

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

DOI: 10.20535/1970.70(2).2025.348012

УДК 621.317:531.7:620.179

**ОЦІНЮВАННЯ ВІДТВОРЮВАНOSTІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ
ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МІКРОСТРУКТУР**¹⁾Андрейко В. О., ¹⁾Жайворонок І. С., ¹⁾Мацена С. М., ²⁾Волошко О. В., ³⁾Жуйков Д. Б.¹⁾Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна²⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

³⁾Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
Харків, УкраїнаE-mail: vetal12007@ukr.net; zhaivoronok1988@ukr.net; s.matsepa@chdtu.edu.ua;
voloshko_o@ukr.net; 1967dbz@gmail.com

У статті основну увагу зосереджено на ключовій властивості таких інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), а саме: здатності давати стабільні результати за зміни умов і виконавців. Адже саме відтвореність визначає довіру до вимірюваних параметрів і можливість їхнього практичного використання. Постановка проблеми статті ґрунтувалася на тих фактах, що при дослідженні мікроструктур необхідно дотримуватися числово обґрунтованих меж допустимих розбіжностей між лабораторіями для комплексів, що поєднують сканувальні зонди, вимірювальну електроніку та програмні модулі оброблення. Аналіз попередніх досліджень показав, що наявні роботи переважно обмежувалися внутрішньолабораторними перевірками повторюваності й не давали міжлабораторних свідчень узгодженості для інтегрованих ІВС, а також рідко пропонували прозорі критерії прийнятності для контролю якості. Метою роботи є кількісне підтвердження відтворюваності результатів випробувань ІВС і встановлення зрозумілих порогових значень для подальшої валідації вимірювань мікроструктур. В роботі виконано дві незалежні серії по 32 вимірювання у двох лабораторіях на контрольному тест-зразку з використанням сканувальної зондової мікроскопії та розробленої ІВС на базі приладу NT-206.

Отримані протоколи було гармонізовано, а порядок вимірювань рандомізовано. Проведене калібрування еталона, його статистичне опрацювання включало виділення лабораторного фактора, оцінювання дисперсій компонентів і побудову 95% меж згоди. Для обох серій зразків було отримано однакове середнє значення мікрогеометрії поверхні на рівні 10,48 нм. Суми квадратів відхилень при цьому складали, відповідно, 0,0512 і 0,0480 за дисперсії міжсерійної відтворюваності 0,0032 і стандартного відхилення 0,056. При цьому, гранична різниця при 95% довіри становить $R = 0,155$, тоді як максимальна спостережена різниця між лабораторіями дорівнює 0,08 (розподіли залишків нормальні, трендів за порядком вимірювань і систематичного зсуву не виявлено). В результаті випробувань результати отримані на ІВС є стабільними та метрологічно сумісними між лабораторіями.

Запропонована процедура оцінювання відтворюваності придатна для включення до регламентів валідації, а встановлені порогові значення можуть слугувати базою для регулярного міжлабораторного контролю й масштабування на інші параметри та сценарії вимірювань при розробленні та дослідженні функціональних мікроструктур.

Ключові слова: міжлабораторна узгодженість; метрологічна сумісність; сканувальна зондова мікроскопія; стандартне відхилення; калібрувальний тест-зразок.

Вступ

Останніми роками функціональні мікроструктури: від тонкоплівкових MEMS-сенсорів і мікрофлюїдних каналів до багатошарових інтерконек-

торів стали основними елементами виробів у мікроелектроніці, фотоніці та біомедичних приладах [1, 2]. Проте така популярність цих елементів ставить нові виклики перед інженерами та науковця-

ми. Так, будь-яка похибка у мікрогеометрії таких мікроструктур, безпосередньо відгукується на надійності, енергоспоживанні та тривалості життєвого циклу пристроїв на їх основі. Саме тому верифікація вимірювань у таких застосуваннях переходить від локальної повторюваності результатів вимірювання їх мікрогеометрії до суворої міжлабораторної відтворюваності, яка має спиратися на формальні межі прийнятності та прозорі процедури оцінювання.

У промисловій метрології рамку для таких оцінок задають міжнародні стандарти. Так, ISO 5725-2:2019 описує, як кількісно визначати повторюваність і відтворюваність методики, а підходи GUM 1995 (JCGM 100:2008), як коректно оцінювати та передавати невизначеність результатів. Ці показники є критичними для прийняття рішень у виробничих процесах. Застосування таких підходів до інтегрованих вимірювальних систем дозволяє не лише порівнювати результати в різних лабораторіях, а й встановлювати обґрунтовані пороги для регулярного контролю якості.

Так, для дослідження параметрів топографії поверхонь нормативною базою слугує пакет стандартів ДСТУ EN ISO 25178:2022, який уніфікує параметри шорсткості та умови їх отримання, тим самим зменшуючи розрив між алгоритмами різних засобів вимірювання та результатами, що мають бути відтворені між різними випробувальними установами. Отже, перехід на уніфіковані параметри є необхідною передумовою для масштабування даних з лабораторних стендів до виробничих ліній.

Паралельно відбувається розвиток самого інструментарію. Так, наприклад, метод просторової атомно-силової мікроскопії (3D-AFM), призначений для вимірювання бокових стінок складних мікроструктур, демонструє, що навіть за ускладненої мікрогеометрії можна підтримувати високу повторюваність серій вимірювань за умови дотримання чітких протоколів і трасованого калібрування [3]. Проте, такі результати потребують підтвердження у перехресних (міжлабораторних) сценаріях. Цей глобальний підхід відображають і багатоцентричні ініціативи з порівняння методів рельєфометрії, які акцентують на прозорості даних, узгодженні експериментальних методик і відкритих межах згоди.

Отже, практичний запит завдання вимірювання геометричних параметрів функціональних мікроструктур полягає у створенні зрозумілої, статистично обґрунтованої процедури оцінювання відтворюваності для інтегрованої інформаційно-вимірювальної системи (IBC), що поєднує сканувальні зонди, електроніку та програмні модулі оброблення: із чіткими порогоми прийнятності, валідованими протоколами і прив'язкою до міжнародних норм метрології. Тому, оцінювання узгодженості та надійності результатів випробувань інформаційно-вимірювальної системи при вимі-

рюванні геометрії функціональних мікроструктур є завданням актуальним.

Постановка проблеми.

У 2021–2025 рр. різко зросла кількість застосувань функціональних мікроструктур: від мікрооптики та мікрофлюїдних каналів до трибологічних текстур і сенсорних елементів. Геометричні параметри таких структур (висота й ширина елементів, період і заповнення ґраток, кут нахилу стінок, форма вершин і западин) безпосередньо визначають їх оптичну, гідродинамічну чи електрофізичну функціональність, тому контроль 3D-топографії стає критичною ланкою циклу «проектування – виготовлення – експлуатація».

Міжнародні дослідження останніх років демонструють, що навіть для поверхонь з простою геометрією, забезпечення стабільності параметрів шорсткості є нетривіальним завданням. Так, у оглядовій роботі В.Алара та співавторів [4] надано систематизований аналіз вибраних метрологічних параметрів (S_a , S_q , S_z , S_{dq} , S_{dr}) за стандартом ISO 25178:2022 для високо-роздільних вимірювань методом атомно-силової мікроскопії. Авторами встановлено високу чутливість цих параметрів до умов сканування, вибору фільтрів і режимів оброблення даних, а також сформульовано метролого-орієнтовані рекомендації щодо кількісної інтерпретації 3D-текстур поверхні. Групою дослідників під керівництвом К.Палової [5] запропоновані процедури оцінювання шорсткості оброблених оптичних деталей, включно з експериментально обґрунтованим вибором числа повторних вимірювань, методикою оцінювання невизначеності та аналізом впливу швидкості вимірювання й параметрів фільтрації на повторюваність показника шорсткості поверхні R_a . Проте, обидва підходи орієнтовані переважно на стандартні еталонні оптичні поверхні або класичні деталі машин і не розглядають повністю проблематику складних функціональних мікроструктур у складі інтегрованої IBC.

Проблема, власне, повторюваності та відтворюваності вимірювань 3D-топографії за останні роки отримала окремий фокус. Так, у дослідженні А.Разуміча та співавторів [6] проаналізовано повторюваність і відтворюваність параметрів мікрогеометрії S_a , S_q , S_z оптичних поверхонь, досліджених методом АСМ, згідно з ISO 5725-2:2019. Проведені дослідження показали, що навіть за довготривалої експлуатації прилад може зберігати стабільний рівень дотримання нанометрової точності на еталонах, тоді як реальні зразки проявляють істотну варіабельність через неоднорідність поверхні. Група вчених під керівництвом К.Енглера [7] запропонували новий метод оцінювання придатності вимірювальної системи для параметрів шорсткості, який поєднує підходи GUM 1995 (JCGM 100:2008) та вимірювального системного аналізу (BCA) і демонструє, що стандартні BCA-процедури не завжди

адекватно описують реальну поведінку систем контролю мікрогравітностей поверхні. В цій роботі показані можливості сучасної статистичної та нормативної бази, проте розглядається або окремі засіб вимірювання, або типізовані поверхні, не охоплюючи повний ланцюг «об'єкт – ІВС – алгоритми оброблення» для функціональних мікроструктур зі складною 3D-геометрією.

В українському науковому просторі за період 2021–2025 роки формується власна школа нановимірювань, орієнтована на трасованість до ДСТУ EN ISO 25178:2022 та інтеграцію різних засобів контролю. Так, у статті В.П. Кваснікова та М.О. Катаєвої [8] виконано детальний аналіз і класифікацію метрологічного забезпечення вимірювань рельєфу нанооб'єктів, показано переваги скануючої зондової мікроскопії й обґрунтовано доцільність інтеграції кількох методів у єдину вимірювальну систему для підвищення надійності результатів. В той же час, В.Я. Павленко [9] розглядає перспективні рішення автоматизації методів вимірювання в нанометричному діапазоні, наголошуючи на необхідності програмно-орієнтованих ІВС із автоматизованою заміною об'єктів і датчиків та оцінкою результатів, що безпосередньо підводить до проблеми відтворюваності в умовах серійних вимірювань. Робота [10] під керівництвом С.Єфименка демонструє застосування коваріаційного аналізу для виокремлення внесків різних факторів у похибку колориметричного контролю та оцінювання значущості відмінностей між серіями вимірювань, пропонуючи універсальну статистичну схему для аналізу повторюваності результатів.

Разом із тим аналіз зазначених джерел показує, що ключові аспекти оцінювання відтворюваності результатів випробувань саме інформаційно-вимірювальних систем для функціональних мікроструктур лишаються недостатньо формалізованими. По-перше, не розроблено узгоджених протоколів, які б поєднували вимоги ДСТУ EN ISO 25178:2022 щодо параметризації поверхні та ISO 5725-2:2019 щодо оцінювання повторюваності й відтворюваності, з урахуванням специфіки високодисперсних мікрорельєфів і локальних функціональних елементів, а не лише усередненої шорсткості. По-друге, фактично відсутні системні підходи до розкладання загальної варіабельності результатів ІВС на внески від об'єктної неоднорідності мікроструктури, похибок позиціонування та стабільності зондуючих модулів, алгоритмічних фільтрацій і процедур апроксимації поверхні. По-третє, на практиці майже не описано методик, які б забезпечували трасованість 3D-параметрів мікроструктур до еталонів і дозволяли б узгоджувати невизначеності для різних режимів роботи ІВС.

У цьому контексті науково-практичною проблемою стає розроблення й обґрунтування єдиної методики оцінювання відтворюваності результатів випробувань інформаційно-

вимірювальної системи для вимірювання геометричних параметрів функціональних мікроструктур. Така методика має інтегрувати сучасні підходи GUM 1995 (JCGM 100:2008), ВСА, коваріаційний та дисперсійний аналіз, методи планування експерименту й аналізу стабільності ІВС у часі, адаптовані до багатомасштабної 3D-геометрії та складної фізики взаємодії вимірювального інструменту з поверхнею мікроструктури. Результатом повинні стати практичні рекомендації щодо структури випробувань, вибору еталонних та робочих зразків, кількості повторень, алгоритмів оброблення та критеріїв прийнятності ІВС, які забезпечать метрологічно обґрунтоване, трасоване й відтворюване вимірювання геометричних параметрів функціональних мікроструктур у сучасних інформаційно-вимірювальних комплексах.

Мета статті: досягти підтвердженої міжлабораторної відтворюваності інформаційно-вимірювальної системи для вимірювання геометрії функціональних мікроструктур шляхом двох незалежних серій вимірювань на тест-зразку за допомогою методу атомно-силової мікроскопії (АСМ), уніфікованих протоколів калібрування та застосування фіксованої статистичної оцінки на рівні 95%, що зменшить невизначеність, підвищить достовірність і уможливить формалізовану валідацію та регулярний міжлабораторний контроль.

Отже, запропоновані в роботі підходи та отримувані результати повинні забезпечити прецизійне, відтворюване й метрологічно сумісне вимірювання геометричних параметрів мікроструктур із зниженням невизначеності, чіткими пороговими критеріями прийнятності та можливістю регулярного міжлабораторного контролю і масштабування у виробничі процеси та сертифікаційні процедури.

Порядок проведення випробувань

Об'єктом випробувань слугувала інтегрована інформаційно-вимірювальна система (ІВС) на базі сканувальної зондової мікроскопії (прилад NT-206) з уніфікованим програмним модулем оброблення. Як функціональні мікроструктури в дослідженнях приймалися контрольні тест-зразки, що моделювали критичні фрагменти поверхні мікрооптичних елементів (увідні лінзи типових для технічного зору або оптичної сенсорики мікропристрою). Такий вибір зумовлений чутливістю поверхонь цих елементів до наномасштабних дефектів і потребою у відтворюваній оцінці Ra, Rq, Rz. Сукупний обсяг об'єктів дослідження – дві незалежні серії по 32 вимірювання.

Як контрольний застосовано тест-зразок (калібрувальна решітка TGZ1) із стабільним нанорельєфом (номінальний рівень мікрогеометрії порядку 10–11 нм), попередньо відкалібрований за внутрішньою процедурою. Для мінімізації апарат-

них та операторських впливів в обох лабораторіях використано однакові зондові набори (кремнієві зонди, для контактних досліджень на кантилевері CSC-38), ідентичні параметри сканування та стандартизовані протоколи позиціонування; довкілля утримувалося в однакових межах температури ($24^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$) та відносної вологості ($45\% \pm 0,5\%$).

Дослідження проводилися в двох незалежних лабораторіях нанометричних досліджень: при Черкаському державному технологічному університеті (далі – Лабораторія А); та при Одеському національному університеті імені І.І.Мечнікова (далі – Лабораторія В).

Ядро IBC становить вимірювальний модуль, що містить: вимірювальну голівку АСМ інтегровану в модуль XYZ-п'єзосканеру, контролер зі

зворотним зв'язком за силою або амплітудою коливань вимірювального інструменту – зонду АСМ, блок попереднього оброблення сигналів, модуль збирання даних (МЗД), програмно-аналітичний модуль з процедурами калібрування та статистичної оцінки.

На рис.1 показана структурно-функціональна схема цієї IBC. Запропонована схема організації такої IBC забезпечується замкненим контуром, що дає високу адаптивність вимірювальній системі, коли автопідбір PID-параметрів та швидкості сканування здійснюється за показниками добротності вимірювального інструменту в реальному часі.



Рис. 1. Структурно-функціональна схема розробленої авторами інформаційно-вимірювальної системи

IBC працює в контактному або напівконтактному режимах із підтриманням сталої взаємодії «зонд–зразок». Величина помилки зворотного зв'язку (розузгодження за силою або амплітудою) мінімізується PID-регулятором, а алгоритм адап-

тації коригує швидкість рядка, крок дискретизації та параметри фільтрації, якщо поточні метрики добротності виходять за допустимі значення. Результатом проведених досліджень є карта висот і обчислені згідно ДСТУ EN ISO 25178:2022

параметри шорсткості.

Узагальнені метрологічні характеристики IBC представлені в табл. 1. Ключовими для від-

творюваності є стабільність зворотного зв'язку, повторюваність відліків та трасована калібровка за еталонними профілем і висотою.

Табл. 1. Узагальнені метрологічні характеристики IBC

Показник	Позначення	Номинальне значення або діапазон	Одиниця вимірювання	Примітка (умови вимірювання)
Діапазон вимірювань по осям X, Y	L_{XY}	$0...50 \times 0...50$	мкм	Повний розмір поля сканування
Діапазон вимірювання по осі Z	L_Z	$0...2$	мкм	Робочий хід Z-п'єзостолу
Мінімальний крок сканування по осям X, Y	$\Delta x, \Delta y$	$1...5$	нм	Встановлюється контролером
Мінімальний крок по осі Z (роздільність)	Δz	$0,03...0,1$	нм	Визначається розрядністю АЦП та шумом
Розрядність вимірювального каналу АЦП	n	$18...20$	біт	Для каналів від датчиків / мікроголівки
Основна похибка за висотою профілю	δ_z	$\pm(0,3 \text{ нм} + 1 \% z)$	нм, %	Для діапазону $0...1$ мкм, $k=2$
Основна відносна похибка за X, Y	δ_{XY}	$\pm 1...2$	%	Похибка масштабного коефіцієнта XY-сканера
Нелінійність переміщень п'єзостолу	N_L	$\leq 0,2$	% від діапазону	Після програмної лінеаризації
Повторюваність (середньоквадратичне значення)	s_r	$\leq 0,2$	нм	Стандартне відхилення висоти в точці
Відтворюваність між циклами вимірювань	s_R	$\leq 0,5$	нм	За результатами серії сканувань
Шум вимірювального каналу по Z (середньоквадратичне значення)	n_z	$\leq 0,05$	нм	При вимкненому скануванні, смуга до 1 кГц
Дрейф по Z	D_z	$\leq 0,5$	нм/хв	За стабільної температури ($\pm 0,5$ °C)
Смуга пропускання контуру зворотного зв'язку	f_{BW}	$1...10$	кГц	По рівню -3 дБ
Частота дискретизації модуля збирання даних	f_s	$50...200$	кГц	Для каналів зворотного зв'язку та сигналів датчиків
Вимірювані параметри за ISO 25178:2022	—	Sa, Sq, Sz, Ssk, Sku тощо	—	Визначається роздільністю та полем сканування
Розширена невизначеність параметрів	U_S	$5...10$	%	Для основних 3D-параметрів при $k=2$

Методика проведення вимірювань. Перед початком серії вимірювань кожна лабораторія здійснювала перевірку лабораторного вимірювального обладнання та запропонованої ІВТ на калібрувальній решітці та оформлювала протоколи придатності вимірювального ланцюга [11]. При цьому, результати аналізу невизначеності мали відповідати стандарту GUM 1995 (JCGM 100:2008) та принципам ISO 5725-2:2019 щодо їх повторюваності та відтворюваності. Далі проводився уніфікований цикл збирання даних: фіксоване поле сканування, дискретизація та швидкість, стандартизовані фільтри попереднього оброблення, автоматизоване видалення тренду та побудова профілів. Порядок проходжень вимірювальних ділянок на зразку обирався випадковим чином, а протоколи було відформатовано за єдиним шаблоном, що унеможлиблюва-

ло «витік» інформації про походження записів під час подальшого аналізу.

Загалом, випробування реалізовувалися як дві незалежні серії (C1 та C2) по 32 вимірювання в кожній з двох лабораторій із гармонізованими налаштуваннями. Схема виконання випробування IBC наведена на рис. 2.

Отже, обґрунтовано й реалізовано відтворювану методику випробувань IBC на базі АСМ з трасованим калібруванням за еталонною решіткою, гармонізованими налаштуваннями в двох незалежних лабораторіях та жорстко контрольованими умовами довкілля, що забезпечило стабільність зворотного зв'язку, високу просторову роздільність (до 0,03–0,1 нм по Z) і малу похибку вимірювань шорсткості.

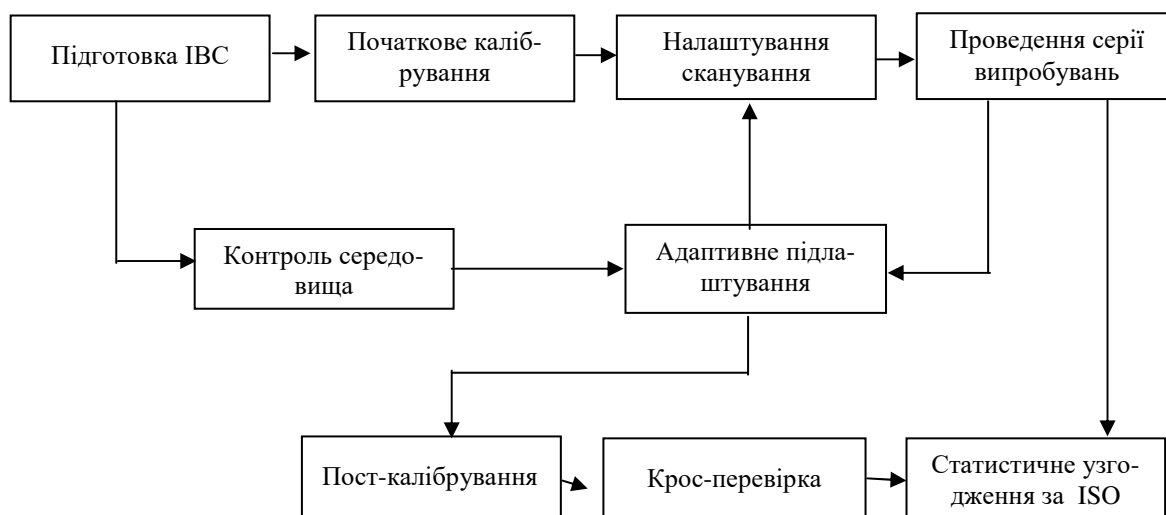


Рис. 2. Блок-схема методики виконання випробування

Експериментально доведено, що узгоджений цикл збирання й оброблення даних (дві серії C1 та C2 по 32 вимірювання, єдиний шаблон протоколів, аналіз невизначеності за стандартом GUM 1995 (JCGM 100:2008) та принципам ISO 5725-2:2019, а також оцінка параметрів за ДСТУ EN ISO 25178:2022) гарантує статистично обґрунтовану оцінку таких параметрів мікрогеометрії поверхні, як: Ra, Rq, Rz і ключових параметрів поверхні на прикладі прецизійних мікрооптичних елементів.

Оцінювання відтворюваності результатів випробувань інформаційно-вимірювальної системи

Статистичне оброблення результатів вимірювання включало дисперсійний аналіз з виділенням лабораторного фактора, оцінювання відтворюва-

ності між серіями та побудову статистичної оцінки на рівні 95% [12]. Для обох серій зразків було отримане однакове середнє значення мікрогеометрії 10,48 нм, тоді, як суми квадратів відхилень становили, відповідно, 0,0512 і 0,0480, дисперсія міжсерійної відтворюваності – 0,0032, а стандартне відхилення – 0,056 при статистичній оцінці 95%, рівень довіри до результатів складав $R=0,155$ за максимальної спостереженої міжлабораторної різниці 0,08. Перевірки нормальності залишків та тест на тренди за порядком вимірювань не виявили систематичних зсувів, що підтверджує метрологічну сумісність IBC у дволабораторній постановці.

Загалом, порівняння результатів серій випробувань C1 та C2 за метрологічними показниками та їх узгодженість наводиться в табл. 2.

Табл. 2. Порівняння результатів серій C1 та C2 та їх узгодженість

Показник	Серія C1	Серія C2	Коментар
Середнє значення, нм	10,48	10,48	Ідентичні середні значення
Сума квадратів відхилень	0,0512	0,0480	Стабільність (усередині серій)
Міжсерійна дисперсія	0,0032	—	Оцінка за ISO 5725
s (стандартне відхилення)	0,056	0,056	Низький розкид
R (при статистичній оцінці 95%)	0,155	0,155	Межі згоди або гранична різниця
Максимальна міжлабораторна різниця	Δ	C1 ↔ C2	0,08

Паралельні вимірювання в іншій лабораторії, що проводилися із гармонізованим препроцесінгом і рандомізацією обирання піддослідного зразка, підтвердили метрологічну сумісність IBC: се-

редні значення мікрогеометрії поверхонь досліджуваних зразків збіглися, а максимальна міжлабораторна різниця цих значень вкладалася у статистичну оцінку в 95%.

За результатами побудованих діаграм кореляції та Бленда-Олтмана, рис. 3, оцінено узгодженість і відтворюваність результатів випробування ІВС в двох незалежних лабораторіях [13], а також перевірено відсутність суттєвих систематичних зміщень і прийнятність меж згоди відносно заданих метрологічних вимог [14].

Діаграма кореляції (рис.3.а) показує, що точки, які відповідають парним результатам вимірювань у двох незалежних лабораторіях, згруповані вздовж бісектриси $y = x$, що свідчить про високу узгодженість оцінок параметра шорсткості та від-

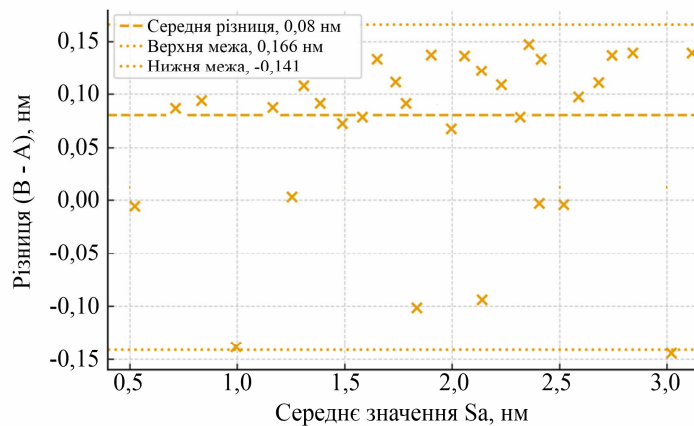
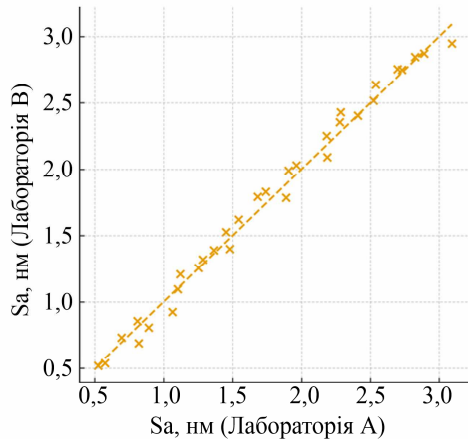


Рис. 3. Діаграма кореляції (а) та діаграма Бленда-Олтмана (б) результатів випробування ІВС в двох незалежних лабораторіях

В той же час, на діаграмі Бленда-Олтмана (рис.3.б) різниця між результатами отриманими в різних лабораторіях коливається навколо нульової лінії, а середнє зміщення є малим порівняно з допустимими метрологічними похибками системи. Межі узгодження ($\pm 1,96 \cdot s$) залишаються в діапазоні, який є прийнятним з точки зору заданих вимог до відтворюваності згідно ISO 5725-2:2019, і не демонструють вираженої залежності від рівня вимірюваного параметра. Відсутність тренду на діаграмі (наприклад, збільшення розкиду для більших значень шорсткості) свідчить про стабільність характеристик ІВС у всьому робочому діапазоні незалежно від того в якій лабораторії проводилося дослідження. Сукупно це підтверджує, що результати двох лабораторій є статистично узгодженими, а розроблена методика випробувань забезпечує відтворювані й взаємозамінні оцінки параметрів поверхні.

Загалом, отримані значення рівня довіри до результатів дослідження R і максимальної міжлабораторної різниці $\max|A|$ вказують на відсутність практично значущих міжлабораторних зсувів [15]. Водночас, оцінка невизначеності за стандартом GUM 1995 (JCGM 100:2008) підтверджує прийнятну складову відтворюваності, а діаграми узгодженості не виявили трендів залежно від рівня сигналу, що узгоджується з нормальністю залишків.

Отже, проведені міжлабораторні випробування ІВС за уніфікованою методикою, що передба-

чає трасоване калібрування показали досягнення ідентичних середніх значень мікрогеометрії поверхні за їх низького розкиду. Гранична різниця R за таких умов не перевищена, а систематичних зсувів виявлено не було. Це доводить, що розроблювана ІВС забезпечує стабільні та метрологічно сумісні результати й може бути включена до регламентів валідації як відтворюваний інструмент контролю мікрогеометрії функціональних мікроструктур.

В той же час, на діаграмі Бленда-Олтмана (рис.3.б) різниця між результатами отриманими в різних лабораторіях коливається навколо нульової лінії, а середнє зміщення є малим порівняно з допустимими метрологічними похибками системи.

чає трасоване калібрування показали досягнення ідентичних середніх значень мікрогеометрії поверхні за їх низького розкиду. Гранична різниця R за таких умов не перевищена, а систематичних зсувів виявлено не було. Це доводить, що розроблювана ІВС забезпечує стабільні та метрологічно сумісні результати й може бути включена до регламентів валідації як відтворюваний інструмент контролю мікрогеометрії функціональних мікроструктур.

Висновки

Проаналізовано результати двох незалежних серій по 32 вимірювання мікрогеометрії контрольного тест-зразка. Вимірювання виконані у двох лабораторіях з використанням інтегрованої інформаційно-вимірювальної системи на базі атомно-силового мікроскопа NT-206, із гармонізованими протоколами, рандомізацією порядку вимірювань та єдиною схемою статистичного опрацювання, що забезпечило коректне виокремлення лабораторного фактора і компонент дисперсії.

Отримано однакове середнє значення параметра мікрогеометрії поверхні на рівні 10,48 нм для обох серій вимірювань, при цьому суми квадратів відхилень становили 0,0512 та 0,0480, а дисперсія міжсерійної відтворюваності дорівнювала 0,0032 за стандартного відхилення 0,056, що свідчить про низький рівень розкиду результатів та високу узгодженість оцінок між лабораторіями.

Проведене оцінювання з довірчою ймовірністю 95% для різниці результатів між лабораторіями показало, що гранична різниця становила $R = 0,155$, тоді як максимальна спостережена різниця не перевищувала 0,08. При цьому розподіли залишків були близькими до нормальних, а аналіз послідовностей не виявив, а ні трендів за порядком вимірювань, а ні систематичного зсуву, що додатково підтверджує стабільність і метрологічну сумісність ІВС у міжлабораторному режимі.

Встановлено, що запропонована процедура оцінювання відтворюваності, яка включає рандомізацію, виділення лабораторного фактора, розрахунок компонент дисперсії та побудову меж узгодженості на рівні 95%, може бути безпосередньо включена до регламентів валідації інтегрованих інформаційно-вимірювальних систем і використовуватися як числова основа для встановлення порогових критеріїв придатності ІВС під час регулярного міжлабораторного контролю.

Показано, що отримані числові орієнтири (середній рівень мікронерівностей порядку 10,48 нм, стандартне відхилення на рівні 0,056, дисперсія міжсерійної відтворюваності 0,0032 та гранична різниця $R=0,155$ за максимальної фактичної різниці 0,08) забезпечують достатній запас метрологічної надійності для подальшого використання досліджуваної інформаційно-вимірювальної системи у задачах контролю геометричних параметрів функціональних мікроструктур та можуть бути масштабовані на інші параметри та типи мікроструктур при збереженні аналогічної схеми експерименту й оброблення даних.

Перспективи розвитку цього напрямку наукових досліджень пов'язані з розширенням міжлабораторних досліджень на більшу кількість еталонів і реальних мікроструктур, інтеграцією повноцінних процедур оцінювання невизначеності описаних в GUM 1995 / ISO 5725-2:2019, впровадженням відкритих баз експериментальних даних та подальшою автоматизацією ІВС для дистанційного контролю складних функціональних мікроструктур у реальних виробничих процесах.

Література

- [1] B. Chen, Z. Feng, F. Z. Yao, M. H. Zhang, K. Wang, Y. Wei, & J. Rödel, "Flexible piezoelectrics: integration of sensing, actuating and energy harvesting", *Flexible Electronics*, vol. 9, no. 1, 58, 2025.
DOI: 10.1038/s41528-025-00432-5
- [2] B. Sharma, & A. Sharma, "Microfluidics: Recent Advances Toward Lab-on-Chip Applications in Bioanalysis", *Adv. Eng. Mater.*, vol. 24, no. 2, 2100738, 2022. DOI: 10.1002/adem.202100738.
- [3] S. B. Yoo, S. H. Yun, A. J. Jo, & et al. "Automated measurement and analysis of sidewall roughness using three-dimensional atomic force microscopy", *Appl. Microsc.*, vol. 52, 1, 2022. DOI: 10.1186/s42649-022-00070-5.
- [4] V. Alar, A. Razumić, B. Runje, I. Stojanović, M. Kurtela, & B. Štrbac, "Application of Areal Topography Parameters in Surface Characterization", *Applied Sciences*, vol. 15, no. 12, 6573, 2025. DOI: 10.3390/app15126573.
- [5] K. Palová, T. Kelemenová, & M. Kelemen, "Measuring Procedures for Evaluating the Surface Roughness of Machined Parts", *Applied Sciences*, vol. 13, no. 16, 9385, 2023.
DOI: 10.3390/app13169385
- [6] A. Razumić, B. Runje, Z. Keran, Z. Trzun i D. Pugar, "Reproducibility of Areal Topography Parameters Obtained by Atomic Force Microscope", *Tehnički glasnik*, vol. 19, no. si1, pp. 1-6, 2025. DOI: 10.31803/tg-20250324183037
- [7] C. Engler, A. Georgiadis, D. Lange, & N. Meier, "New method for assessing the repeatability of the measuring system for roughness measurements", *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, vol. 15, no. 10, 2024.
DOI: 10.1051/ijmqe/2024008.
- [8] В. Квасніков, М. Катаєва, і Т. Шкварницька, "Розробка методу калібрування скануючого зондового мікроскопу", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, вип. 2, с. 74–80, Груд 2021. DOI: 10.31891/2219-9365-2021-68-2-9
- [9] В. Я. Павленко, С. В. Шорнікова, С. В. Лук'янюк, & С. Ю. Чайковський, «Перспективні рішення щодо автоматизації методів вимірювання в нанометричному діапазоні», *Технічна інженерія*, вип. 2(88), с. 50–54, Лис 2021.
DOI: 10.26642/ten-2021-2(88)-50-54
- [10] С. Єфименко, І. Григоренко, Ю. Хорошайло, & С. Григоренко, "Застосування коваріаційного аналізу для визначення факторного впливу на параметр контролю при колориметричному дослідженні", *Український метрологічний журнал*, № 3, с. 49-55, 2022.
DOI: 10.24027/2306-7039.3.2022.269783
- [11] L. Ribotta, A. Delvallée, E. Cara, & et al. "AFM interlaboratory comparison for nanodimensional metrology on silicon nanowires", *Measurement Science and Technology*, vol. 35, no. 10, 105014, 2024. DOI: 10.1088/1361-6501/ad5e9f
- [12] J. W. Bartlett, & C. Frost, "Reliability, repeatability and reproducibility: analysis of measurement errors in continuous variables", *Ultrasound Obstet Gynecol*, vol. 31, no. 4, pp. 466-475, 2008. DOI: 10.1002/uog.5256
- [13] H. Wickham, W. Chang & et al. Dynamic Visualizations, 2024. [Online]. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/ggvis/index.html>.
- [14] A. Cataldo, E. Cataldo, A. Masciullo, & R. Schiavoni, "Development and Metrological Characterization of Low-Cost Wearable Pulse

Oximeter", *Bioengineering*, vol. 12, no. 3, 314, 2025. DOI: 10.3390/bioengineering12030314

pp. 694-696, 2002. DOI: 10.1016/S0899-9007(02)00802-X

[15] G. Fitzmaurice, "Statistical methods for assessing agreement", *Nutrition*, vol. 18, no. 7-8,

UDC 621.317:531.7:620.179

¹⁾ Vitalii Andreiko, ¹⁾ Ihor Zhayvoronok, ¹⁾ Serhii Matsepa, ²⁾ Oksana Voloshko, ³⁾ Dmytro Zhuikov

¹⁾Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

²⁾National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

³⁾ Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

EVALUATION OF THE REPRODUCIBILITY OF TEST RESULTS OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR MEASURING GEOMETRIC PARAMETERS OF FUNCTIONAL MICROSTRUCTURES

The article focuses on the key property of such information and measurement systems (ISS), namely: the ability to give stable results under changes in conditions and performers. After all, it is reproducibility that determines the credibility of the measured parameters and the possibility of their practical use. The formulation of the problem of the article was based on the fact that when studying microstructures, it is necessary to observe numerically justified limits of permissible discrepancies between laboratories for complexes combining scanning probes, measuring electronics and software processing modules. Analysis of previous studies showed that existing work was mostly limited to in-laboratory repeatability checks and did not provide interlaboratory evidence of consistency for integrated IVS, and rarely offered transparent acceptance criteria for quality control. The purpose of the work is to quantify the reproducibility of IVS test results and establish understandable threshold values for further validation of microstructure measurements. Two independent series of 32 measurements were performed in two laboratories on a control test sample using scanning probe microscopy and the IVS developed on the basis of the NT-206 device. The resulting protocols were harmonized and the measurement order randomized. The calibration of the standard, its statistical processing included the isolation of the laboratory factor, the estimation of the variances of the components and the construction of 95% of the agreement limits. For both series of samples, the same average value of surface microgeometry at 10.48 nm was obtained. The sums of the squares of the deviations were, respectively, 0.0512 and 0.0480 with a variance of interserial reproducibility of 0.0032 and a standard deviation of 0.056. At the same time, the marginal difference at 95% confidence is $R = 0.155$, while the maximum observed difference between laboratories is 0.08 (residue distributions are normal, trends in the order of measurements and systematic shift were not detected). As a result of the tests, the results obtained at the IVS are stable and metrologically compatible between laboratories. The proposed procedure for assessing reproducibility is suitable for inclusion in validation regulations, and the established threshold values can serve as a basis for regular interlaboratory control and scaling to other parameters and measurement scenarios in the development and study of functional microstructures.

Keywords: interlaboratory consistency; metrological compatibility; scanning probe microscopy; standard deviation; Calibration Test Sample.

Надійшла до редакції
01 листопада 2025 року

Рецензовано
20 листопада 2025 року



© 2025 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).