікою, цифровим виробництвом, адитивними технологіями та комп'ютерно-інтегрованими технологіями.

Іл. 12. Табл. 5. Бібліогр. 25.

ISBN

© Басова Є.В., 2026

© НТУ «ХПІ», 2026

ВСТУП

Сучасне машинобудування, авіаційна техніка, біомедична інженерія та адитивні технології неможливі без цифрового контролю якості. Якщо у класичному виробництві контроль здебільшого зводився до вимірювання штангенциркулем або мікрометром окремих розмірів, то сьогодні інженер повинен працювати з повноцінним цифровим двійником виробу, аналізуючи геометрію деталі на мікро- та нанорівні.

Особливо важливим це стає для високоточних компонентів: турбінних лопаток, імплантів, елементів двигунів, форсунок, деталей аерокосмічної техніки та виробів, отриманих адитивними технологіями. Навіть відхилення у декілька десятків мікрометрів можуть суттєво впливати на довговічність, аеродинаміку, тертя, вібрації та працездатність системи.

Цифрова метрологія базується на поєднанні сучасних методів сканування поверхні, комп'ютерного аналізу геометрії та автоматизованого порівняння реальної деталі з її CAD-моделлю. Основою такого підходу є безконтактні системи вимірювання, які дозволяють створювати тривимірну карту поверхні виробу та виконувати аналіз відхилень у цифровому середовищі.

У даній практичній роботі студент виступає в ролі інженера з контролю якості та проводить цифрову інспекцію виробу із застосуванням сучасного метрологічного програмного забезпечення.

МЕТА РОБОТИ

Метою практичної роботи є ознайомлення студентів із сучасними методами цифрового контролю якості, принципами роботи оптичних, конфокальних, електронних та атомно-силових мікроскопів, а також набуття практичних навичок аналізу відхилень між CAD-моделлю та цифровим образом реальної деталі.

1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Роль цифрової метрології у сучасному виробництві

У сучасному машинобудуванні контроль якості вже не обмежується лише перевіркою окремих розмірів штангенциркулем або мікрометром. Підприємства переходять до концепції цифрового виробництва, де кожна деталь має власний цифровий образ, а процес контролю інтегрується безпосередньо у виробничий цикл.

У концепції Industry 4.0 вимірювання виконуються не тільки після завершення виготовлення деталі, але й під час самого процесу обробки. Це

дозволяє оперативно виявляти відхилення та коригувати технологічні параметри ще до появи браку. Такий підхід отримав назву цифрової метрології (Digital Metrology) (рис.1).



Рисунок 1 – Сучасні системи цифрового контролю

Сучасні системи цифрового контролю якості поверхонь деталей машин базуються на використанні:

- 3D-сканерів;
- оптичних та конфокальних мікроскопів;
- координатно-вимірювальних машин (КВМ);
- лазерних трекерів;
- систем машинного зору;
- програмного забезпечення для CAD-інспекції.

Основною особливістю цифрової метрології є те, що контроль виконується у цифровому середовищі та може охоплювати різні види виробничого контролю:

- 1) **вхідний контроль** (перевірка якості матеріалів, заготовок або комплектуючих перед початком виробництва);
- 2) **операційний контроль** (контроль параметрів деталі безпосередньо під час виконання технологічної операції);
- 3) **проміжний контроль** (перевірка стану виробу між окремими етапами обробки);
- 4) **вихідний контроль** (фінальна перевірка готової продукції перед передачею замовнику або складанням);
- 5) **приймальний контроль** (оцінка відповідності виробу технічним вимогам та нормативній документації);
- 6) **неруйнівний контроль** (контроль без пошкодження або руйнування деталі);
- 7) **автоматизований контроль** (контроль, що виконується роботизованими або програмними системами без постійної участі оператора).

У цифровому виробництві всі ці види контролю можуть бути інтегровані в єдину інформаційну систему підприємства. Це дозволяє отримувати вимірювальні дані в режимі реального часу, формувати цифровий паспорт виробу та автоматично накопичувати історію контролю для подальшого аналізу.

Реальна деталь перетворюється у хмару точок або тривимірну модель, після чого спеціальне програмне забезпечення порівнює її з еталонною CAD-моделлю.

У результаті формується карта відхилень, яка дозволяє швидко визначити:

- чи відповідає деталь допускам;
- де знаходяться дефектні області;
- який характер має дефект;
- наскільки критичним є відхилення.

У цифровому виробництві результати вимірювань використовуються для:

- контролю точності виготовлення;
- прогнозування можливих дефектів;
- оцінки зношування інструмента;
- створення цифрових паспортів виробів;
- формування цифрових двійників;
- адаптивного коригування режимів оброблення деталей машин і агрегатів;
- автоматичного налаштування обладнання.

Наприклад, якщо система фіксує поступове збільшення відхилень на однакових ділянках серії деталей, це може свідчити про:

- зношування різального інструмента;
- теплове розширення вузлів верстата;
- неправильне базування заготовки;
- вібрації технологічної системи.

Цифровий контроль якості дозволяє не лише знайти дефект, а й встановити причину його виникнення.

Наприклад:

- локальне викривлення поверхні часто свідчить про термічну деформацію;
- концентровані позитивні відхилення можуть означати надлишок матеріалу;
- негативні відхилення часто виникають через усадку матеріалу або зношування інструмента;

- хвилясті поверхневі структури можуть бути ознакою вібрацій під час обробки;
- концентровані дефекти біля країв іноді свідчать про помилки траєкторії інструмента.

Особливо важливу роль цифрова метрологія відіграє у:

- авіаційному машинобудуванні;
- виробництві медичних імплантів;
- автомобільній промисловості;
- адитивному виробництві;
- мікро- та нанообробці;
- виготовленні турбомашин.

У випадку складних деталей класичні контактні вимірювання стають недостатніми, оскільки вони не дозволяють швидко перевіряти поверхні складної форми. Саме тому сучасне виробництво переходить до безконтактного 3D-сканування. На рис. 2 показано приклад цифрового контролю геометрії деталі після сканування.

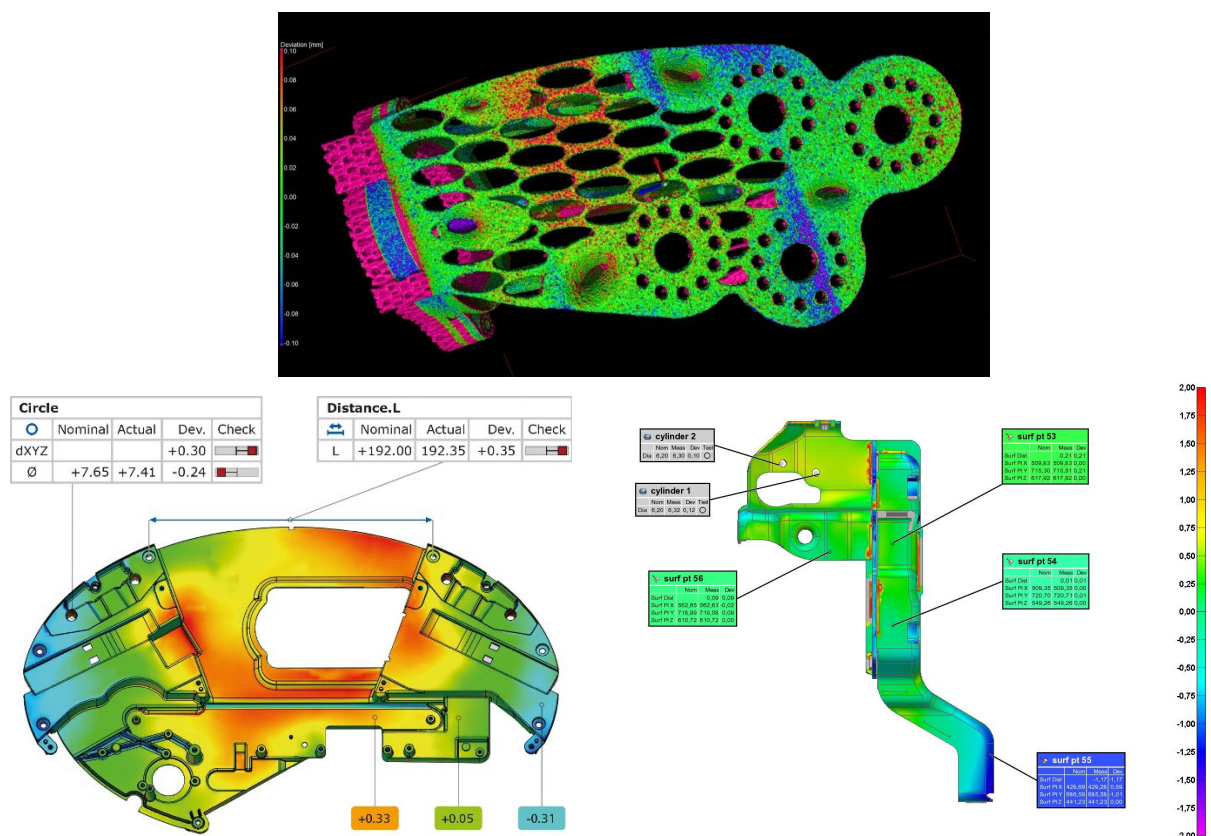


Рисунок 2 – Цифровий контроль геометрії деталі

Кольорова карта відхилень формується автоматично. Кожен колір відповідає певному діапазону похибки (табл.1).

Таблиця 1 – Типова інтерпретація кольорів

Колір	Характеристика
Зелений	Відхилення в межах допуску
Жовтий / червоний	Надлишок матеріалу
Синій	Недостатність матеріалу або усадка

Одним із ключових понять цифрової метрології є цифровий двійник (Digital Twin). Це віртуальна модель реального виробу або технологічної системи, яка оновлюється на основі реальних вимірювань.

Цифровий двійник дозволяє:

- прогнозувати поведінку виробу;
- аналізувати деградацію поверхні;
- оцінювати залишковий ресурс;
- виконувати віртуальні випробування;
- оптимізувати технологічний процес.

У сучасних Smart Factory метрологічні системи можуть бути інтегровані безпосередньо у виробничу лінію. У такому випадку роботизований сканер автоматично перевіряє геометрію деталі після кожної операції. На рис.3 показано приклад автоматизованого цифрового контролю у Smart Manufacturing.



Рисунок 3 – Автоматизований цифровий контроль у Smart Manufacturing

Важливо розуміти, що цифрова метрологія – це не лише вимірювання, а поєднання: фізики процесів; геометричного аналізу; комп'ютерного моделювання; CAD/CAM/CAE систем; аналізу даних; цифрового виробництва.

Саме тому сучасний інженер повинен вміти працювати не лише з кресленням, а й з цифровими моделями, 3D-сканами та програмами аналізу відхилень.

Сучасний контроль якості — це вже не окремий етап після виробництва, а частина єдиного цифрового середовища підприємства. У

майбутньому більшість виробничих систем працюватиме за принципом самокорекції: система сканує деталь, аналізує відхилення та автоматично змінює параметри обробки без участі людини.

Корисні джерела для самостійного опрацювання:

Основи цифрової метрології

NIST – Engineering Metrology: <https://www.nist.gov/metrology>

ZEISS Industrial Metrology: <https://www.zeiss.com/metrology/en/home.html>

Hexagon Manufacturing Intelligence: <https://hexagon.com/products>

3D-сканування та CAD-інспекція

GOM Inspect (безкоштовна версія):

<https://www.zeiss.com/metrology/en/software.html>

CloudCompare Documentation:

https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Main_Page

PolyWorks Education Resources: <https://www.polyworks.com/en-us>

Українські ресурси та приклади обладнання

KODA – вимірювальне та метрологічне обладнання:

<https://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=19>

1.2. Основні типи мікроскопії у цифровій метрології

1.2.1. Оптична мікроскопія

Оптичні мікроскопи використовують видиме світло для формування збільшеного зображення поверхні (рис.4).



Рисунок 4 – Оптичні мікроскопи

Такі системи широко застосовуються для:

- аналізу шорсткості;
- виявлення мікротріщин;
- дослідження структури поверхні;
- контролю лазерного текстурування;
- аналізу зносу інструменту.

Перевагою оптичної мікроскопії є швидкість та неруйнівний характер контролю.

Недоліком є обмежена роздільна здатність, яка визначається дифракційною межею:

$$d = \frac{0.61\lambda}{NA}, \quad (1)$$

де:

d – мінімальна відстань між двома точками;

λ – довжина хвилі світла;

NA – числова апертура об'єктива.

1.2.2. Конфокальна лазерна мікроскопія

Конфокальна лазерна мікроскопія (Confocal Laser Scanning Microscopy, CLSM) є одним із найбільш поширених сучасних методів безконтактного дослідження поверхонь у цифровій метрології (рис.5). Даний метод дозволяє отримувати високоточний тривимірний профіль поверхні та аналізувати мікрогеометрію виробів без механічного контакту із зразком.

На відміну від класичної оптичної мікроскопії, конфокальна система формує не лише плоске зображення, а повноцінну 3D-модель поверхні, де кожна точка має власну координату по висоті.

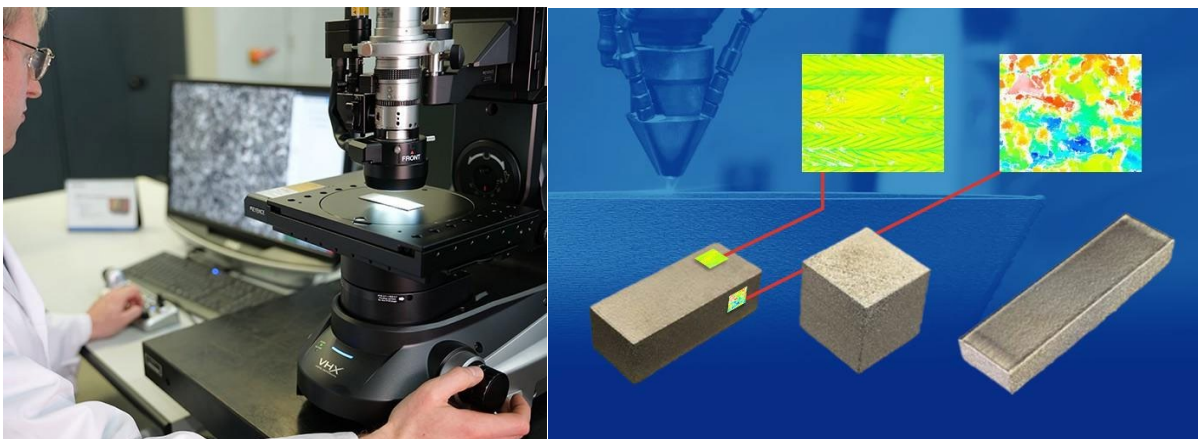


Рисунок 5 – Конфокальна лазерна мікроскопія

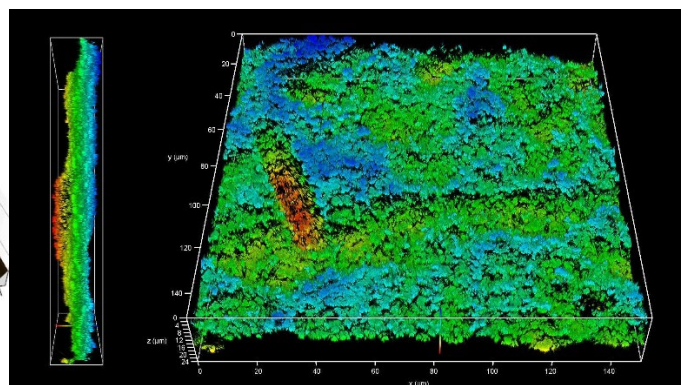
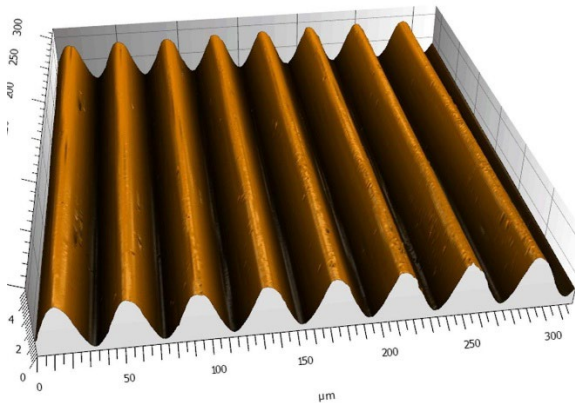
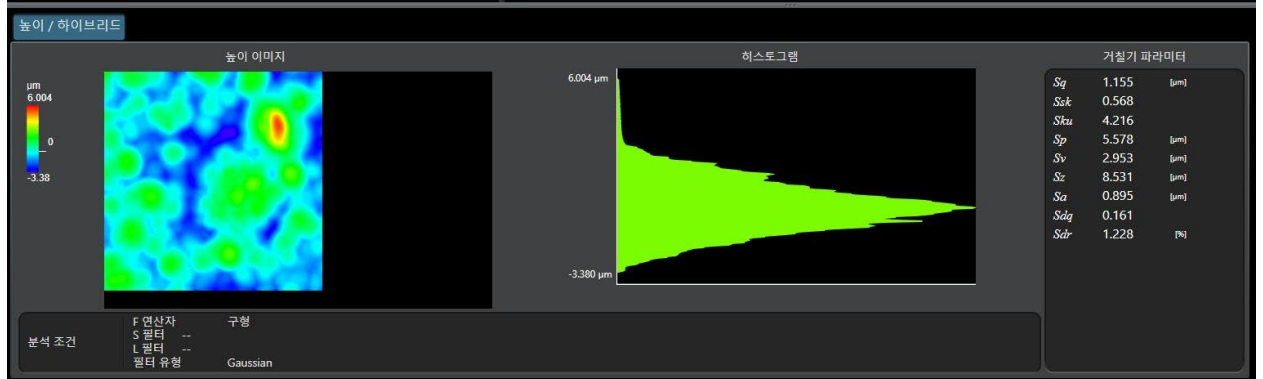
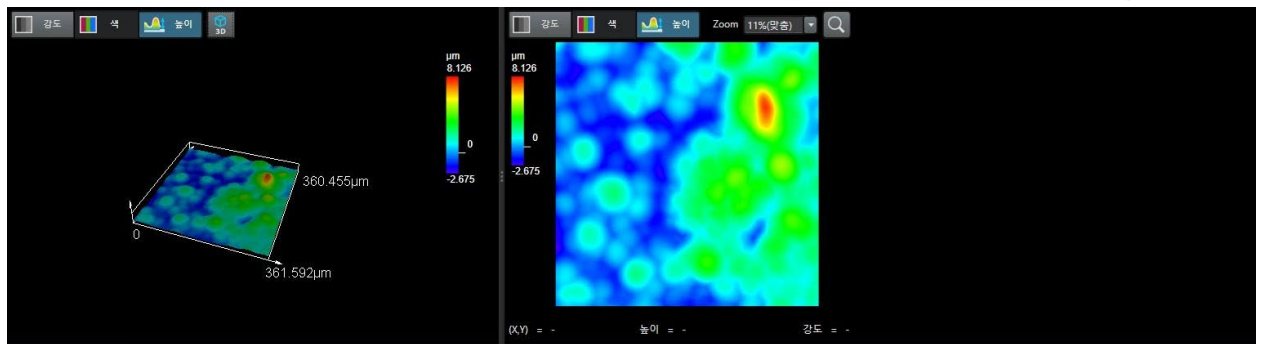
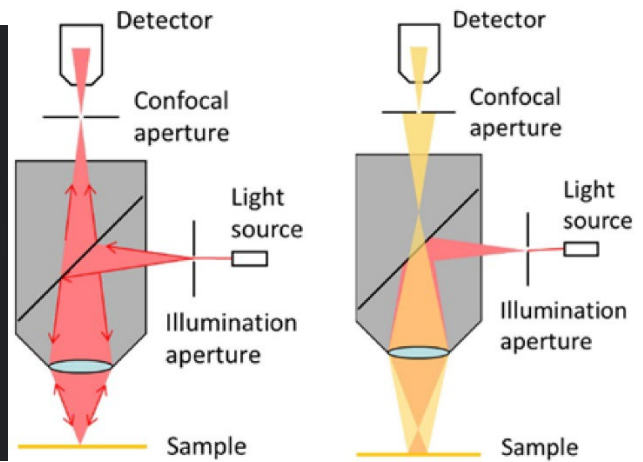


Рисунок 5 – Закінчення

Принцип роботи конфокального мікроскопа базується на використанні сфокусованого лазерного променя та спеціальної конфокальної діафрагми, яка відсікає світло, що знаходиться поза площиною фокусу. У результаті система реєструє лише чітко сфокусовані ділянки поверхні.

Під час сканування лазерний промінь послідовно переміщується по поверхні деталі, а програмне забезпечення формує цифрову карту висот поверхні.

На рис. 6 показано принцип формування конфокального зображення поверхні.

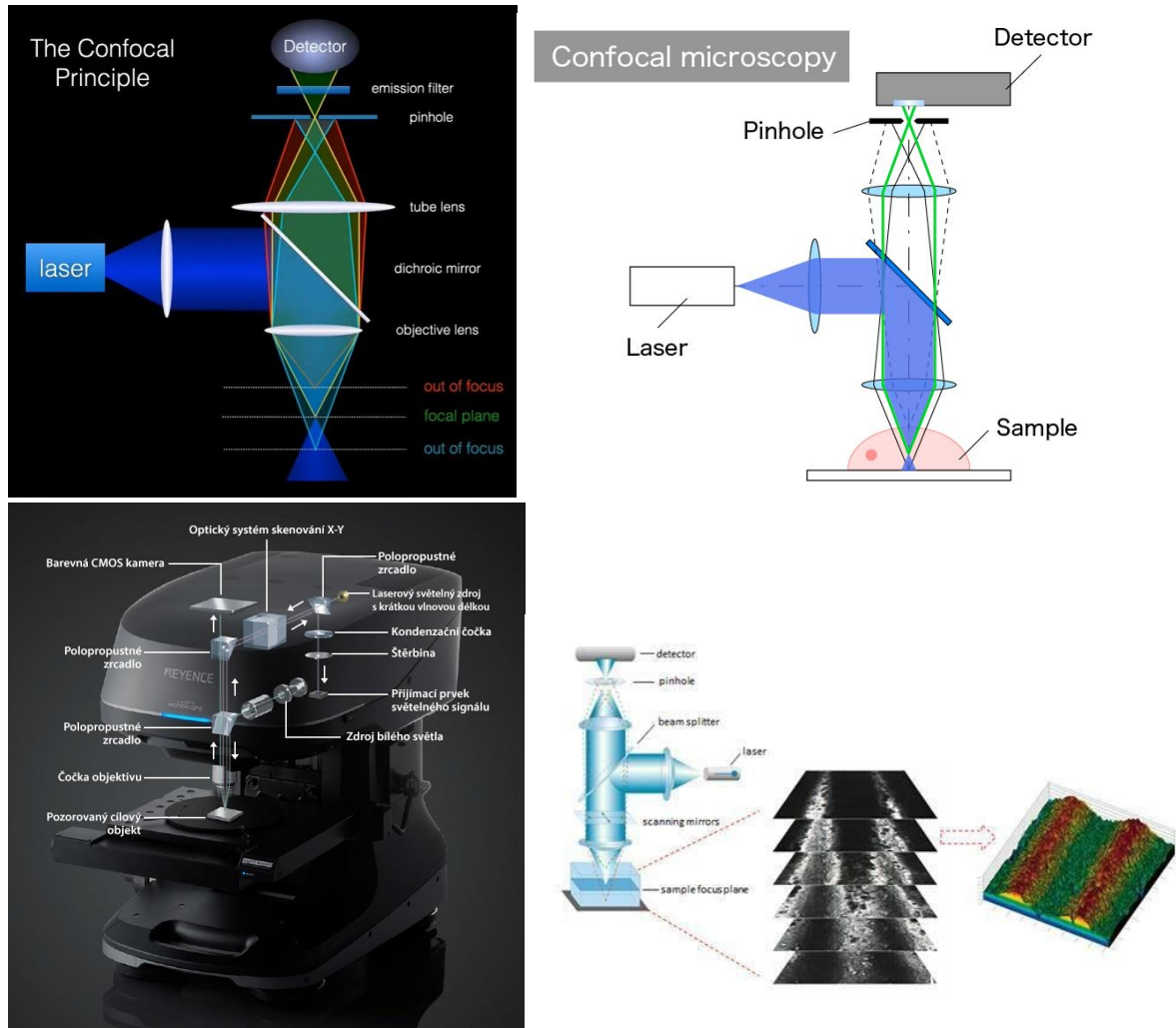


Рисунок 6 – Принцип роботи конфокальної мікроскопії

Основними перевагами конфокальної мікроскопії є:

- висока роздільна здатність;
- можливість побудови 3D-рельєфу;
- безконтактний характер вимірювань;
- висока точність визначення шорсткості;
- можливість аналізу складних поверхонь;
- цифрове збереження результатів вимірювання.

Конфокальна мікроскопія активно використовується для:

- оцінки параметрів шорсткості;

- аналізу лазерно-індукованих періодичних структур (LIPSS);
- дослідження мікрорельєфу;
- вимірювання параметрів текстурованих поверхонь;
- аналізу поверхонь після лазерної обробки;
- контролю зносу інструменту;
- дослідження покриттів;
- оцінки якості адитивно виготовлених деталей.

Особливо важливою конфокальна мікроскопія є у сучасному машинобудуванні, де функціональні властивості поверхні напряму залежать від її мікрогеометрії. Навіть незначні зміни рельєфу можуть суттєво впливати на:

- коефіцієнт тертя;
- зносостійкість;
- адгезію покриттів;
- гідрофобність;
- теплопередачу;
- контактну жорсткість;
- втрати на тертя;
- аеродинамічні характеристики.

У цифровій метрології результати конфокального аналізу часто використовуються для створення цифрових двійників поверхні та подальшого математичного аналізу.

Основні параметри поверхні визначаються відповідно до міжнародного стандарту ISO 25178, який регламентує тривимірні параметри шорсткості поверхні.

Основні параметри досліджуваної конфокальною мікроскопією поверхні відповідно до стандарту ISO 25178 наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Основні параметри поверхні відповідно до ISO 25178 та їх метрологічне значення

Параметр	Назва параметра	Характеристика параметра	На що впливає	Значення для метрології
Sa	Середня арифметична висота поверхні	Середнє абсолютне відхилення висот поверхні	Тертя, контакт поверхонь, зношування	Базовий параметр оцінки якості поверхні
Sq	Середньоквадратична висота	Аналог RMS для поверхні	Вібрації, концентрація навантажень	Дає більш чутливу оцінку нерівностей

Таблиця 2 – Закінчення

Параметр	Назва параметра	Характеристика параметра	На що впливає	Значення для метрології
Sz	Максимальна висота поверхні	Різниця між найвищою та найнижчою точкою	Ризик локального руйнування	Виявлення критичних дефектів поверхні
Ssk	Коефіцієнт асиметрії	Показує переважання виступів або западин	Змащування, знос, утримання мастила	Дозволяє оцінити функціональність поверхні
Sku	Коефіцієнт ексцесу	Характеризує гостроту піків поверхні	Концентрація напружень	Важливий для прогнозування руйнування
Sp	Максимальна висота піку	Найвищий виступ поверхні	Контактне тертя	Контроль локальних виступів
Sv	Максимальна глибина западини	Найглибша западина поверхні	Утримання мастила, корозія	Аналіз дефектів та пористості
Sal	Автокореляційна довжина	Просторовий розподіл текстури	Анізотропія поверхні	Аналіз напрямленості структури
Str	Коефіцієнт текстурованості	Ступінь орієнтації рельєфу	Тертя та ковзання	Оцінка напрямку обробки
Sk	Глибина ядра шорсткості	Основна робоча зона поверхні	Робоче навантаження	Аналіз експлуатаційної придатності
Spk	Висота піків поверхні	Частина поверхні, що швидко зношується	Початковий знос	Прогнозування приработки
Svk	Глибина западин ядра	Об'єм зон утримання мастила	Мастильні властивості	Оцінка довговічності поверхні

Для сучасної цифрової метрології важливо не лише отримати зображення поверхні, а й виконати кількісний аналіз її параметрів. Саме тому конфокальна мікроскопія поєднує:

- оптичні методи;
- лазерне сканування;
- цифрову обробку сигналів;
- математичний аналіз поверхні;
- побудову 3D-моделей.

У сучасних Smart Manufacturing системах результати конфокального аналізу можуть автоматично передаватися у CAD/CAM/CAE середовище для подальшої оптимізації технологічних параметрів виробництва.

1.2.3. Сканувальна електронна мікроскопія (SEM)

У SEM замість світла використовується пучок електронів (рис 7, рис.8).

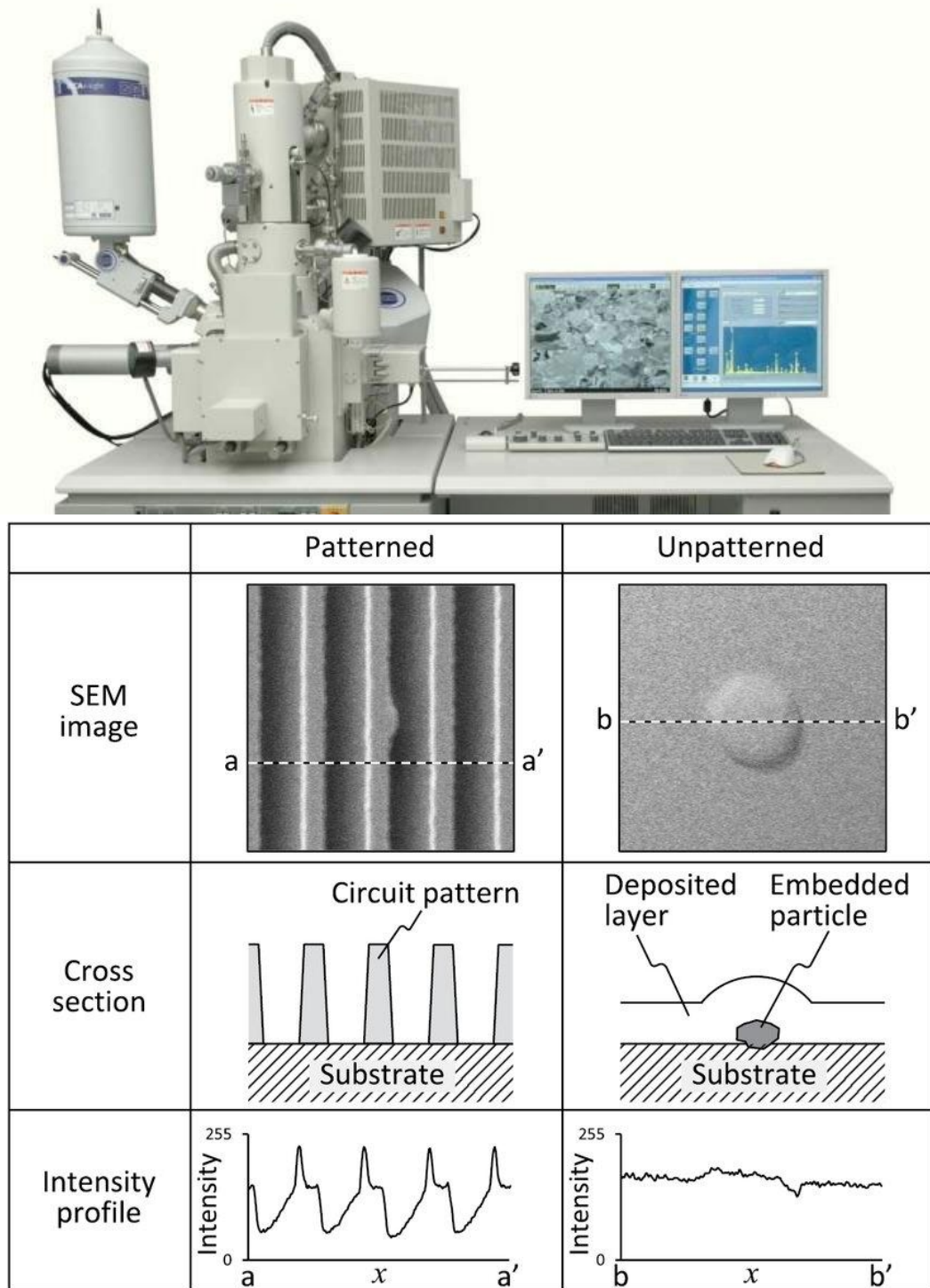


Рисунок 7 – Принцип роботи сканувальної електронної мікроскопії

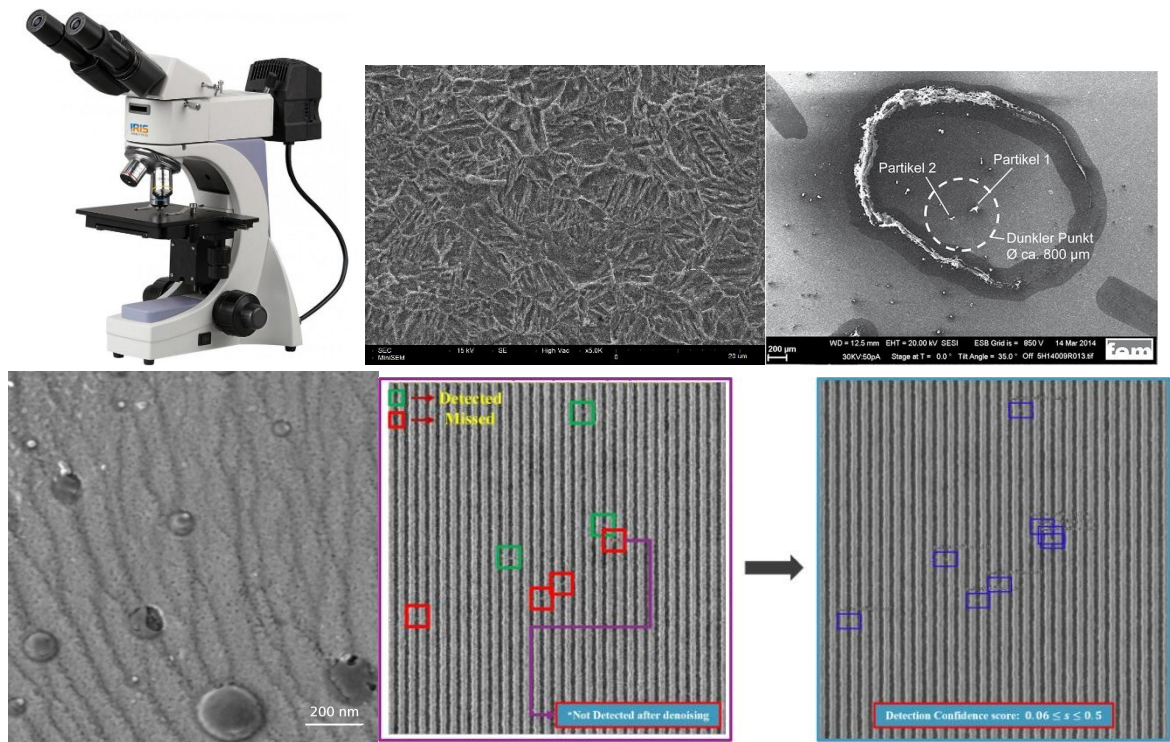


Рисунок 8 – Приклад аналізу поверхні методом скандувальної електронної мікроскопії

Електрони мають значно меншу довжину хвилі порівняно зі світлом, тому SEM дозволяє отримувати зображення з нанометровою роздільною здатністю.

Довжина хвилі електрона визначається рівнянням де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (2)$$

де:

h – стала Планка – фундаментальних фізичних констант, яка використовується у квантовій механіці та описує зв'язок між енергією частинки і частотою електромагнітного випромінювання ($h=6.62607015 \times 10^{-34}$ Дж·с);

p – імпульс електрона.

Оскільки довжина хвилі електронів дуже мала, електронні мікроскопи можуть бачити об'єкти у тисячі разів менші, ніж звичайні оптичні мікроскопи. Якщо у звичайному світі енергія може змінюватися плавно, то у квантовому світі вона змінюється «порціями». Стала Планка визначає розмір цих порцій енергії. Саме тому вона є однією з основ сучасної фізики, електронної мікроскопії та нанотехнологій.

SEM використовується для:

- аналізу структури металів;
- виявлення мікропор;
- дослідження тріщин;
- аналізу адитивних поверхонь;
- оцінки покриттів.

Метод сканувальної електронної мікроскопії є одним із ключових інструментів сучасної цифрової метрології та матеріалознавства. На відміну від традиційної оптичної мікроскопії, SEM дозволяє досліджувати не лише загальну геометрію поверхні, а й особливості її мікро- та наноструктури.

Особливо важливим використання SEM є для аналізу поверхонь після лазерної обробки, адитивного виробництва, нанесення функціональних покриттів та дослідження зон руйнування матеріалу. Завдяки високій глибині різкості та значному збільшенню SEM дозволяє отримувати детальні зображення мікротріщин, пористості, дефектів спікання та структурних неоднорідностей.

У сучасному машинобудуванні результати SEM-досліджень часто поєднуються з даними конфокальної мікроскопії, 3D-сканування та CAD-аналізу. Це дозволяє комплексно оцінювати стан поверхні, встановлювати причини виникнення дефектів та прогнозувати експлуатаційні властивості виробу.

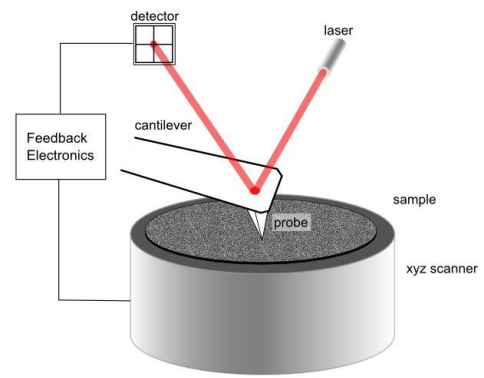
Отримані електронною мікроскопією дані можуть використовуватись для:

- цифрового аналізу якості поверхні;
- побудови цифрових моделей мікроструктури;
- оцінки впливу технологічних режимів;
- прогнозування зношування та руйнування;
- створення цифрових двійників матеріалів і поверхонь.

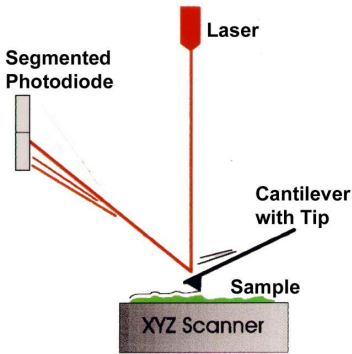
Таким чином, сканувальна електронна мікроскопія є важливою складовою сучасних систем цифрового контролю якості та дозволяє досліджувати поверхню виробу на рівні, недоступному для класичних оптичних методів.

1.2.4. Атомно-силова мікроскопія (AFM)

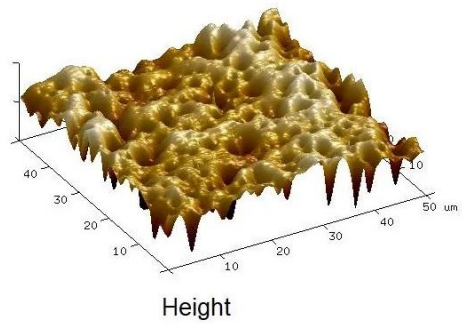
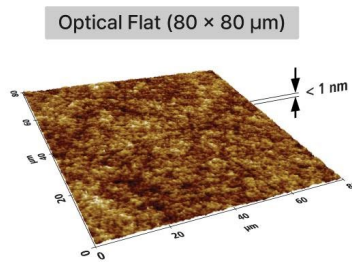
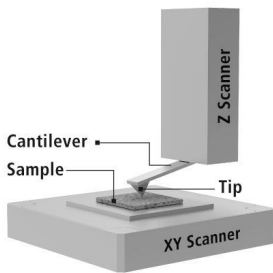
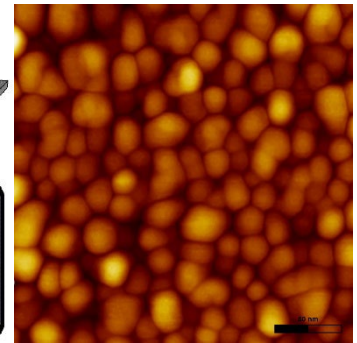
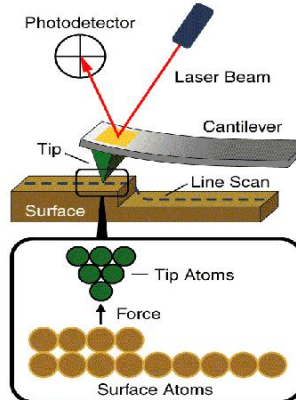
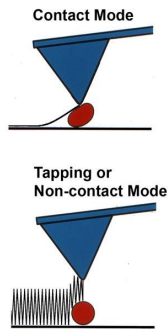
AFM дозволяє досліджувати поверхню практично на атомному рівні (рис. 9).



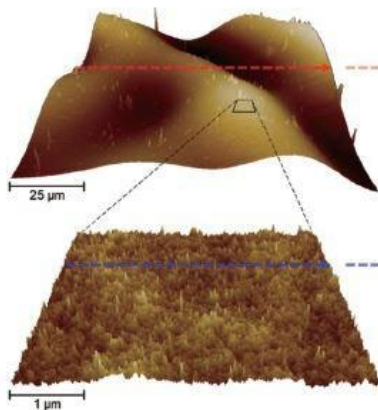
A Atomic Force Microscope



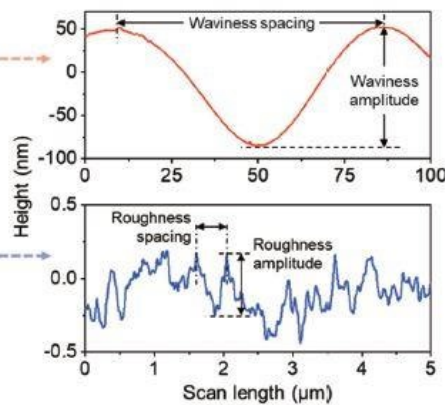
B AFM Imaging Modes



(a) 3D images



(b) Line profiles



(c) Line profile roughness

	Cut-off 100 μm	Cut-off 5 μm
Ra (nm)	43.88	0.11
Rq (nm)	48.90	0.14
Rpv (nm)	140.92	0.67

Рисунок 9 – Принцип роботи атомно-силової мікроскопії (Atome Force Microscope)

Принцип роботи AFM базується на взаємодії надтонкої голки — кантилевера — з поверхнею досліджуваного зразка. Під час сканування кантилевер переміщується над поверхнею та реагує на міжатомні сили притягання або відштовхування. Навіть незначні зміни рельєфу викликають відхилення кантилевера, які фіксуються лазерною системою та перетворюються у цифрову карту поверхні.

На відміну від оптичної або електронної мікроскопії, AFM дозволяє не лише отримати зображення поверхні, а й вимірювати її реальний тривимірний рельєф із надзвичайно високою точністю.

AFM використовується для:

- нанометричного аналізу поверхонь;
- дослідження наноструктур;
- оцінки наношорсткості;
- аналізу поверхонь після фемтосекундної лазерної обробки;
- дослідження тонких покриттів;
- аналізу лазерно-індукованих структур (LIPSS);
- оцінки зношування поверхонь на нанорівні.

Особливо важливе значення атомно-силової мікроскопії має у сучасному матеріалознавстві, біомедичній інженерії, нанотехнологіях та високоточному машинобудуванні, де властивості поверхні часто визначаються саме її наноструктурою.

За допомогою AFM можна досліджувати:

- висоту наноструктур;
- форму поверхневих виступів;
- глибину мікроканалів;
- рівномірність покриттів;
- локальні дефекти поверхні.

У цифровій метрології результати AFM-досліджень використовуються для створення високоточних цифрових моделей поверхні та аналізу впливу технологічних параметрів на формування мікро- і нанорельєфу.

Основною перевагою AFM є надзвичайно висока точність вимірювання, яка значно перевищує можливості традиційної оптичної мікроскопії. Водночас через невелику область сканування AFM зазвичай використовується для локального дослідження найбільш важливих ділянок поверхні.

1.3. Цифровий контроль якості та САД-інспекція

Сучасний цифровий контроль якості базується на порівнянні:

- еталонної САД-моделі, створеної конструктором;

- цифрового скану реальної виготовленої деталі.

Такий підхід отримав назву CAD-інспекція (Computer-Aided Inspection, CAI) і є одним із ключових елементів цифрового виробництва та концепції Industry 4.0 (рис.10, рис.11).

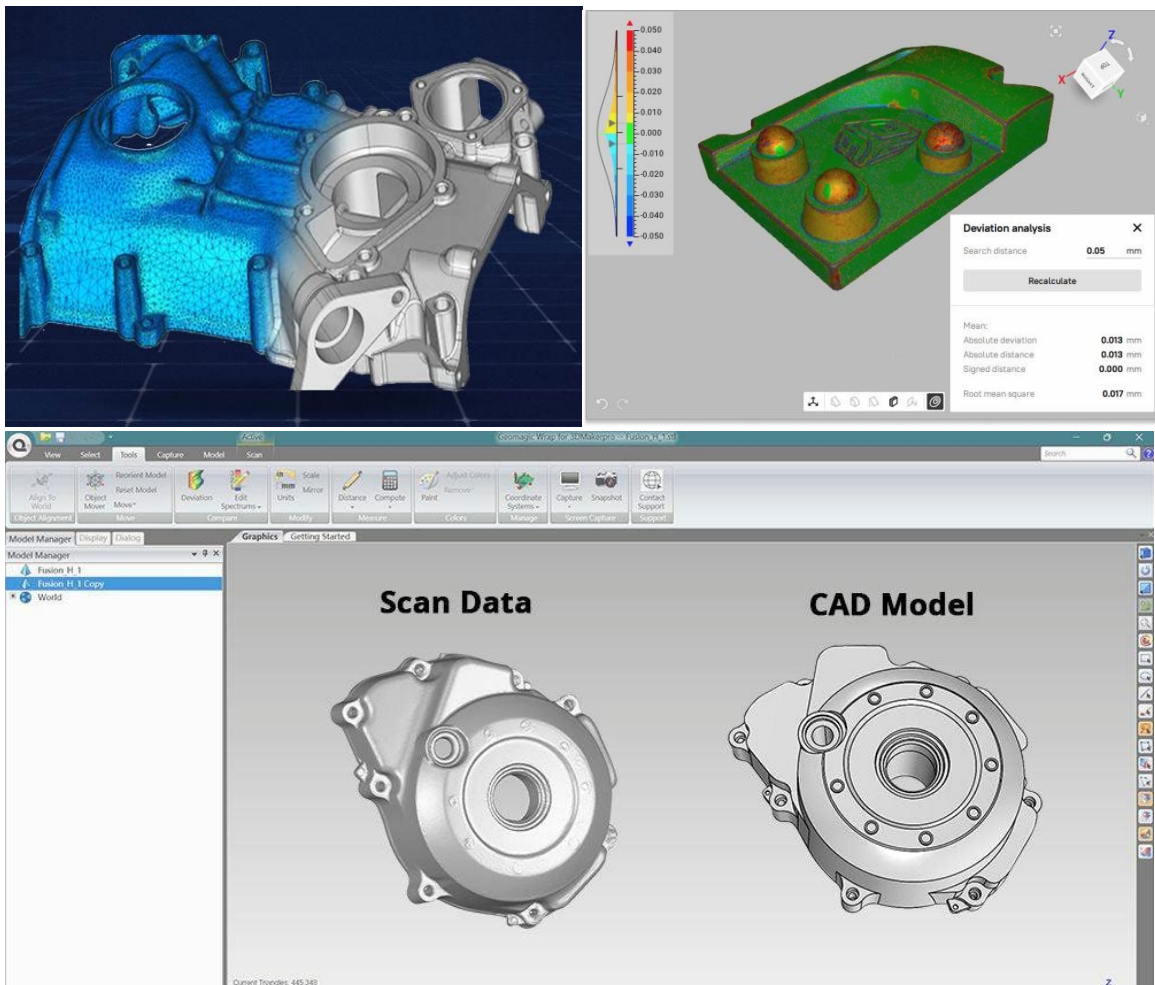
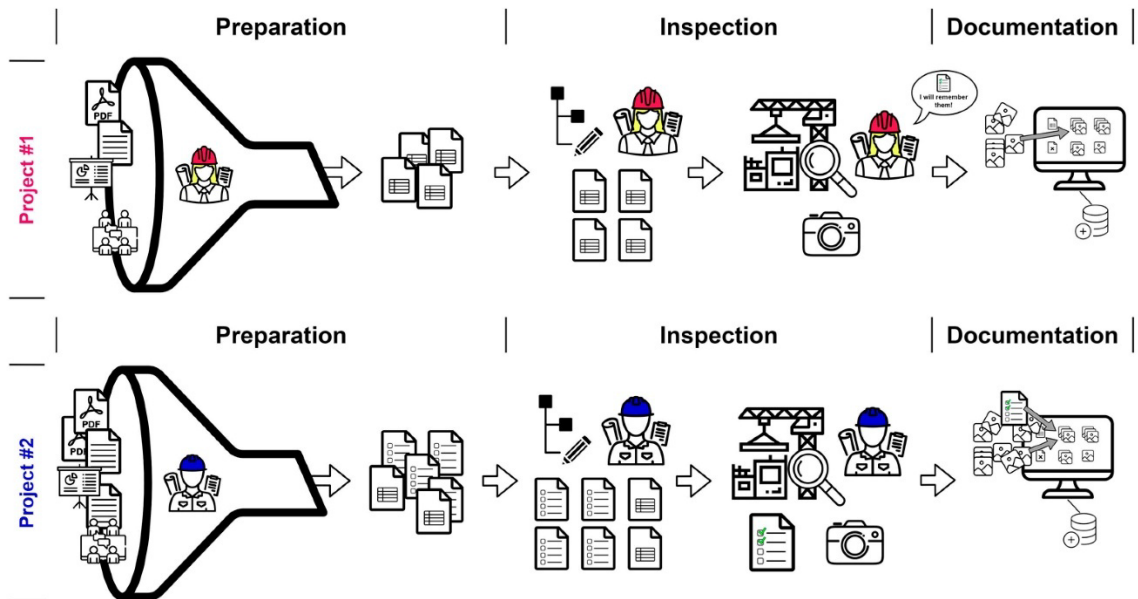


Рисунок 10 – CAD-інспекція



Рисунок 11 – Принцип застосування CAD-інспекції

Після сканування деталі система формує її цифровий образ. Залежно від типу обладнання результат може бути представлений у вигляді:

- хмари точок (Point Cloud);
- полігональної моделі;
- STL-моделі.

Хмара точок

Хмара точок являє собою набір координат великої кількості точок у просторі, які описують форму поверхні деталі. Кожна точка має власні координати X , Y , Z .

Чим більша кількість точок, тим точніше відтворюється геометрія поверхні.

STL-модель

STL-модель складається з великої кількості трикутників, які формують поверхню виробу. Саме STL є одним із основних форматів у:

- 3D-друці;
- лазерному скануванні;
- цифровій метрології;
- реверс-інжинірингу.

На відміну від CAD-моделі, STL не містить параметричної геометрії та історії побудови.

Суміщення моделей

Перед порівнянням необхідно правильно сумістити CAD-модель та цифровий скан. Для цього використовуються алгоритми:

- Best-Fit;
- ICP (Iterative Closest Point).

Алгоритм ICP автоматично виконує пошук найближчих точок між двома поверхнями та поступово мінімізує різницю між ними.

Фактично система намагається «накласти» реальну деталь на її ідеальну математичну модель.

Мінімізація помилки здійснюється шляхом пошуку найменшого середньоквадратичного відхилення:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}(x_i - y_i)^2}$$

де:

x_i – координати CAD-моделі;

y_i – координати сканованої поверхні;

n – кількість порівнюваних точок.

Результатом є кольорова карта відхилень, бо параметр RMS характеризує середню величину відхилення між реальною деталлю та еталонною моделлю.

Після суміщення моделей програмне забезпечення автоматично формує кольорову карту відхилень (Deviation Map або Heatmap) (рис. 12).

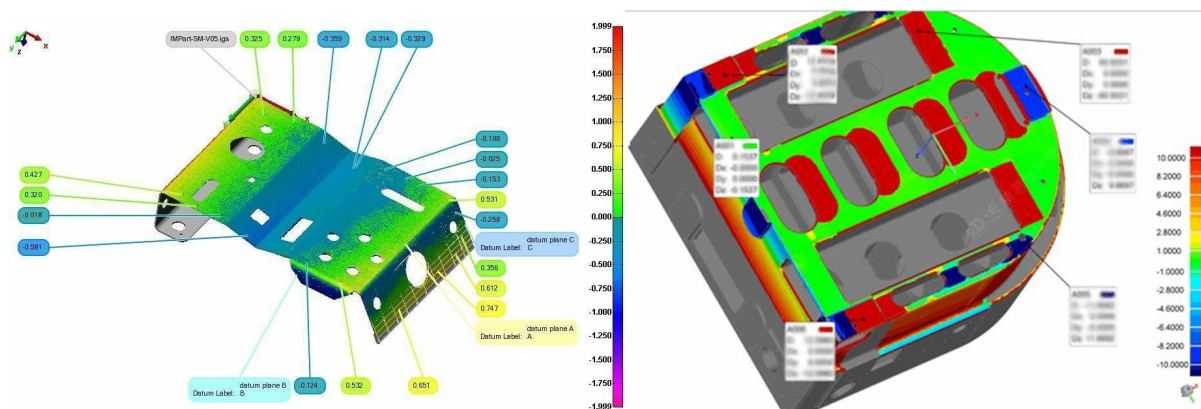


Рисунок 12 – Приклади карт відхилень

Кожен колір відповідає певному значенню похибки (табл.1).

За допомогою карти відхилень можна швидко визначити: де знаходиться дефект; наскільки він критичний; який характер має відхилення; чи відповідає деталь технічним вимогам.

Отже у сучасному машинобудуванні CAD-інспекція широко застосовується для: контролю деталей після CNC-обробки; аналізу виробів адитивного виробництва; перевірки турбінних лопаток; контролю штампів і прес-форм; аналізу зношування деталей; створення цифрових двійників виробів.

Особливо важливою CAD-інспекція є для складнопрофільних деталей, геометрію яких практично неможливо повністю перевірити класичними контактними методами вимірювання.

2. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Оскільки робота виконується дистанційно, ви маєте повну свободу у виборі інструментів. Нижче наведено посилання на ресурси, які є безкоштовними для освітніх цілей.

2.1. Основні інструменти для метрологічного аналізу

GOM Inspect (ZEISS Quality Suite): Професійний стандарт у світі метрології. Безкоштовна версія (Hands-on) дозволяє виконувати повноцінний аналіз відхилень.

Де взяти: <https://www.zeiss.com/metrology/en/software/zeiss-quality-suite.html> . Потрібна безкоштовна реєстрація.

ВАЖЛИВО: у програмі використовуйте вкладку «Sample Data» (меню Help), щоб завантажити готові пари моделей (CAD + Scan) для тренування.

CloudCompare: потужна програма з відкритим кодом для обробки хмар точок. Ідеально підходить для порівняння двох складних сіток (Mesh).

Де взяти: <https://www.cloudcompare.org/main.html> . Не потребує реєстрації.

2.2. Інструменти для підготовки та моделювання

Autodesk Meshmixer: якщо ви хочете самостійно створити «дефектну» деталь для дослідження, ця програма дозволяє деформувати STL-файли як пластилін.

Де взяти: <https://www.meshmixer.com/download.html> .

FreeCAD: Параметричний 3D-моделювальник. Використовуйте його для перегляду STEP-файлів або створення власних еталонних моделей.

Де взяти: <https://www.freecad.org/> .

2.3. Де взяти об'єкти для дослідження (Репозиторії)

Якщо ви не використовуєте вбудовані зразки GOM, завантажте інженерну модель тут:

GrabCAD: <https://grabcad.com/library> . Шукайте за запитами: *Engine valve*, *Turbine blade*, *Flange*, *Gear*. Обирайте файли у форматі .STEP або .STL.

3. ПІДГОТОВКА ДАНИХ ДО РОБОТИ

Оскільки практична робота виконується у дистанційному форматі, ви маєте самостійно сформувати цифровий об'єкт дослідження, обравши один із двох сценаріїв:

Варіант А: Використання Sample Data у GOM Inspect (Рекомендовано для початківців)

Програма містить професійно підготовлені набори даних, що відповідають реальним промисловим стандартам.

1. Відкрийте меню «Help».
2. Оберіть пункт «Sample Data».
3. Завантажте навчальний пакет. *Результат:* Ви отримаєте ідеальну CAD-модель та STL-скан реальної деталі (наприклад, литої кришки або кронштейна) з уже наявними виробничими відхиленнями.

Варіант Б: Самостійне створення цифрового дефекту (Для поглибленого вивчення)

Цей метод дозволяє змодельовати конкретний тип браку (наприклад, жолоблення пластику при охолодженні).

1. Завантажте будь-яку інженерну CAD-модель із GrabCAD. Збережіть її як «Еталон».
2. Відкрийте копію цієї моделі у «Meshmixer».
3. Використовуючи інструменти деформації (Sculpt -> Grab), виконайте локальну зміну геометрії (викривлення площини або розтягування отвору).
4. Збережіть деформовану модель у форматі STL. Вона буде імітувати «реальну деталь» зі сканера.

4. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Студент повинен виконати прецизійне порівняння CAD-моделі та сканованої поверхні, побудувати карту відхилень та зробити інженерний висновок про придатність виробу.

4.1. Покроковий алгоритм виконання

Крок 1. Імпорт та перевірка цілісності. Імпортуйте еталонну CAD-модель та STL-модель «реальної» деталі. Переконайтеся, що моделі мають однакові одиниці вимірювання (міліметри).

Крок 2. Попереднє вирівнювання (Pre-alignment). Виконайте початкове суміщення моделей вручну або за допомогою команди «Initial Alignment». *Важливо:* Моделі мають бути орієнтовані однаково в просторі, щоб автоматичні алгоритми спрацювали коректно.

Крок 3. Виконання Best-Fit Alignment. Це ключовий етап цифрової метрології. Програма використовує алгоритм ICP (Iterative Closest Point), щоб сумістити моделі з мінімальною середньоквадратичною помилкою.

- Зафіксуйте у звіті значення RMS-відхилення (чим воно менше, тим точніше відбулося суміщення).

Крок 4. Побудова карти відхилень (Surface Comparison). Запустіть візуалізацію відхилень. Ви отримаєте кольорову карту, де кожен колір відповідає певній відстані між еталоном та фактом (табл.3).

Таблиця 3

Колір	Значення	Інтерпретація
Зелений	±Допуск	Деталь відповідає КД (конструкторській документації)
Червоний	Понад допуск (+)	Наявний надлишок матеріалу (припуск)
Синій	Понад допуск (-)	Недостатність матеріалу (брак, усадка)

Крок 5. Вимірювання критичних параметрів. Проведіть «віртуальний вимір» конкретних ділянок за допомогою інструментів *Distance* або *Caliper*. Результати занесіть у таблицю 4:

Таблиця 4 – Таблиця результатів

Параметр	CAD-модель (мм)	Реальна модель (мм)	Відхилення (мм)
Діаметр отвору			
Товщина стінки			
Відстань між центрами			

Таблиця 5 –Індивідуальне завдання

Варіант	Тип деталі	Метод виготовлення	Допуск
1	Турбінна лопатка	DED + CNC	±0.02 мм
2	Корпус редуктора	FDM-друк	±0.20 мм
3	Медичний імплант	SLM	±0.01 мм
4	Форсунка	Лазерне спікання	±0.05 мм
5	Кронштейн БПЛА	Топологічна оптимізація	±0.15 мм
6	Вал-шестерня	CNC-фрезерування	±0.03 мм
7	Корпус насоса	Лиття + мехобробка	±0.10 мм
8	Пластина теплообмінника	Лазерне різання	±0.08 мм
9	Авіаційний кронштейн	WAAM	±0.12 мм
10	Стоматологічний міст	SLM	±0.01 мм

5. ФОРМУВАННЯ ВИСНОВКУ

У висновку студент повинен дати відповіді на наступні питання:

1. Чи вкладається деталь у заданий варіантом допуск?
2. Який характер має дефект (наприклад: «рівномірна усадка по всьому контуру» або «локальне викривлення площини»)?
3. Яка можлива технологічна причина відхилення? (Наприклад: перегрів лазера при наплавленні або недостатній тиск при литті).
4. **Остаточний вердикт:** Придатна деталь, підлягає виправленню чи є остаточним браком.

6. ВИМОГИ ДО ЗВІТУ

Звіт повинен містити: тему роботи; мету; короткі теоретичні відомості; скріншоти моделей; карту відхилень; таблицю вимірювань; аналіз результатів; висновки.

НАВЧАЛЬНІ РЕСУРСИ (Для самостійної підготовки)

Для успішного виконання роботи рекомендується ознайомитися з наступними матеріалами:

Відео-курс від ZEISS (ENG): <https://training.zeiss.com/learn> – покрокові уроки від інтерфейсу до звітів.

Посібник CloudCompare (ENG): https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Distances_Computation – як правильно розрахувати відстань між хмарами точок.

NIST Tutorials: <https://www.nist.gov/pml/weights-and-measures/metrology-101> – для розуміння природи похибок вимірювання.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. У чому різниця між контактною та безконтактною метрологією?
2. Які переваги має конфокальна мікроскопія?
3. Для чого використовується SEM?
4. Що таке хмара точок?
5. Яке призначення алгоритму ICP?
6. Що показує RMS-відхилення?
7. Як інтерпретувати кольорову карту дефектів?
8. Чому CAD-інспекція є критично важливою для адитивного виробництва?
9. Які дефекти можуть виникати після 3D-друку?
10. Які переваги цифрового контролю якості у концепції Industry 4.0?

Матеріал сформовано з урахуванням сучасних підходів цифрової метрології, дистанційного навчання та практик цифрового виробництва.

Список використаних джерел

- [1] National Institute of Standards and Technology (NIST). Metrology and Measurement Science [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nist.gov/topics/metrology> (дата звернення: 03.05.2026).
- [2] ZEISS Industrial Quality Solutions. Industrial Metrology and Quality Inspection [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.zeiss.com/metrology/en/home.html> (дата звернення: 03.05.2026).
- [3] GOM GmbH. GOM Inspect – 3D Metrology Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.gom.com/en/products/gom-inspect> (дата звернення: 05.05.2026).
- [4] CloudCompare Documentation. Open Source 3D Point Cloud Processing Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Main_Page (дата звернення: 05.05.2026).
- [5] PolyWorks Europa. PolyWorks – 3D Metrology Solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.polyworks.com/> (дата звернення: 07.05.2026).
- [6] Hexagon AB. Manufacturing Intelligence Division [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hexagon.com/products/manufacturing-intelligence> (дата звернення: 07.05.2026).
- [7] KODA. Метрологічне та вимірювальне обладнання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://koda.ua/> (дата звернення: 07.05.2026).
- [8] LEO Metrology Ukraine. Системи промислової метрології [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://leometry.com.ua/> (дата звернення: 11.05.2026).
- [9] Bruker Corporation. Atomic Force Microscopy – Principles and Applications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/microscopes/materials-afm.html> (дата звернення: 07.05.2026).
- [10] Olympus Life Science. Confocal Microscopy Resource Center [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/techniques/confocal/> (дата звернення: 07.05.2026).
- [11] Thermo Fisher Scientific. Scanning Electron Microscopy (SEM) Overview [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.thermofisher.com/ua/en/home/materials-science/learning-center/electron-microscopy-resources/scanning-electron-microscopy.html> (дата звернення: 08.05.2026).
- [12] Autodesk Inc. Meshmixer [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://meshmixer.com/> (дата звернення: 08.05.2026).

- [13] FreeCAD Project Association. FreeCAD Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.freecad.org/> (дата звернения: 07.05.2026).
- [14] GrabCAD Community Library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://grabcad.com/library> (дата звернения: 07.05.2026).
- [15] ISO 25178-2:2021. Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface Texture: Areal — Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters. – Geneva : International Organization for Standardization, 2021.
- [16] Bhushan, B. Introduction to Tribology. – 3rd ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. – 744 p.
- [17] Goldstein, J., Newbury, D., Joy, D., Lyman, C., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., Michael, J. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. – 4th ed. – New York : Springer, 2018. – 970 p.
- [18] Eaton, P., West, P. Atomic Force Microscopy. – Oxford : Oxford University Press, 2010. – 244 p.
- [19] Leach, R. Optical Measurement of Surface Topography. – Berlin : Springer, 2011. – 322 p.
- [20] Groover, M. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. – 7th ed. – Hoboken : Wiley, 2020. – 816 p.
- [21] ISO 10303-242:2022. Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 242: Managed model-based 3D engineering.
- [22] Cults 3D / Thingiverse Educational Data Sets [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cults3d.com/> або <https://www.thingiverse.com/>
- [23] MeshLab Documentation. Open Source System for Processing and Editing 3D Triangular Meshes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.meshlab.net/> (дата звернения: 11.05.2026).
- [24] National Metrology Institute of Germany (PTB). Digital Calibration Certificates (DCC) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ptb.de/dcc/> (дата звернения: 11.05.2026).
- [25] YouTube Channel: ZEISS Quality Suite Training [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/@ZEISSQualitySuite>

Навчальне видання
БАСОВА Євгенія Володимирівна

ЦИФРОВИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ
(DIGITAL METROLOGY)
ТА АНАЛІЗ ВІДХИЛЕНЬ CAD-МОДЕЛЕЙ

Лабораторний практикум
з навчальної дисципліни
«Сучасні тенденції машинобудівних виробництв»
для студентів усіх форм навчання
за спеціальністю
G9 «Прикладна механіка»
та G11 «Машинобудування за спеціалізаціями»

Роботу до видання рекомендував проф. Степанов М.С.
Відповідальний за випуск (зав. каф.)

В авторській редакції

План 2026 р., поз. ____

Підп. до друку _____. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 0,78.

Наклад _____ прим. Зам. № _____. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Друкарня