

[0000-0001-5359-5974] **І. С. Кобиць¹**,
 [0000-0002-4605-814X] **О. О. Бруньов¹**,
 [0000-0003-1544-6040] **О. І. Андрієнко²**,
 [0000-0003-1498-7005] **С. О. Білокін²**, *канд. техн. наук*,
 [0000-0003-1281-1241] **С. В. Ротте²**, *кандидат техн. наук, доцент*
 [0000-0002-5927-0326] **М. О. Бондаренко²**, *д-р техн. наук, доцент*
 e-mail: m.bondarenko@chdtu.edu.ua

¹Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний Центр МВС України
 вул. Пастерівська, 104, м. Черкаси, 18009, Україна

²Черкаський державний технологічний університет МОН України
 б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ МЕХАТРОННИХ ПРИСТРОЇВ МЕТОДОМ МУЛЬТИЗОНДОВОЇ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

В роботі проводилося дослідження поверхонь елементів мехатронних пристроїв з метою визначення геометричних (стану, топології та морфології) та механічних (мікротвердості, зносостійкості та адгезійної міцності) характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв шляхом їх експериментального дослідження методом мультizonдової атомно-силової мікроскопії, що забезпечує необхідні рівні точності та надійності отриманих результатів. Вперше встановлено, що основною перевагою методу мультizonдової атомно-силової мікроскопії проти інших методів атомно-силової мікроскопії є здатність пришвидшеного дослідження нанорельєфу та механічних характеристик функціональних поверхонь виробів мехатроніки за один прохід досліджуваної ділянки. Отримані верифіковані альтернативними методами (інтерференційної мікроскопії, растрової електронної мікроскопії, мікротвердометрії за Вікерсом) результати дослідження показали високу якість, точність (похибка визначення механічних характеристик не перевищує 8%), надійність (ймовірність отримання адекватних результатів, не менше 0,98) та оперативність (час проведення комплексу досліджень зменшено в 1,6...1,8 разів) визначення показників стану, геометричних та механічних характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв. Показано перспективи розвитку методу мультizonдової атомно-силової мікроскопії шляхом встановлення закономірностей впливу робочих параметрів та поверхневого стану зондів атомно-силового мікроскопа на точність, якість та оперативність процесу проведення дослідження.

Ключові слова: мультizonдова атомно-силова мікроскопія, мехатронний пристрій, функціональна поверхня, топологія поверхні, тонке покриття.

Постановка проблеми. Мехатронні пристрої різноманітного призначення та системи, побудовані на базі таких пристроїв, знаходять широке застосування в робототехніці, мікросхемотехніці, функціональному приладобудуванні, прецизійному машинобудуванні та інших галузях нової техніки [1]. Запровадження таких пристроїв та систем майже в усіх галузях сучасних техніки та технології обумовлено їх високою надійністю, функціональністю, технологічністю, адаптивністю у більшості технічних, інформаційних, біологічних середовищ тощо при відносно невисокій вартості [2]. Також конкурентною перевагою мехатронних пристроїв, порівнюючи з традиційними, є їх висока екологічність за малих ресурсо- й енерговитратах при їх

виготовленні й експлуатації, чим підтверджується перспектива розвитку галузі «мехатроніка» в рамках концепції сталого розвитку та ініціативи «Industry 4.0» [3].

Разом з тим висока популярність і подальше зростання обсягу виробництва мехатронних пристроїв (особливо в автомобілебудуванні та у виробництві засобів електронної та комп'ютерної техніки) вимагають удосконалення технологій виготовлення цих пристроїв і, відповідно, методів їх високоточного, оперативного, неруйнівного контролю. Ще однією проблемою, яка вимагає вирішення, є збільшення підробок та контрафактів мехатронних пристроїв [4, 5]. Таким чином, виникає необхідність в обов'язковій верифікації таких пристроїв, спрощення проведення якої можливе

шляхом дослідження характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв, які мають безпосередній вплив на їх техніко-експлуатаційні характеристики.

Серед сучасних методів дослідження поверхонь мехатронних пристроїв поширення набули методи скануючої зондової мікроскопії [6-9], а особливо, різновид цього методу – метод скануючої атомно-силової мікроскопії [10], який відрізняється високою точністю, роздільною здатністю та можливістю проводити оперативні дослідження більшості механічних та геометричних характеристик поверхні (а також приповерхневого шару) виробу в газовому та рідкому середовищі, а також у вакуумі [11, 12].

Проте збільшення обсягів виробництва мехатронних пристроїв вимагає збільшити швидкість проведення досліджень та навантаження на зонди вимірювального інструменту. Це, в свою чергу, призводить до зменшення точності та надійності проведених досліджень. Разом з тим збільшення кількості вимірювального обладнання несе додаткові фінансові витрати та веде до залучення додаткового персоналу, що обслуговуватиме таке обладнання. Тому питання пришвидшення проведення досліджень характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв методом атомно-силової мікроскопії із забезпеченням необхідних рівнів точності та надійності результатів таких досліджень є питанням актуальним.

Аналіз наявних досліджень. Питанням дослідження властивостей поверхонь елементів мехатроніки та мікросистемної техніки методами атомно-силової мікроскопії приділяється значна увага багатьма дослідниками (як вітчизняними, так і закордонними) [13-16], зокрема: визначення стану [16], мікрогеометрії поверхонь [16-18], а також їх механічних характеристик (мікротвердості, адгезійної міцності, зносостійкості тощо) [19-22]. У роботах [23-25] досліджено механізми силової та енергетичної взаємодії між вимірювальним інструментом та досліджуваною поверхнею, а в роботі [26] – моделі таких взаємодій. В усіх вищезазначених роботах [13-26] дослідження проводилися в контактному або безконтактному режимах із застосуванням спеціалізованих зондів [27-30].

У роботах [31, 32] пропонується використовувати комбіновану методику визначення геометричних та механічних характеристик твердих поверхонь. Особливістю методики є послідовне визначення стану поверхні, обран-

ня на цій поверхні досліджуваної зони та проведення точкового дослідження механічних характеристик у зазначеній зоні шляхом ідентифікації та страйбування по поверхні цієї зони зондом, модифікованим вуглецевим покриттям. Недоліком цієї методики є неможливість проведення досліджень механічних характеристик у кожній точці досліджуваної ділянки.

У дослідженні [33] пропонується проводити сканування зондом почергово в контактному та безконтактному режимах на різних відстанях зонду від поверхні при високочастотних осциляціях останнього. Комбінація таких режимів роботи приладу дає змогу визначати не лише геометричні характеристики об'єкта дослідження, але й розподіл електростатичного або квазідинамічного електричного поля. В той же час точність та адекватність результатів дослідження обмежуються якістю підготовки досліджуваної поверхні, оскільки залишки органічних рідин та атмосферної вологи на поверхні зразків значно зменшують точність отримуваних результатів і призводять до помилкових результатів.

Для покращення точності та оперативності дослідження поверхонь зразків у роботі [34] пропонується використовувати мультизондовий інструментарій для атомно-силової мікроскопії. Як зазначається авторами цієї роботи, запропонований метод мультизондової атомно-силової мікроскопії (м-АСМ) дасть змогу дослідити широкий спектр властивостей матеріалів в одному циклі вимірювання.

Проте, за даними аналізу наукової літератури та інтернет-джерел, авторами зроблено висновок про відсутність відомостей щодо результатів експериментальних досліджень функціональних поверхонь мехатронних пристроїв методом м-АСМ.

Метою роботи є визначення геометричних та механічних характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв з підвищеною точністю, роздільною здатністю та оперативністю в результаті експериментальних досліджень таких поверхонь методом мультизондової атомно-силової мікроскопії.

Постановка завдань. Для досягнення цієї мети в роботі вирішувалися такі завдання:

- постановка методики та проведення дослідницького експерименту;
- отримання та обробка результатів експерименту;
- визначення адекватності отриманих результатів шляхом порівняння отриманих результатів експерименту.

Методологія дослідження. Основною перевагою запропонованого авторами методу м-АСМ, як зазначено в [35], порівняно з іншими методами АСМ, є здатність дослідження нанорельєфу та механічних характеристик функціональних поверхонь виробів мехатроніки за один прохід досліджуваної ділянки. В той же час, після зняття навантаження від дії зонда на ділянку, відбувається пружне відновлення поверхні, яке мінімізує її залишкове деформування.

Дослідження нанорельєфу і механічних характеристик функціональних поверхонь методом м-АСМ проводиться в кілька етапів у послідовностях, описаних в [36, 37]. На першому етапі відбувається підготовка до проведення експерименту за стандартною методикою початкового налаштування АСМ до процесу сканування [36]. Після попереднього налаштування приладу проводиться обрання ділянки проведення дослідження (максимально, для приладу NT-206 (ТДВ «Мікротестмашини») це ділянка 13×13 мкм) на поверхні досліджуваного зразка. Рекомендації, яких варто дотримуватися при обранні такої зони: область проведення досліджень не повинна мати значні перепади висот та западин (максимальна рекомендована розбіжність між найбільшою западиною та найбільшим виступом – не більша 3 мкм), включення іношродних матеріалів та органічних забруднень або

неорганічних мікрочастинок.

На наступному етапі проведення досліджень здійснюється сканування досліджуваної ділянки поверхні із наперед заданою швидкістю (швидкість обирається із досвіду оператора АСМ, виходячи із таких умов). Водночас треба врахувати той факт, що вища швидкість сканування дає змогу більш оперативно дослідити обрану ділянку, але за умови, що така ділянка має незначні поверхневі мікронерівності та на ній відсутні суттєві перепади рельєфу (наприклад, границі багат шарових конструкцій мікроросхемотехнічних компонентів). На противагу цьому, дослідження ділянки зі складним рельєфом з достатньою точністю та адекватністю результатів вимірювання варто проводити на менших швидкостях сканування. Також для отримання об'єктивної інформації про загальний стан та властивості більшої ділянки поверхні (аж до 10×10 мм) треба провести серію досліджень (не менше 3...5 вимірювань з паузою у 2...3 хв на 9 ділянках поверхні) [37].

На останньому етапі дослідження проводяться завершальні дії щодо вимкнення дослідницького обладнання та збереження отримуваних даних [36].

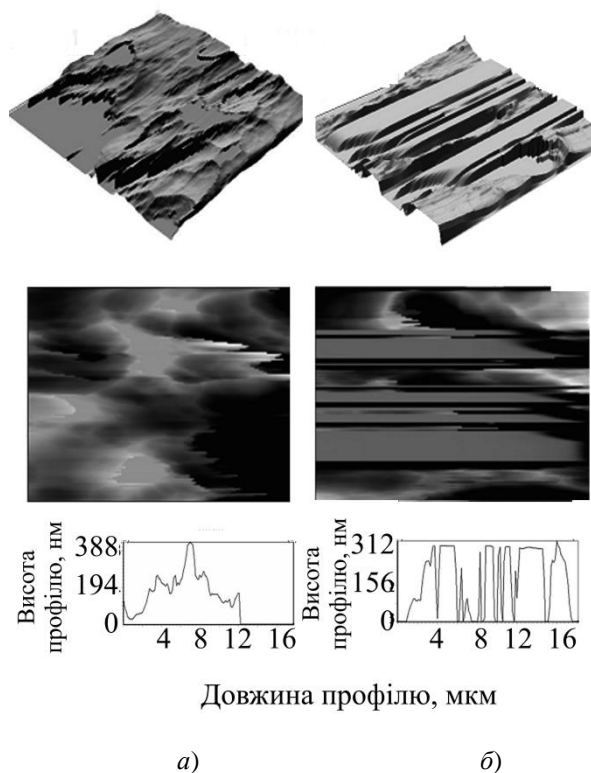
Загальну блок-схему проведення дослідження функціональних поверхонь мехатронних пристроїв методом м-АСМ зображено на рисунку 1.



Рисунок 1 – Блок-схема дослідження функціональних поверхонь мехатронних пристроїв методом мультизондової атомно-силової мікроскопії

Результати досліджень та їх обговорення. Усі експериментальні дослідження проводилися методом м-АСМ, а підтвердження їх результатів проводилося порівнянням з даними, отриманими за однакових умов проведення дослідження на тих самих зразках із застосуванням базового методу АСМ за методиками, описаними в роботах [7, 36, 37]. Далі наводяться результати досліджень та порівнянь стану і мікрогеометрії поверхні та її основних механічних характеристик.

Дослідження стану та мікрогеометрії поверхні. Стан поверхні та її мікрогеометрія досліджувалися на дослідних зразках, як такі застосовувалися статори (п'єзокераміка марки ЦТС-19) п'єзодвигуна РМ-20R [38] мехатронного мікроманіпулятора. Так, результати діагностування поверхневих артефактів такого зразка наведені на рисунку 2.



**Рисунок 2 – Діагностування поверхневих артефактів на ділянці поверхні (13×13 мкм) статора п'єзодвигуна РМ-20R (виробник: ТОВ «Лілея», Україна) методами м-АСМ (а) та за базовими методиками методу АСМ (б).
Зображення згори-донизу: тривимірне зображення досліджуваної ділянки поверхні; топограма поверхні; профіль поверхні ділянки**

Діагностування проводилося за допомогою запропонованого авторами методу мультисондової АСМ (рисунок 2, а) та базового методу АСМ (рисунок 2, б) за раціональних умов проведення експерименту. Ділянки поверхні елементів з п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19 (статора – біморфної прямокутної пластини 6×1,8×0,25 мм), що діагностувалися за допомогою запропонованого авторами методу мультисондової АСМ (рисунок 2, а), показали більш контрастну поверхню з артефактами, розміри яких не відображалися на АСМ-зображеннях, отриманих за допомогою базового методу АСМ (рисунок 2, б). Так, на тривимірних зображеннях і топограмах досліджуваної ділянки поверхні (рисунок 2, а, б) показано, що АСМ-зображення поверхні мають «зрізані» ділянки, викликані скануванням кремнієвим зондом досліджуваної поверхні з кроком, що значно перевищував крок сканування у випадку методу м-АСМ (крок сканування – 100 нм для АСМ і 34 нм для м-АСМ). Такі ділянки спостерігаються і на профілограмі поверхні (рисунок 2, б) як вертикальні та горизонтальні відрізки на ділянках кривої профілю. Для методу м-АСМ (рисунок 2, а) кількість таких ділянок була меншою у 12...18 разів. Водночас варто зазначити, що час діагностування поверхні базовим методом АСМ становив близько 130...150 с, тоді як методом м-АСМ цей час не перевищував 80 с.

Під час проведення експерименту із залученням інструменту профілометрії АСМ-зображень також аналізувався розподіл нерівностей рельєфу поверхні на досліджуваних ділянках (рисунок 3).

У ході досліджень розподілу мікронерівностей по поверхні авторами встановлено, що при застосуванні методу м-АСМ спостерігалася більша однорідність поверхні та рівномірність розподілу по ній мікронерівностей, що повністю підтверджувалося в процесі верифікації отриманих результатів (рисунок 3) із залученням методу інтерференційної мікроскопії на повіреному приладі «МІІ-4М» (діапазон вимірювань – 0,1...0,8 мкм; абсолютна точність вимірювань – 5...20 нм) [39]. З використанням такого приладу визначені середні значення шорсткості цих поверхонь в діапазоні 18...27 нм. Розбіжність значень товщини, визначеної за вищезазначеною методикою, та значень, отриманих інтерференційною мікроскопією, становила 1,8...4,3 %.

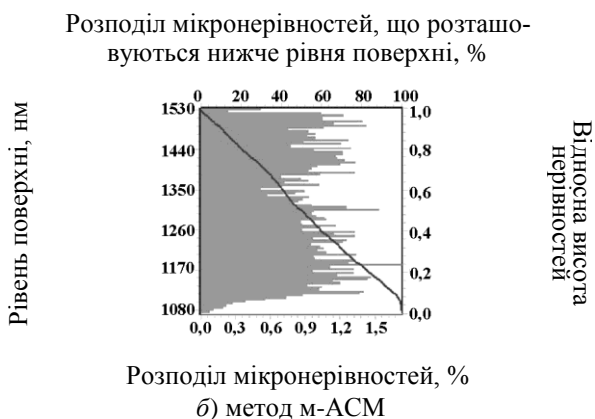
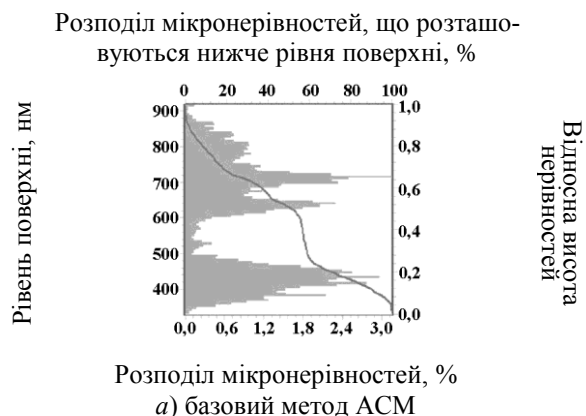


Рисунок 3 – Гістограми розподілу мікронерівностей по поверхні досліджуваних ділянок

Таким чином, дослідження стану та мікрогеометрії поверхні (наявність артефактів поверхні, її мікрорельєф та розподіл нерівностей) із залученням розробленого методу мультитизондової АСМ дає змогу підвищити у 2,9 разу роздільну здатність визначення артефактів на поверхні елементів мехатронних пристроїв, визначати з високою точністю (відносна похибка не перевищувала 4,5 %) та якістю її нанорельєф, а також скоротити час проведення дослідження зі 130...150 с до 80 с.

Дослідження та аналіз морфології поверхні. Як і у випадку дослідження стану поверхні, як експериментальні зразки обиралися пластини з п'єзокераміки ЦТС-19, проте, які знаходилися в експлуатації протягом 15 років.

Аналіз морфології поверхні таких пластин (рисунок 4) дав можливість визначити морфологію поверхні, яка здавалася більш однорідною при її дослідженні методом базової АСМ, тоді як дослідження, проведені методом м-АСМ, показали менш однорідну морфологію поверхні (рисунок 4, б).

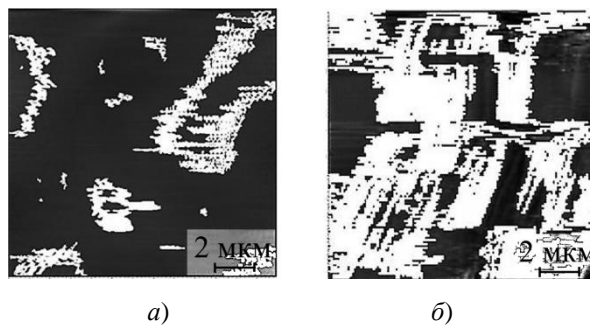


Рисунок 4 – Морфологія поверхні пластини з ЦТС-19, що визначалася методом базової АСМ (а) та мультитизондової АСМ (б)

Результати дослідження морфології поверхні підтверджувалися методом растрової електронної мікроскопії та встановили відповідність отриманої морфології поверхні результатам, отриманим м-АСМ (розбіжність між результатами виявлення морфології поверхні цими методами не перевищила 13...16 %).

Дослідження механічних характеристик компонентів мехатронної техніки. Визначення механічних характеристик (мікротвердості, зносостійкості, а також адгезійної міцності тонких покриттів) компонентів мехатронної техніки здійснюється за розробленими в роботах [36, 37] методиками.

Дослідження мікротвердості запропонованим методом м-АСМ (на прикладі кремнієвого мікроактуатора пристрою позиціонування) і його аналіз наведено на рисунку 5 [34].

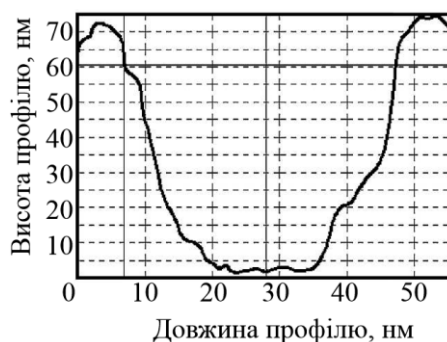


Рисунок 5 – Профіль відбитка зонданоіндентора в місці провадження останнього в режимі наноідентування ділянки поверхні кремнієвої пластини (ділянка 70×70 нм)

Досліджено, що методом м-АСМ можна з високою точністю (похибка не перевищувала 8 %) визначити мікротвердість матеріалів в діапазоні значень 140 МПа–44 ГПа, що суттєво перевищує діапазон значень мікротвердості

477 МПа–11 ГПа при визначенні цієї поверхні базовим методом АСМ.

Дослідження зносостійкості поверхні проводилося методом склерометрії за такого навантаження на зонд, як $4 \dots 10 \cdot 10^{-4}$ Н [37]. В результаті дослідження отримано треки (рисунки б) від дії зонда-індентора на досліджувану поверхню. Для випадку дослідження зносостійкості методом мультизондової АСМ було отримано безперервні треки однакової інтенсивності, що доводить адекватність і високу точність визначення коефіцієнта зносостійкості, що мав високу збіжність з табличними даними (кореляція між цими даними становила не менше 87 %).

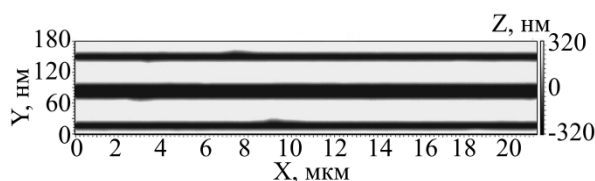


Рисунок 6 – АСМ-трек склерометричного вимірювання на зносостійкість кремнієвої пластини

Проте, оскільки коефіцієнт зносостійкості виражається в умовних одиницях (відносно значення зносостійкості для алмазу у 100 у.о.), можна вважати точність розрахункових значень проти табличних значень достатньою, а отримані за допомогою методу м-АСМ результати такими, що відповідають дійсності.

Ще однією механічною характеристикою елементів мехатронних пристроїв, що підлягала визначенню методом м-АСМ, є адгезійна міцність зчеплення покриття з основою таких елементів. Як елементи мехатронних пристроїв досліджувалися зразки мікродзеркал (16×16 мкм) оптичної системи DMD-матриці для проектування зображення «Асер С120», що являють собою пластини розмірами 8×14 мм із оптичного скла К8 з нанесеним на нього тонким шаром (товщина – 9 нм) покриття Al_2O_3 . Проведений аналіз отриманих профілів [40] при дослідженні цих зразків (рисунки 7) дає змогу провести як кількісну оцінку адгезійної міцності покриття, так і її зміну зі збільшенням товщини покриття.

Проведені дослідження адгезійної міцності тонких покриттів на оптичному склі методом м-АСМ вперше дали можливість встановити адгезійну міцність функціональних

покриттів, яка зменшується за експоненціальним законом.

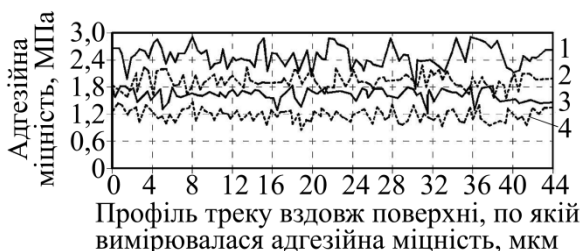


Рисунок 7 – Розподіл адгезійної міцності по пластині з оптичного скла

(покриття Al_2O_3 товщиною 10 нм)

по глибині проникнення зонда-індентора:

**1 – $h = 0$ (поверхня покриття); 2 – $h = 3$ нм;
3 – $h = 6$ нм; 4 – $h = 10$ нм (межа між скляною пластинкою та оксидним покриттям)**

Висновки. Таким чином, проведені дослідження та порівняння одержаних запропонованим авторами методом мультизондової АСМ результатів з результатами, отриманими базовим методом АСМ та верифікованими альтернативними методами (інтерференційної мікроскопії, растрової електронної мікроскопії, мікротвердометрії за Вікерсом), показали високу якість, точність (похибка визначення механічних характеристик не перевищує 8 %), надійність (ймовірність отримання адекватних результатів – не менша 0,98) та оперативність (час проведення комплексу досліджень зменшено в 1,6...1,8 разу) визначення показників стану, геометричних та механічних характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв.

Як наукову новизну результатів досліджень, що проводилися в роботі, варто зазначити таке: вперше встановлено, що використання розробленого методу мультизондової АСМ, на відміну від традиційного методу однозондової АСМ, дає можливість:

– підвищити у 2,9 разу роздільну здатність визначення артефактів на поверхні елементів мехатронних пристроїв, визначити з високою точністю (відносна похибка не перевищувала 4,5 %) та якістю її нанорельєф, а також скоротити час проведення дослідження зі 130...150 с до 80 с;

– отримувати морфологію поверхні на рівні якості, що відповідає методу РЕМ (розбіжність між результатами виявлення морфології поверхні цими методами не перевищила 13...16 %);

– визначати з високою точністю (похибка не перевищувала 8 %) мікротвердість матеріалів у діапазоні значень 140 МПа–44 ГПа; коефіцієнт зносостійкості, що має високу збіжність з табличними даними (кореляція між цими даними становила не менше 87 %), а також кількісну оцінку та зміну значення адгезійної міцності функціонального покриття на поверхнях мехатронних пристроїв.

Практична значимість можливостей методу мультizonдової атомно-силової мікроскопії полягає в експериментально підтверджених результатах, проведених з використанням цього методу досліджень, що підтверджують високу точність (відносна похибка не перевищувала 4,5 % для визначення мікрогеометричних параметрів поверхні та не перевищувала 8 % для визначення мікромеханічних параметрів поверхні) та оперативність (швидкість проведення дослідження підвищено, мінімум, в 1,6 разу) методу.

У подальших дослідженнях планується дослідити робочі параметри та стан зондів мультizonдового інструменту на точність, якість та оперативність процесу проведення дослідження методом м-АСМ.

Подяка. Дослідження проводилися в рамках проекту, що виконується з власної ініціативи за кошти виконавця НДР: «Комп'ютеризована система діагностування та контролю параметрів компонентів мікросистемної техніки методом атомно-силової мікроскопії» (Державний реєстраційний номер: 0121U113777, 12.2021 – 12.2022 pp.).

Список використаних джерел

- [1] R. Sharma, and B. Dhiman, "Mechatronics around the world - at a glance", *Journal of Mechatronics and Robotics*, no. 5 (1), pp. 1-7, 2021.
doi: 10.3844/jmrsp.2021.1.7.
- [2] D. Alciatore, *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*, 5th ed., USA, McGraw-Hill Higher Education, 2018.
- [3] O. Kushnirenko, N. Gakhovich, and L. Venger, "The impact of industry 4.0 technologies on structural transformation in the manufacturing", in *IV Int. Sci. Congress Society of Ambient Intelligence – 2021 (ISCSAI 2021)*, vol. 100, iss. 01009, 2021.
doi: 10.1051/shsconf/202110001009.
- [4] K. Deng, Z. Yu, S. Patnaik, and J. Wang, "Advances in intelligent systems and computing: recent developments in mechatronics and intelligent robotics", in *Proc. Int. Conf. on Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR 2018)*, Springer Nature, Switzerland AG, 2019, p. 454.
doi: 10.1007/978-3-030-00214-5.
- [5] D. Brandl, "Serialization, where automation and IT collide", *Control Engineering*, 2014. [Online]. Available: <https://www.controleng.com/articles/serialization-where-automation-and-it-collide/>.
- [6] В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко, П. В. Петльований, С. О. Білокінь, та М. О. Бондаренко, *Методи та засоби мікроскопії*. Київ, Україна: НТУУ "КПІ", 2013.
- [7] В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, О. В. Верцанова, Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Білокінь, та М. О. Бондаренко, *Мікроскопія в нанотехнологіях*. Київ, Україна: НТУУ "КПІ", 2014.
- [8] F. Giessibl, "Advances in atomic force microscopy", *Reviews of Modern Physics*, vol. 75, iss. 3, pp. 949-983, 2003.
- [9] E. Meyer, R. Bennewitz, and H. J. Hug, *Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip. Graduate Texts in Physics*, 2nd ed., 2021.
doi: 10.1007/978-3-030-37089-3.
- [10] W. R. Bowen, and N. Hilal, *Atomic Force Microscopy in Process Engineering: Introduction to AFM for Improved Processes and Products*, Butterworth-Heinemann, 2009.
doi: 10.1016/C2009-0-18509-4.
- [11] G. Haugstad, *Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications*, UK, Wiley, 2012.
- [12] S. Morita, F. J. Giessibl, E. M. Roland Wiesendanger, *Noncontact atomic force microscopy*, vol. 3. Springer, Cham, 2015.
doi: 10.1007/978-3-319-15588-3.
- [13] M. A. Lantz, S. J. O'Shea, and M. E. Welland, "Characterization of tips for conducting atomic force microscopy in ultrahigh vacuum", *Review of scientific instruments*, vol. 69, no. 4, pp. 1757-1764, 1998.
- [14] L. Hongwei et al., "Nanoscale infrared, thermal and mechanical properties of aged microplastics revealed by an atomic force microscopy coupled with infrared spectroscopy (AFM-IR) technique", *Science of the Total Environment*, no. 744, p. 140944, 2020.

- [15] A. Chlanda, E. Kijeńska-Gawrońska, J. Zdunek, and W. Swieszkowski, "Internal nanocrystalline structure and stiffness alterations of electrospun polycaprolactone-based mats after six months of in vitro degradation. An atomic force microscopy assay", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, no. 101, p. 103437, 2020.
- [16] X. Li, M. Dong, D. Jiang, S. Li, and Y. Shang, "The effect of surface roughness on normal restitution coefficient, adhesion force and friction coefficient of the particle-wall collision", *Powder Technology*, no. 362, pp. 17-25, 2020.
- [17] В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, та В. А. Палагін, *Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології*. Харків, Україна: ХНУРЕ, 2012.
- [18] Д. М. Фреїк, І. В. Горічок, Я. С. Яворський, Б. С. Дзундза, та Ю. В. Кланічка, "Процеси формування і топологія тонких плівок і наноструктур срібла (огляд)", *Фізика і хімія твердого тіла*, т. 12, № 3, с. 555-566, 2011.
- [19] O. Andriienko, S. Bilokin, and M. Bondarenko, "Features of creation of multiprobe system for nanometric measurements of geometrical and mechanical properties of surfaces of microsystem devices", *Machines. Technologies. Materials*, vol. 14, iss. 6, pp. 268-271, 2020. [Online]. Available: <https://stumejournals.com/mtm.htm>.
- [20] *Nanomechanics, Inc. Nanomechanics: In-SEM Nanoindentation and iNano Nanoindenter*. Oak Ridge, TN, USA: Nanomechanics, Inc. Retrieved, Jun. 28, 2017.
- [21] W. C. Oliver, and G. M. Pharr, "Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology", *Journal of Materials Research*, vol. 19, iss. 1, pp. 3-20, 2004.
- [22] M. Bondarenko, V. Antonyuk, I. Bondarenko, I. Makarenko, and S. Vysloukh, "Improving the accuracy of microhardness measurement of nanoelectronic elements by the silicic probes of atomic-force microscopy, that is modified by carbon coverage", in *New Technologies, Development and Application IV (NT-2021): Lecture Notes in Networks and Systems*, I. Karabegović, Ed., vol. 233. Springer, Cham, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-75275-0_3.
- [23] P. M. Williams et al., "Blind reconstruction of scanning probe image data", *J. Vac. Sci. Technol. B.*, vol. 14, iss. 2, pp. 1557-1562, 2004.
- [24] R. R. L. De Oliveira et al., *Atomic Force Microscopy – Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale*. Rijeka, Croatia: InTech, 2012.
- [25] D. Sarid, *Scanning Force Microscopy with Applications to Electric, Magnetic and Atomic Forces*. New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 1991.
- [26] A. Lytra, V. Sboros, A. Giannakopoulos, and N. Pelekasis, "Modeling atomic force microscopy and shell mechanical properties estimation of coated microbubbles", *Soft Matter*, vol. 16, iss. 19, 2020. doi: 10.1039/D0SM00300J.
- [27] V. V. Medianyuk, Yu. Yu. Bondarenko, C. V. Bazilo, and M. O. Bondarenko, "Research of current-conducting electrodes of elements from piezoelectric ceramics modified by the low-energy ribbon-shaped electron stream", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 10, no. 6, pp. 06012-1–06012-6, Sumy State University, 2018. doi: 10.21272/jnep.10(6).06012.
- [28] A. Boisen, O. Hansen, and S. Bouwstra, "AFM probes with directly fabricated tips", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, iss. 1, pp. 58-62, 1996. doi: 10.1088/0960-1317/6/1/012.
- [29] Т. П. Каминская, "Атомно-силовая микроскопия для электроники", *Производство электроники*, № 6, с. 37-39, 2010.
- [30] V. Titarenko, S. Bilokin, M. Bondarenko, Yu. Bondarenko, and V. Antonyuk, "Destruction of silicone probes of the atomic force microscope caused by the electrostatic breakdown during scanning of dielectric surfaces", *Innovations*, vol. VI, iss. 2, pp. 72-74, 2018.
- [31] V. S. Antonyuk, Yu. Yu. Bondarenko, S. O. Bilokin, V. O. Andriienko, and M. O. Bondarenko, "Research of microhardness of thin ceramic coatings formed by combined electron-beam method on dielectric materials", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 11, no. 6, pp. 06024-1–06024-5, Sumy State University, 2019. doi: 10.21272/jnep.11(6).06024.
- [32] "Многофункциональный сканирующий зондовый микроскоп (атомно-силовой микроскоп)", 2016. [Электронный ре-

- сурс]. Режим доступа: <http://microtm.com/nt206/nt206r.htm>. Дата обращения: Май 12, 2016.
- [33] В. А. Мошников, Ю. М. Спивак, П. А. Алексеев, и Н. В. Пермяков, *Атомно-силовая микроскопия для исследования нано-структурированных материалов и приборных структур*. Санкт-Петербург, Россия: ЛЭТИ, 2014. ISBN 978-5-7629-1471-0.
- [34] O. Andriienko, S. Bilokin, and M. Bondarenko, "Features of creation of multiprobe system for nanometric measurements of geometrical and mechanical properties of surfaces of microsystem devices", in *Proc. XVII Int. Sci. Congress Machines. Technologies. Materials*, (Varna, Sept. 09-12, 2020). Varna, Bulgaria, 2020, vol. 2 (17), pp. 50-53. [Online]. Available: <http://mtmcongress.com/winter/sbornik/2-2020.pdf>.
- [35] A. Suslov, M. Bondarenko, and O. Andrienko, "Perspectives of development of multi-instrumental atomic-force microscopy under nanometric researches of components of microsystem equipment", на *VII Міжнар. наук.-техн. конф. Датчики, прилади та системи – 2018*, (с. Лазурне, Верес. 17-21, 2018 р.). Черкаси, 2018, с. 80-82.
- [36] С. О. Білокін, М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, та В. С. Антонюк, "Дослідження фізичних характеристик діелектричних поверхонь за допомогою діагностичного стенда на базі атомно-силового мікроскопа", *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*: наук. зб., № 2 (78), с. 176-181, 2015.
- [37] М. О. Бондаренко, "Дослідження механічних характеристик елементів приладів точного приладобудування методом атомно-силової мікроскопії", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 2, с. 21-28, 2015.
- [38] С. Ф. Петренко, *Електричні мікромашини*. Київ, Україна: Корнійчук, 2002.
- [39] Г. М. Дубровская, Ю. И. Коваленко, Г. В. Канашевич, и М. А. Бондаренко, "Изучение поверхности наноструктурных покрытий нитрида и карбонитрида титана, полученных газофазным осаждением и ионно-лучевой обработкой", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 2, с. 56-60, 2006.
- [40] С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, и Ю. Ю. Бондаренко, "Определение адгезионной прочности тонких оксидных покрытий на диэлектрических материалах методом атомно-силовой микроскопии", *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*, т. 12, № 2, с. 295-302, 2014.

References

- [1] R. Sharma, and B. Dhiman, "Mechatronics around the world - at a glance", *Journal of Mechatronics and Robotics*, no. 5 (1), pp. 1-7, 2021. doi: <https://doi.org/10.3844/jmrsp.2021.1.7>.
- [2] D. Alciatore, *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*, 5th ed., USA, McGraw-Hill Higher Education, 2018.
- [3] O. Kushnirenko, N. Gakhovich, and L. Venger, "The impact of industry 4.0 technologies on structural transformation in the manufacturing", in *IV Int. Sci. Congress Society of Ambient Intelligence – 2021 (ISCSAI 2021)*, vol. 100, iss. 01009, 2021. doi: 10.1051/shsconf/202110001009.
- [4] K. Deng, Z. Yu, S. Patnaik, and J. Wang, "Advances in intelligent systems and computing: recent developments in mechatronics and intelligent robotics", in *Proc. Int. Conf. on Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR 2018)*, Springer Nature, Switzerland AG, 2019, p. 454. doi: 10.1007/978-3-030-00214-5.
- [5] D. Brandl, "Serialization, where automation and IT collide", *Control Engineering*, 2014. [Online]. Available: <https://www.controleng.com/articles/serialization-where-automation-and-it-collide/>.
- [6] V. S. Antoniuk, H. S. Tymchyk, Yu. Yu. Bondarenko, P. V. Petlovanyi, S. O. Bilokin, and M. O. Bondarenko, *Methods and means of microscopy*. Kyiv, Ukraine: NTUU "KPI", 2013 [in Ukrainian].
- [7] V. S. Antoniuk, H. S. Tymchyk, O. V. Ver-tsanova, Yu. Yu. Bondarenko, S. O. Bilokin, and M. O. Bondarenko, *Microscopy in nanotechnology*. Kyiv, Ukraine: NTUU "KPI", 2014 [in Ukrainian].
- [8] F. Giessibl, "Advances in atomic force microscopy", *Reviews of Modern Physics*, vol. 75, iss. 3. pp. 949-983, 2003.

- [9] E. Meyer, R. Bennewitz, and H. J. Hug, *Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip. Graduate Texts in Physics*, 2nd ed., 2021.
doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37089-3>.
- [10] W. R. Bowen, and N. Hilal, *Atomic Force Microscopy in Process Engineering: Introduction to AFM for Improved Processes and Products*, Butterworth-Heinemann, 2009.
doi: 10.1016/C2009-0-18509-4.
- [11] G. Haugstad, *Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications*, UK, Wiley, 2012.
- [12] S. Morita, F. J. Giessibl, E. M. Roland Wiesendanger, *Noncontact atomic force microscopy*, vol. 3. Springer, Cham, 2015.
doi: 10.1007/978-3-319-15588-3.
- [13] M. A. Lantz, S. J. O'Shea, and M. E. Welland, "Characterization of tips for conducting atomic force microscopy in ultrahigh vacuum", *Review of scientific instruments*, vol. 69, no. 4, pp. 1757-1764, 1998.
- [14] L. Hongwei et al., "Nanoscale infrared, thermal and mechanical properties of aged microplastics revealed by an atomic force microscopy coupled with infrared spectroscopy (AFM-IR) technique", *Science of the Total Environment*, no. 744, p. 140944, 2020.
- [15] A. Chlanda, E. Kijeńska-Gawrońska, J. Zdunek, and W. Swieszkowski, "Internal nanocrystalline structure and stiffness alterations of electrospun polycaprolactone-based mats after six months of in vitro degradation. An atomic force microscopy assay", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, no. 101, p. 103437, 2020.
- [16] X. Li, M. Dong, D. Jiang, S. Li, and Y. Shang, "The effect of surface roughness on normal restitution coefficient, adhesion force and friction coefficient of the particle-wall collision", *Powder Technology*, no. 362, pp. 17-25, 2020.
- [17] V. V. Semenets, I. Sh. Nevliudov, and V. A. Palahin, *Introduction to microsystem technology and nanotechnology*. Kharkiv, Ukraine: KhNURE, 2012 [in Ukrainian].
- [18] D. M. Freik, I. V. Horichok, Ya. S. Iavorskyi, B. S. Dzundza, and Yu. V. Klanichka, "Processes of formation and topology of thin films and nanostructures of silver (review)", *Fizyka i khimiia tverdoho tila*, vol. 12, no. 3, pp. 555-566, 2011 [in Ukrainian].
- [19] O. Andriienko, S. Bilokin, and M. Bondarenko, "Features of creation of multiprobe system for nanometric measurements of geometrical and mechanical properties of surfaces of microsystem devices", *Machines. Technologies. Materials*, vol. 14, iss. 6, pp. 268-271, 2020. [Online]. Available: <https://stumejournals.com/mtm.htm>.
- [20] *Nanomechanics, Inc. Nanomechanics: In-SEM Nanoindentation and iNano Nanoindenter*. Oak Ridge, TN, USA: Nanomechanics, Inc. Retrieved, Jun. 28, 2017.
- [21] W. C. Oliver, and G. M. Pharr, "Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology", *Journal of Materials Research*, vol. 19, iss. 1, pp. 3-20, 2004.
- [22] M. Bondarenko, V. Antonyuk, I. Bondarenko, I. Makarenko, and S. Vysloukh, "Improving the accuracy of microhardness measurement of nanoelectronic elements by the silicic probes of atomic-force microscopy, that is modified by carbon coverage", in *New Technologies, Development and Application IV (NT-2021): Lecture Notes in Networks and Systems*, I. Karabegović, Ed., vol. 233. Springer, Cham, 2021.
doi: 10.1007/978-3-030-75275-0_3.
- [23] P. M. Williams et al., "Blind reconstruction of scanning probe image data", *J. Vac. Sci. Technol. B.*, vol. 14, iss. 2, pp. 1557-1562, 2004.
- [24] R. R. L. De Oliveira et al., *Atomic Force Microscopy – Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale*. Rijeka, Croatia: InTech, 2012.
- [25] D. Sarid, *Scanning Force Microscopy with Applications to Electric, Magnetic and Atomic Forces*. New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 1991.
- [26] A. Lytra, V. Sboros, A. Giannakopoulos, and N. Pelekasis, "Modeling atomic force microscopy and shell mechanical properties estimation of coated microbubbles", *Soft Matter*, vol. 16, iss. 19, 2020.
doi: 10.1039/D0SM00300J.
- [27] V. V. Medianyuk, Yu. Yu. Bondarenko, C. V. Bazilo, and M. O. Bondarenko, "Research of current-conducting electrodes of elements from piezoelectric ceramics modified by the low-energy ribbon-shaped electron stream", *Journal of Nano- and Elec-*

- tronic Physics*, vol. 10, no. 6, pp. 06012-1–06012-6, Sumy State University, 2018.
doi: 10.21272/jnep.10(6).06012.
- [28] A. Boisen, O. Hansen, and S. Bouwstra, "AFM probes with directly fabricated tips", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, iss. 1, pp. 58-62, 1996.
doi: 10.1088/0960-1317/6/1/012.
- [29] T. P. Kaminskaya, "Atomic force microscopy for electronics", *Proizvodstvo elektroniki*, no. 6, pp. 37-39, 2010 [in Russian].
- [30] V. Titarenko, S. Bilokin, M. Bondarenko, Yu. Bondarenko, and V. Antonyuk, "Destruction of silicone probes of the atomic force microscope caused by the electrostatic breakdown during scanning of dielectric surfaces", *Innovations*, vol. VI, iss. 2, pp. 72-74, 2018.
- [31] V. S. Antonyuk, Yu. Yu. Bondarenko, S. O. Bilokin, V. O. Andrienko, and M. O. Bondarenko, "Research of microhardness of thin ceramic coatings formed by combined electron-beam method on dielectric materials", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 11, no. 6, pp. 06024-1–06024-5, Sumy State University, 2019.
doi: 10.21272/jnep.11(6).06024.
- [32] "Multifunctional scanning probe microscope (atomic force microscope)", 2016. [Online]. Available: <http://microtm.com/nt206/nt206r.htm>. Accessed on: May 12, 2016 [in Russian].
- [33] V. A. Moshnikov, Yu. M. Spivak, P. A. Alekseev, and N. V. Permyakov, *Atomic force microscopy for the study of nanostructured materials and instrument structures*. St. Petersburg, Russia: LETI, 2014. ISBN 978-5-7629-1471-0 [in Russian].
- [34] O. Andriienko, S. Bilokin, and M. Bondarenko, "Features of creation of multiprobe system for nanometric measurements of geometrical and mechanical properties of surfaces of microsystem devices", in *Proc. XVII Int. Sci. Congress Machines. Technologies. Materials*, (Varna, Sept. 09-12, 2020). Varna, Bulgaria, 2020, vol. 2 (17), pp. 50-53. [Online]. Available: <http://mtmcongress.com/winter/sbornik/2-2020.pdf>.
- [35] A. Suslov, M. Bondarenko, and O. Andrienko, "Perspectives of development of multi-instrumental atomic-force microscopy under nanometric researches of components of microsystem equipment", in *VII Int. Sci.-Tech. Conf. Sensors, Devices and Systems – 2018*, (Lazurne, Sept. 17-21, 2018). Cherkasy, 2018, pp. 80-82 [in Ukrainian].
- [36] S. O. Bilokin, M. O. Bondarenko, Yu. Yu. Bondarenko, and V. S. Antoniuk, "Investigation of physical characteristics of dielectric surfaces with the help of a diagnostic stand based on an atomic force microscope", *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky: sci. coll.*, no. 2 (78), pp. 176-181, 2015 [in Ukrainian].
- [37] M. O. Bondarenko, "Investigation of mechanical characteristics of elements of precision instrumentation devices by atomic force microscopy", *Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*, no. 2, pp. 21-28, 2015 [in Ukrainian].
- [38] S. F. Petrenko, *Electric micromachines*. Kyiv, Ukraine: Korniiichuk, 2002 [in Ukrainian].
- [39] G. M. Dubrovskaia, Yu. I. Kovalenko, G. V. Kanashevich, and M. A. Bondarenko, "Study of the surface of nanostructured coatings of titanium nitride and carbonitride obtained by gas-phase deposition and ion-beam treatment", *Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki*, no. 2, pp. 56-60, 2006 [in Russian].
- [40] S. A. Bilokon, M. A. Bondarenko, and Yu. Yu. Bondarenko, "Determination of the adhesion strength of thin oxide coatings on dielectric materials by atomic force microscopy", *Nanosystemy, nanomaterialy, nanotekhnolohiyi*, vol. 12, no. 2, pp. 295-302, 2014 [in Russian].

[0000-0001-5359-5974] **I. S. Kobyts¹**,
[0000-0002-4605-814X] **O. O. Brunov¹**,
[0000-0003-1544-6040] **O. I. Andriienko²**,
[0000-0003-1498-7005] **S. O. Bilokin², Ph. D.**,
[0000-0003-1281-1241] **S. V. Rotte², Ph. D., As. Prof.**,
[0000-0002-5927-0326] **M. O. Bondarenko², Dr. Tech. Sc., Associate Professor**
e-mail: m.bondarenko@chdtu.edu.ua

¹Cherkasy Research Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine
Pasterivska st., 104, Cherkasy, 18009, Ukraine

²Cherkasy State Technological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine
blvd Shevchenko, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

INVESTIGATION OF FUNCTIONAL SURFACES OF MECHATRONIC DEVICES BY MULTIPROBE ATOMIC FORCE MICROSCOPY

The results of solving the problem of accelerating the study of the characteristics of functional surfaces of mechatronic devices by atomic force microscopy through the use of multiprobe tools, which provides the necessary levels of accuracy and reliability of the results, are shown. To do this, the surfaces of mechatronic elements have been studied to determine geometric (state, topology and morphology) and mechanical (microhardness, wear resistance and adhesive strength) characteristics of functional surfaces of mechatronic devices as a result of their experimental study by multiprobe atomic force microscopy. For the first time it is shown that the main advantage of the method of multiprobe atomic force microscopy in comparison with other methods of atomic force microscopy is the ability to study nanorelief and mechanical characteristics of functional surfaces of mechatronics products in one pass of the study area. At the same time, after removing the load from the action of the probe on the site, there is an elastic recovery of the surface, which minimizes its residual deformation. In general, the complete sequence of measurement studies by this method is given in the form of a block diagram. To confirm the adequacy of the results of experimental studies obtained by multiprobe atomic force microscopy, comparisons have been made with the results obtained by the basic method of atomic force microscopy, as well as with verification data obtained by alternative methods (interference microscopy, scanning electron microscopy, scanning electron microscopy, scanning Vickers microhardness). Based on the research, it has been first established that the use of the developed method of multiprobe atomic force microscopy allows: to increase 2.9 times the resolution of artifacts on the surface of the elements of mechatronic devices, to reduce the time of the study by 1.6... 1.9 times; to obtain surface morphology at the level of quality corresponding to the method of scanning electron microscopy; to determine the microhardness of materials in the range of 140 MPa... 44 GPa, wear resistance and change in the value of the adhesive strength of the functional coating on the surfaces of mechatronic devices (measurement error of these characteristics did not exceed 8 %). In future it is planned to investigate the influence of operating parameters and surface condition of the probes of the multiprobe instrument on the accuracy, quality and efficiency of the study by multi-probe atomic force microscopy.

Keywords: multiprobe atomic-force microscopy, mechatronic device, functional surface, surface topology, thin coating.