

Міністерство освіти та науки України
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

БОНДАРЕНКО МАКСИМ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 620.17:620.3 (043.3)

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ
ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ
МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Черкаському державному технологічному університеті Міністерства освіти і науки України на кафедрі фізики.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Ващенко Вячеслав Андрійович,
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси,
завідувач кафедри фізики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Шевченко Олександр Іванович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
Президія НАН України, м.Київ,
завідувач науково-технічного відділу – головний інженер

доктор технічних наук, професор,
заслужений метролог України
Квасніков Володимир Павлович,
Національний авіаційний університет, м.Київ,
завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних
систем та технологій

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Петренко Сергій Федорович,
Мале науково-виробниче підприємство ТОВ “Лілея”, м.Київ,
директор

Захист відбудеться “___” _____ 2019 р. о _____ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.18 при Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. № 1, ауд. 293.

З дисертацією можна ознайомитися в Науково-технічній бібліотеці імені Г.І.Денисенка Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “___” _____ 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Н.І. Бурау

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку технологій та засобів їх реалізації пристрої та компоненти мікросистемної техніки (МСТ) набувають все більш широкого застосування в різноманітних сферах точного приладобудування, авіакосмічної техніки, медицини тощо. Стрімкий розвиток МСТ спричинений рядом їх беззаперечних переваг: мініатюрністю, високою функціональністю, технологічністю, експлуатаційною надійністю, низьким рівнем енергоспоживання, можливістю інтегрування в більш складні системи та іншими. Більш суворі вимоги до стану поверхні та механічних характеристик МСТ при їх виготовленні та експлуатації вимагають застосування при дослідженні їх геометричних та механічних характеристик нових високоефективних та експресних методів неруйнівного контролю замість традиційних методів візуального та вимірювального контролю (оптичної та електронної мікроскопії, профілометрії, індентування та інших).

Серед методів неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик МСТ перспективними є методи атомно-силової мікроскопії (АСМ), що мають суттєві переваги у порівнянні з іншими методами, а саме: атомарну роздільну здатність при визначенні параметрів рельєфу поверхонь композиційних матеріалів, високу чутливість зонду АСМ при силовій взаємодії з поверхнею, високу гнучкість режимів роботи АСМ, можливість проведення досліджень як на повітрі, так і у вакуумі, і в рідкому середовищі. Це дозволяє отримати повну інформацію про стан, топологію та фізичні характеристики поверхонь компонентів МСТ.

Незважаючи на вищезазначені переваги методів АСМ, їх практичне застосування при контролі геометричних та механічних характеристик матеріалів обмежується рядом невирішених досі питань: недостатньою вивченістю процесів силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями; відсутністю інструментарію для проведення комплексних експресних вимірювань та контролю параметрів геометричних і механічних характеристик на обраній ділянці поверхні контрольованого об'єкту; недостатньою автоматизацією процесу контролю цих характеристик тощо.

Слід зауважити, що дослідження методами АСМ компонентів МСТ переважно проводяться на повітрі, коли на процес та результати роботи мають суттєвий вплив такі дестабілізуючі фактори, як: кліматичні фактори оточуючого середовища (температура, відносна вологість, вміст шкідливих з'єднань тощо) та робочі параметри процесу контролю (час релаксації, крок та швидкість сканування), які обираються емпіричним шляхом, виходячи із власного досвіду дослідника.

При цьому неконтрольований вплив кліматичних факторів несе негативний характер, що веде до зменшення точності, чутливості та відтворюваності результатів контролю, а в ряді випадків – до пошкодження та руйнування зонду АСМ.

З іншого боку, неправильний вибір робочих параметрів веде до виникнення артефактів сканування і, як правило, до невірної інтерпретації результатів дослідження.

Крім того відсутні дані щодо врахування впливу кліматичних факторів та робочих параметрів контролю на метрологічні характеристики методів та засобів АСМ.

Тому удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів АСМ для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ шляхом розроблення математичних та експериментально-статистичних моделей, а також методичних, технічних та програмних засобів для автоматизації процесу контролю цих характеристик з урахуванням дії дестабілізуючих факторів є важливою і актуальною науково-технічною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі фізики Черкаського державного технологічного університету. Дослідження пов'язані із планом науково-дослідних робіт університету, які виконувались в період 2006 – 2018 років при безпосередній участі автора: “Отримання та фізико-хімічні дослідження властивостей тонких композиційних покриттів, модифікованих Р.З.Е. термовакuumним осадженням” (№ ДР 0106U004496, 2006-2008 р.р., керівник НДР), “Діагностика функціональних шарів у виробках мікрооптики і наноелектроніки, отриманих електронними технологіями” (№ ДР 0106U004500, 2006 – 2008 р.р., відп. виконавець НДР), “Технологічні основи електронної нанообробки поверхонь виробів із п'єзоелектричних керамік” (№ ДР 0109U002738, 2009 – 2010 р.р., відп. виконавець), “Технологічні основи отримання впорядкованих наноструктур на поверхнях зондів для атомно-силової мікроскопії” (№ ДР 0111U002932, 2011 – 2012 р.р., відп. виконавець), “Технологічні основи створення теплоізоляційних нанорозмірних оксидних покриттів на поверхнях оптичних діелектриків комбінованим термовакuumним осадженням” (№ ДР 0112U001701, 2012 – 2013 р.р., керівник НДР), “Розроблення поліметричних датчиків інформаційно-вимірювальних систем з живленням елементів від енергії вимірювального сигналу” (№ ДР 0115U000316, 2015 – 2016 р.р., виконавець НДР), “Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення” (№ ДР 0117U000447, 2017 – 2018 р.р., виконавець НДР).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення науково-обґрунтованих основ удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю компонентів мікросистемної техніки шляхом застосування автоматизованих систем вимірювання і контролю геометричних та механічних характеристик цих компонентів з урахуванням дії дестабілізуючих факторів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні **задачі**:

1. На основі аналізу стану проблеми обґрунтувати науковий підхід вирішення проблеми покращення методів та засобів атомно-силової мікроскопії для вимірювання і контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки.

2. Запропонувати наукову методологію оцінки впливу дестабілізуючих факторів (кліматичних факторів оточуючого середовища та робочих параметрів процесу контролю) на точність, чутливість та відтворюваність результатів, отримуваних за

допомогою атомно-силової мікроскопії.

3. Розробити математичні моделі силової та енергетичної взаємодії зондів приладів атомно-силової мікроскопії з матеріалами на підготовчій, завершальній стадіях та стадії сканування, що дозволять визначити та мінімізувати лімітуючі фактори такої взаємодії, чим забезпечити стабільність процесу контролю геометричних та механічних характеристик цих матеріалів.

4. Розробити експериментально-статистичні моделі для оцінювання впливу кліматичних факторів та робочих параметрів атомно-силової мікроскопії на процес неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки.

5. Визначити діапазони кліматичних факторів та робочих параметрів методу атомно-силової мікроскопії, в межах яких відбувається покращення точності, підвищується чутливість та відтворюваність процесу контролю.

6. Встановити можливість застосування комбінованого електронно-променевого модифікування поверхонь зондів приладів атомно-силової мікроскопії для покращення їх експлуатаційних характеристик, що збільшить стійкість цих зондів до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів.

7. Розробити метод підвищення точності, чутливості та відтворюваності процесу контролю характеристик компонентів мікросистемної техніки, що враховує дію дестабілізуючих факторів.

Об'єкт дослідження – процес контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь досліджуваних об'єктів методом атомно-силової мікроскопії.

Предмет дослідження – методи та засоби атомно-силової мікроскопії для вимірювання і контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використовувалися сучасні аналітичні методи фізико-хімічного аналізу (растрової електронної мікроскопії (РЕМ), скануючої АСМ, рентгенофлуоресцентного аналізу, мікроідентування за Віккерсом); окремі положення теорій прямого та зворотного п'єзоефекту, контактної взаємодії в наносистемах, пружної, міжмолекулярної, електромагнітної взаємодії та технічної термодинаміки; чисельно-аналітичні методи розв'язання задач теплопровідності, метод еквівалентних теплових схем, метод імітаційного моделювання на базі математичного процесору “MatLab Simulink”; метод комбінованого електронно-променевого модифікування поверхні, а також методи математичної статистики для обробки експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Вперше створена науково-обґрунтована методологія удосконалення методів та засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки шляхом розроблення математичних та експериментально-статистичних моделей, методичних, технічних та програмних засобів для автоматизації процесу контролю цих характеристик, що

дозволяє покращити точність, підвищити чутливість та відтворюваність результатів контролю з урахуванням дії дестабілізуючих факторів.

2. Уточнено математичні моделі взаємодії зондів атомно-силових мікроскопів з поверхнями матеріалів шляхом врахування силових та енергетичних складових процесів, які дозволяють визначати лімітуючі фактори (сили електростатичної, капілярної взаємодії та дисипацію тепла в зоні фізичного контакту зонду з поверхнею), а також діапазони режимів стабільної роботи атомно-силових мікроскопів, що підвищує точність та відтворюваність результатів контролю.

3. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі для оцінювання впливу кліматичних факторів та робочих параметрів атомно-силової мікроскопії при застосуванні та довготривалому зберіганні зонду на процес неруйнівного контролю, які дозволяють встановлювати значущість кожного з цих факторів, що впливають на точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю.

4. Вперше встановлено нові закономірності впливу кліматичних факторів оточуючого середовища на результати контролю геометричних і механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки, що дозволяють визначати діапазони зміни цих факторів, відхилення від яких призводить до погіршення точності, чутливості та відтворюваності отримуваних результатів.

5. Вперше визначено діапазони зміни робочих параметрів методу атомно-силової мікроскопії, в межах яких зменшується швидкість корозії поверхні зонду, що приводить до підвищення терміну його експлуатації та збільшення ймовірності безвідмовної роботи зонду.

6. Вперше встановлено, що застосування комбінованого електронно-променевого модифікування поверхонь зондів приладів атомно-силової мікроскопії приводить до покращення їх експлуатаційних характеристик, що дозволяє збільшити стійкість цих зондів до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів, чим підвищується ймовірність їх безвідмовної роботи та термін експлуатації.

7. Розроблено новий метод підвищення точності, чутливості та відтворюваності процесу неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки на основі розробленого інструментального та програмно-апаратного забезпечення для автоматизації проведення контролю з урахуванням дії дестабілізуючих факторів.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження становлять наукову основу для технічної реалізації та впровадження у виробництво та навчальний процес методичного, математичного, технічного та програмно-апаратного забезпечення процесу контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь методом АСМ. Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

– розроблено комплекс методик для проведення та математичної обробки результатів експериментальних досліджень методом АСМ для вимірального контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь матеріалів (способи

оцінки мікротвердості та зносостійкості захищені патентами України на корисну модель №87907, №117635) та формування панорамних зображень досліджуваної ділянки з високою роздільною здатністю та деталізацією фрагментів її топології;

– створено алгоритм та програмно реалізовано узагальнену математичну модель, що дозволяє оцінити силову взаємодію та теплообмін між різними елементами блоку контролю АСМ на різних відстанях між зондом та поверхнею та визначити робочі, граничні та критичні параметри процесу контролю;

– запропоновано технологію виготовлення універсальних зондів АСМ та тест-решіток, а також отримано та апробовано зразки таких зондів для високоточного нанометричного комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ методом АСМ;

– розроблено і програмно реалізовано комплексний метод математичної обробки результатів визначення геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ, що дозволяє мінімізувати артефакти сканування, уніфікувати інформацію про стан поверхні та проводити обмін з іншими інформаційно-аналітичними системами математичної обробки результатів досліджень АСМ, і який покладено в основу створення віртуальної лабораторії нанометричних випробувань;

– розроблено автоматизовану систему вимірювання і контролю, яка містить удосконалений блок контролю в частині впровадження систем позиціонування лазерного променя на зонд АСМ (патент України на корисну модель №91425) та видалення залишкового трибоелектричного заряду (патент України на корисну модель №91523).

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, математичні моделі взаємодії зонду АСМ з поверхнями, а також розроблене методичне, технічне та програмно-апаратне забезпечення знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України (ІНМ ім.В.М.Бакуля НАН України, ТОВ “Мелітек-Україна” (м. Київ), ДП НВК “Фотоприлад” та ПАТ “Укрп’єзо” (м. Черкаси), а також за кордоном (ТДВ “Микротестмашины” (м. Гомель, Білорусь), Інститут тепло- і масообміну імені А.В. Ликова НАН Білорусі (м. Мінськ, Білорусь).

Використання технологічних рекомендацій та розробленого методу покращення метрологічних характеристик АСМ дозволило підвищити точність результатів контролю характеристик компонентів МСТ (зменшити відносну похибку на 10 – 15%), збільшити ймовірність безвідмовної роботи зонду на 5 – 11%, зменшити кількість випадків виведення з ладу компонентів МСТ у 2,1 – 2,8 рази; підвищити термін експлуатації зондів у 2,6 – 3,5 рази; зменшити час контролю у 1,3 – 1,5 рази, а також отримати річний економічний ефект 200 тис. гривень.

Отримані у дисертаційній роботі результати використовуються у навчальному процесі при читанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять, виконанні курсових та дипломних проектів з дисциплін “Наноматеріали та покриття у приладобудуванні”, “Теорія та практика експериментальних досліджень”, “Основи

метрології та інформаційно-вимірювальної техніки”, “Нанотехнології в медичному приладобудуванні”, “Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення складу речовин”, “Інтелектуальні технології вимірювання”, “Технічні засоби для дослідження впливу кліматичних факторів” та інших у НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, а також у Черкаському державному технологічному університеті (підтверджено актами впровадження).

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, опублікованих у співавторстві:

– обґрунтовано доцільність застосування приведених методів проведення та обробки результатів теоретичних та експериментальних досліджень [1 – 3, 17, 26, 58];

– отримані фізичні закономірності впливу кліматичних факторів та робочих параметрів сканування на результати контролю, за якими визначено раціональний діапазон робочих параметрів АСМ, що забезпечує високі точність, чутливість і відтворюваність результатів контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ [4, 9, 11, 34, 42, 43, 45, 59];

– розроблено уточнені математичні моделі процесу силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів, що дозволило підвищити їх чутливість та визначити діапазони робочих параметрів (кроку та швидкості сканування, часу механічної релаксації) стабільної роботи пристроїв АСМ [19, 39, 40, 47, 55];

– розроблено випробувальний стенд та оригінальні методики для комплексного контролю параметрів геометричних та механічних характеристик матеріалів методом АСМ [7, 18, 23, 31, 32, 41, 46, 48, 49, 50, 57], а також розроблено технологічні основи та проведено дослідне модифікування універсального інструментарію (зондів АСМ та тест-решіток) для нанометричного вимірювання і контролю [5, 6, 8, 12, 13, 15, 20, 22, 24, 26, 36, 51];

– проведено мінімізацію похибок визначення геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ [25, 14, 16, 21, 37, 44, 56], а також проведено автоматизацію процесу контролю цих характеристик методом АСМ шляхом удосконалення блоку контролю приладу [10, 33, 35, 38, 52 – 54].

В патентах [27 – 30] автору належать ідеї з удосконалення приладної бази методу, способи визначення методом АСМ таких механічних характеристик компонентів МСТ, як: мікротвердість та зносостійкість.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Матеріали, основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і опубліковані у збірках доповідей та матеріалів науково-технічних конференцій, семінарів, симпозіумів, а саме: Міжнародної науково-практичної конференції “Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии” (м. Мінськ, Білорусь, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016 рр.); Російському симпозіумі по растровій електронній мікроскопії та аналітичним методам дослідження твердих тіл (м. Чорноголовка, Росія, 2011 – 2012,

2014 pp.); Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи” (м. Київ, 2009, 2013 – 2014 pp.); щорічної міжнародної конференції та виставці “Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики” (м. Ялта, 2011 pp.); International conference of science and technology “System analysis and information technologies” (Kyiv, 2011); International Scientific Conference ELNANO (м. Київ, 2011 p.); Міжнародної науково-технічної конференції “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів” (м. Кременчук, 2014 p.); Міжнародної науково-технічної конференції “Инженерия поверхности и реновации изделий” (Одеська обл., с. Затока, 2015 p.); Всеукраїнської науково-практичної конференції “Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення та перспективи” (м. Луцьк, 2012 p.); Міжнародної науково-практичної конференції “Качество, стандартизация, контроль: теория и практика” (м. Київ, 2012, 2016 pp.); International scientific conference “Physics and technology of thin films and nanosystems” (Ivano-Frankivsk, 2013); International scientific conference “Electronics and Applied Physics” (Kyiv, 2013); Міжнародної наукової конференції “Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології” (м. Київ, 2013 p.); регіональної науково-практичної конференції “Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку” (м. Луцьк, 2014 p.); International scientific-technical conference “Innovations in engineering” (Burgas, Bulgaria, 2015); Міжнародної науково-практичної конференції “Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем” (м. Чернігів, 2015, 2017 pp.); International Symposium “Energy Challenges & Mechanics” (Inverness, Scotland, UK, 2016); науково-технічної конференції “Фізика, електроніка, електротехніка” (м. Суми, 2016, 2018 pp.); Міжнародної науково-практичної конференції “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси” (м. Київ, 2018 p.)

Публікації. Результати досліджень, що подані в дисертації, опубліковані у 59 наукових працях, у тому числі 3 монографіях, 21 статті у наукових фахових виданнях (з них 6 статей у виданнях іноземних держав, 6 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 4 патентах на корисну модель, 29 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 2 статтях у інших виданнях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 427 сторінок, з них обсяг основного тексту – 272 сторінки, 117 рисунків, 26 таблиць, список використаних джерел складає 332 найменування і займає 39 сторінок, а також 6 додатків на 78 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито суть та стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, розкрито наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено дані про публікації та апробацію роботи.

У **першому розділі** виконано огляд літературних джерел та джерел Інтернет щодо

сучасного стану проблеми удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів АСМ для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ, функціональних можливостей і переваг методу АСМ при контролі характеристик компонентів МСТ; приведено класифікацію цих компонентів та методів дослідження їх характеристик з посиланням на існуючі вітчизняні та закордонні стандарти. Визначено чинники, які впливають на точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ.

Розглянуто шляхи удосконалення методів і засобів АСМ, що ведуть до підвищення точності, чутливості та відтворюваності процесу контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ та визначення терміну їх експлуатації.

Рішенню даних завдань присвячені роботи багатьох зарубіжних та вітчизняних фахівців, зокрема роботи: Бикова В. А., Бінніга Г., Брушана Б., Гербера К., Дуба С. М., Карбівського В. Л., Куейта К., Литвина П. М., Магонова С. М., Міронова В. Л., Рожицького М. М., Рорера Х., Сулова А. А., Толстіхіної А. Л., Чижика С. А. та інших.

Проте аналіз цих робіт показав відсутність даних про фізичні закономірності впливу дестабілізуючих факторів (кліматичних факторів оточуючого середовища та робочих параметрів проведення контролю) на точність, чутливість та відтворюваність методів АСМ, що не дозволяє встановити діапазони режимів їх стабільної роботи.

Разом з тим підвищення призначеного терміну служби інструментарію АСМ ускладнене через відсутність технологій модифікації останнього для застосування при комплексному контролі мікрогеометрії та механічних характеристик матеріалів.

Також існує невизначеність в описі фізичних процесів, що відбуваються на нанометричному рівні при дослідженні деяких матеріалів (особливо композиційних), а також компонентів МСТ на їх основі. Особливо ускладнює проведення досліджень характеристик цих матеріалів відсутність однозначної теорії, що описувала б процеси та явища, які відбуваються з цими матеріалами на нанометричному рівні за критичних значень кліматичних факторів оточуючого середовища, а також її експериментальне підтвердження. На сьогодні не виявлено робіт, в яких би надавалися рекомендації та обговорювалися принципи створення сучасної автоматизованої системи неруйнівного контролю на базі АСМ для оперативного високоточного та високоякісного контролю мікрогеометрії поверхні та механічних характеристик МСТ.

Вказані проблеми обумовлюють необхідність вирішення важливої науково-технічної проблеми, що полягає в удосконаленні існуючих та створенні нових методів і засобів АСМ для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ шляхом застосування автоматизованих систем вимірювання і контролю цих характеристик з урахуванням дії дестабілізуючих факторів, розроблення математичних та експериментально-статистичних моделей, що в цілому представляє собою наукові основи керування якістю процесу контролю на основі методу АСМ.

В другому розділі проводиться обґрунтування вибору об'єктів контролю, розробка комплексу наукових методик для теоретичних розрахунків,

експериментальних досліджень та обробки результатів експерименту, а також наводиться опис експериментального та вимірювального обладнання.

Методики експериментальних досліджень включають як удосконалені відомі, так і оригінальні, створені автором методики (табл.1), що призначенні для дослідження та контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь матеріалів (мікротвердості, зносостійкості); контролю товщини, адгезійної міцності, зносостійкості поверхневого шару матеріалів та тонких покриттів на них; математичної обробки результатів дослідження поверхні матеріалів шляхом усунення артефактів сканування та відновлення нанорельєфу поверхні, а також для оптимізації режимів роботи АСМ та прогнозування терміну експлуатації його робочого інструменту.

Таблиця 1

Склад комплексу наукових методик, що розроблені в дисертаційній роботі

Назва методики	Очікуваний результат від застосування методики
Методика комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ	Підвищення точності та відтворюваності результатів контролю характеристик поверхонь компонентів МСТ методом АСМ шляхом застосування універсального інструменту та проведення комплексу досліджень
Методика контролю характеристик поверхневого шару матеріалів та тонких покриттів	Розширення можливостей АСМ при визначенні та контролі товщини, адгезійної міцності та зносостійкості поверхневого шару і тонких покриттів на компонентах МСТ
Методика математичної обробки результатів контролю поверхні матеріалів	Підвищення точності та якості результатів контролю (усунення артефактів АСМ-зображення, відновлення нанорельєфу поверхні)
Методика оптимізації режимів проведення контролю	Підвищення точності, чутливості та швидкодії результатів контролю методом АСМ шляхом обрання оптимальних робочих режимів при контролі геометричних та механічних характеристик
Методика прогнозування терміну експлуатації зонду АСМ та компонентів МСТ	Підвищення надійності контролю характеристик матеріалів МСТ методом АСМ шляхом встановлення призначеного та граничного часу експлуатації зондів АСМ та компонентів МСТ

Комплекс наукових методик для контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь матеріалів передбачає:

– на підготовчому етапі: обрання оптимальних робочих режимів контролю геометричних та механічних характеристик в залежності від кліматичних факторів оточуючого середовища, розмірів та матеріалів об'єктів контролю;

– на етапі сканування поверхні: діагностування небезпечних артефактів на досліджуваній поверхні, що можуть призвести до спотворення результатів контролю та руйнування елементів блоку контролю; контроль мікрогеометрії ділянки зразка та механічних характеристик поверхні компоненту МСТ. Додатково (якщо це передбачає план проведення контролю) може проводитися контроль характеристик поверхневого

шару зразка та/або тонких покриттів на ньому;

– на етапі обробки результатів: математичну обробку результатів контролю поверхні матеріалів, яка включає: усунення нахилу поверхні, фільтрацію отриманих даних, усунення артефактів сканування тощо. Така обробка дозволить отримати високоточні та якісні топограми поверхні, а також результати контролю геометричних та механічних характеристик, значення яких можуть бути використані для прогнозування терміну експлуатації, як зонду АСМ, так і компонентів МСТ.

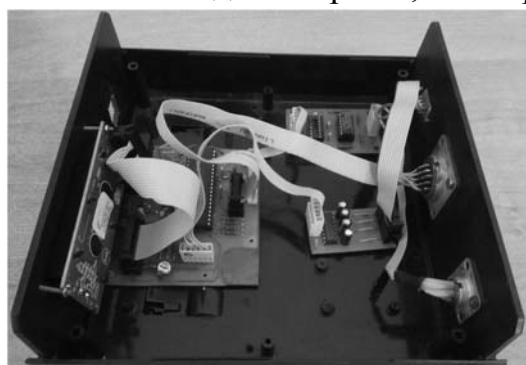
Підтвердження результатів контролю, отриманих методом скануючої АСМ (прилад: “NT-206”, виробник: ТДВ “Микротестмашины”, Білорусь) проводилося з використанням сучасних аналітичних методів та обладнання:

– методу растрової електронної мікроскопії (прилад: “JSM-6700F”, виробник: “JEOL”, США) для контролю топології поверхні та хімічного складу окремих її структурних елементів, а також товщини поверхневого шару і покриттів;

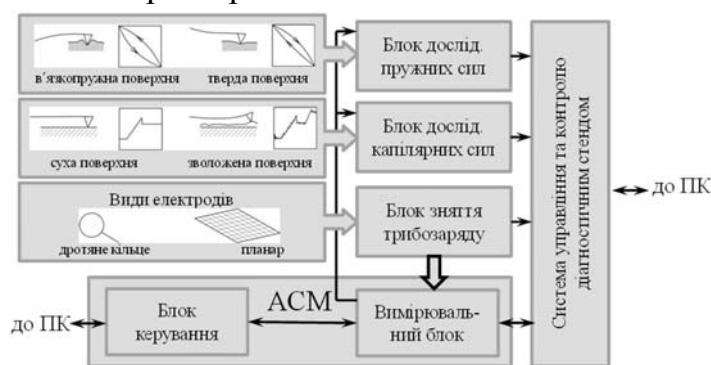
– методу мікротвердометрії за Вікерсом (прилад: “DuroScan-10/20”, виробник: “Емсо-Тест Prüfmaschinen GmbH”, Австрія) для контролю мікротвердості поверхонь компонентів МСТ;

– методів відриву та склерометрії (прилади: “АТ-101”, “FT2”, виробник: ТДВ “Микротестмашины”, Білорусь) для контролю адгезійної міцності та коефіцієнту зношуваності поверхні об’єктів контролю.

Для визначення силових характеристик в зоні взаємодії зонду АСМ з поверхнями за участю автора розроблено вимірювальний стенд, загальний вигляд та функціональна схема якого наведені на рис.1, а вимірювальні характеристики – в табл.2.



а.



б.

Рис. 1. Зовнішній вигляд (а) та функціональна схема (б) вимірювального стенду

Таблиця 2

Вимірювальні характеристики розробленого стенду

Вимірювальні характеристики	Діапазон значень	Відносна похибка вимірювання, %
Трибозаряд, $\times 10^{-3}$, Кл	19 – 25	$\pm (2,7 - 5)$
Капілярні сили, $\times 10^{-12}$, Н	0,2 – 6500	$\pm (5 - 7,5)$
Пружні сили, $\times 10^{-12}$, Н	2 – 10800	$\pm (3 - 4,5)$

Основним елементом вимірювального стенду є розроблена система управління та контролю, що включає блок дослідження пружних сил, визначення яких відбувається за кривою “підведення – відведення” зонду до поверхні. За характером цієї кривої робиться висновок про значення коефіцієнта пружності, що використовується при розрахунках механічних напружень, сили пружної взаємодії тощо.

На основі розробленого комплексу методик складено узагальнений алгоритм проведення контролю характеристик компонентів МСТ методом АСМ (рис. 2).

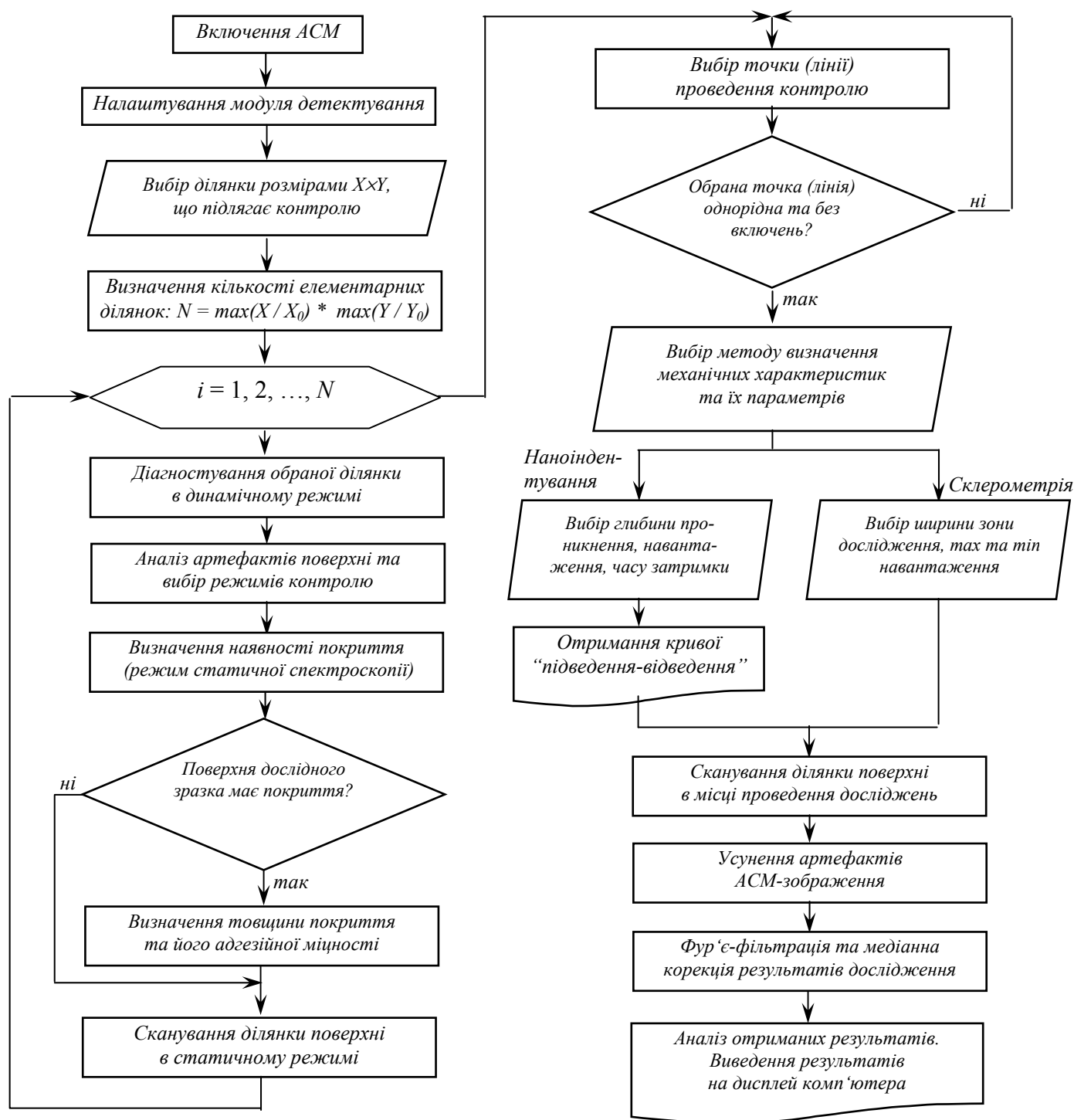


Рис. 2. Алгоритм проведення комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ методом АСМ

Таким чином, запропонований комплекс методик для проведення та математичної обробки результатів контролю методом АСМ, а також розроблений вимірювальний стенд дозволять скоротити час контролю мікрогеометрії та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ, а також зменшити кількість дефектів та артефактів сканування.

У третьому розділі наведено результати теоретичних досліджень процесів, на основі яких розроблені уточнені математичні моделі силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів на підготовчій, завершальній стадіях та стадії сканування поверхні, що дозволяють визначати режими стабільної роботи процесу контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ.

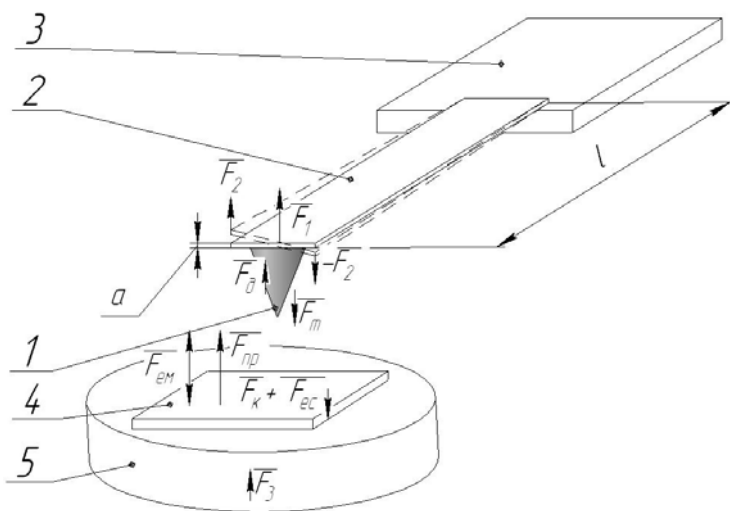


Рис. 3. Схема дії сил у блоці контролю АСМ:

- 1 – зонд; 2 – консоль; 3 – п'єзочип блоку контролю АСМ; 4 – об'єкт контролю;
- 5 – п'єзосканер; a , l – товщина та довжина консолі, відповідно (розшифрування позначень сил наведено в тексті автореферату)

силу пружної взаємодії $F_{пр}$; силу капілярної взаємодії $F_{к}$; силу електростатичної взаємодії $F_{ес}$; силу механічного деформування зонду $F_{д}$), сили, що діють на консоль (силу тяжіння системи “зонд – консоль” F_{m} , сили кручення F_2 та згину F_1 консолі) та зовнішні сили (силу подачі п'єзосканеру F_3).

При цьому контактні сили описувалися в рамках теорії класичної механіки суцільних середовищ, теорії контактної взаємодії в наносистемах, а також теорій міжмолекулярної та електромагнітної взаємодії.

Для кількісного опису діючих сил використовувалися класичні фізичні рівняння, з яких склалися математичні моделі взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів. Останні уточнювалися автором шляхом поправок, які враховували геометричні параметри моделі силової взаємодії, а також процеси, що відбуваються з матеріалами на нанометричному рівні (табл. 3).

Досліджено фізичні процеси, що відбуваються при взаємодії зонду АСМ з поверхнями в реальних умовах із урахуванням силових та енергетичних складових. Усі фізичні процеси при цьому поділялися на ті, що відбуваються в зоні контакту зонду з поверхнею та такі, які виникають безпосередньо в системі сканування АСМ (рис. 3).

В результаті ретельного вивчення фізичних процесів, які виникають в АСМ, було встановлено, що домінуючою є саме силова взаємодія зонду АСМ із зразком, де усі сили було поділено на: сили взаємодії між зондом та поверхнею (силу електромагнітної взаємодії $F_{ем}$;

Формули для розрахунку основних складових силової взаємодії

Вид сили	Розрахункова формула	№
Сила міжмолекулярної взаємодії	$\vec{F}_{\text{ме}} = \frac{\pi^2 n_1 n_2 A}{6h} \cdot \frac{R^2 (1 - \sin \varphi)^2 (R^2 (1 - \sin \varphi) + 3R \cdot h - R(1 - \sin \varphi) \cdot h)}{h^2 (h + R(1 - \sin \varphi))^3},$	(1)
Сила капілярної взаємодії	$\vec{F}_k = \pm 2\pi k \sigma R, \quad k = \begin{cases} \sqrt{1 + (2 \cos \theta)^\alpha}, & \text{при гідрофільній взаємодії} \\ 1,5(1 + \cos \theta)^{\alpha-1}, & \text{при гідрофобній взаємодії} \end{cases}$	(2)
Сила пружної взаємодії	$\vec{F}_{\text{пр}} = \frac{4E E_1 a^3}{3R(E(1 - \mu_1^2) + E_1(1 - \mu^2))},$	(3)
Сила електростатичної взаємодії	$\vec{F}_{\text{ec}} = \frac{R^2 n e (h - R/3)}{2\epsilon_m \epsilon_0 h^2} \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_m}{\epsilon_s + \epsilon_m} \right),$	(4)

Пояснення до формул (1) – (4): R – радіус вістря зонду, м; h – найменша відстань між зондом і зразком, м; n_1, n_2 – концентрація молекул в поверхневих шарах, відповідно, зонду та зразка, м^{-3} ; A – постійна Гамакера, Дж; φ – половинний кут ухилу зонду, град; σ – коефіцієнт поверхневого натягу адсорбованої рідини, Н/м; k – коефіцієнт гідрофільності зонду; θ – крайовий кут змочування, град; α – степеневий показник ($\alpha = 2$ – у випадку підведення зонду до поверхні, $\alpha = 1$ – у випадку відведення зонду від поверхні); E_1, E – модулі пружності матеріалів зонду та зразка відповідно, МПа; a – радіус контактної площадки, що виникає під дією сили $F_{\text{пр}}$, нм; μ_1, μ – коефіцієнти Пуассона для зонду і зразка, відповідно; n – концентрація носіїв заряду, м^{-3} ; e – елементарна величина заряду носіїв, Кл; ϵ_m, ϵ_s – діелектричні проникності середовища та зразка між зондом і поверхнею; ϵ_0 – діелектрична стала; $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м.

В результаті проведених розрахунків отримані залежності узагальненої сили взаємодії між зондом і досліджуваним зразком від положення зонду (рис. 4).

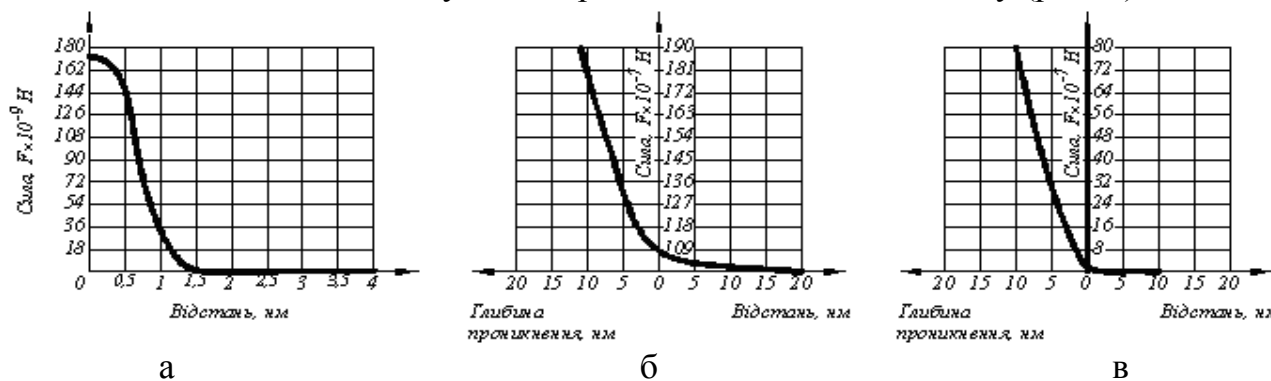


Рис. 4. Залежність сил взаємодії між кремнієвим зондом та досліджуваною поверхнею: а – підведення зонда до зразка; б, в – проникнення зонду в діелектричну (б, кремній марки Кр0) та провідну (в, золото Au-998) поверхні

Як видно із цих залежностей на етапах підведення та відведення зонда від зразка сили взаємодії мають мінімальні значення і фактично не залежать від того, який матеріал досліджується (криві підведення та відведення накладаються – рис.4, а). При заглибленні зонда в діелектрик найбільше впливають сили електростатичної взаємодії (рис.4, б), тоді, як при дослідженні провідників – ці сили не враховуються (рис.4, в).

При цьому для проведення розрахунків пружної сили, сил капілярної та електростатичної взаємодії використовувалися дані з вимірювального стенду (рис. 1).

Таким чином було встановлено, що значний вплив в системі “зонд – зразок” здійснюють: сила електростатичної взаємодії (при підведенні зонду до діелектричної поверхні), $F_{ec} = 12 \cdot 10^{-6}$ Н та сила пружної взаємодії (при проникненні зонду в зразок) $F_{np} = 10,8 \cdot 10^{-6}$ Н.

Також в розділі досліджено енергетичні перетворення, що відбувається у блоці контролю АСМ, та складено їх енергетичну схему (рис.5).

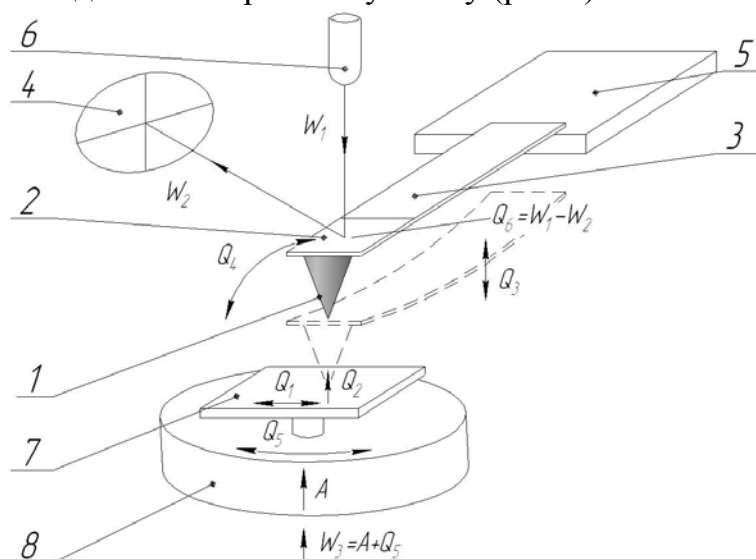


Рис. 5. Схема енергетичного обміну у блоці контролю АСМ: 1 – зонд; 2 – відзеркалюючий елемент; 3 – консоль; 4 – фотодетектор; 5 – п'єзочип блоку контролю АСМ; 6 – лазерний позиціонер; 7 – об'єкт контролю; 8 – п'єзосканер
Теплові витрати: Q_1 – при механічному терті зонду по досліджуваній поверхні; Q_2 – при дії електромагнітних полів та електричного заряду; Q_3 – при вигину консолі; Q_4 – при крученні консолі; Q_5 – при крученні п'єзосканеру; Енергетичний вплив: W_1 – енергія випромінювання позиціонеру; W_2 – енергія лазерного випромінювання на фотодетекторі; W_3 – енергія, що подається на п'єзосканер; A – корисна робота п'єзосканеру

В основі теплових розрахунків лежить комплекс нелінійних, нестационарних математичних моделей, які уточнювалися шляхом врахування форми, розмірів та температурних залежностей теплофізичних характеристик (об'ємної теплоємності $C_V(T) = C_{V0} T^{\nu}$, та коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T) = \lambda_0 T^{\nu}$), як конструктивних елементів блоку контролю, так і об'єктів контролю. Причому, враховувався лише теплообмін теплопередачею (конвективний та променевий види теплообміну не розглядалися в силу їхньої несуттєвості).

Для проведення розрахунків процесу нагрівання окремих елементів блоку

контролю АСМ були використані стандартні рівняння теплопровідності, уточнені автором шляхом врахування геометричних розмірів елементів та залежностей $C_V(T)$ та $\lambda(T)$. Застосовуючи стандартні методи (як-то: метод інтегральних перетворень Фур'є) із рівнянь моделей були отримані аналітичні вирази для визначення розподілів температури в розглядуваних елементах (табл. 4).

Таблиця 4

Аналітичні вирази для визначення розподілу температури в елементах блоку контролю

Елемент	Аналітичний вираз для визначення розподілу температури	№
Пластина великої товщини (зразок)	$T(z,t) = \left[T_0^{v+1} + \frac{(v+1)a_0 q_{n0}}{\sqrt{\pi\lambda_0}} \int_0^t \frac{e^{-\frac{z^2}{4a_0^2(t-\tau)}}}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \right]^{\frac{1}{v+1}}$	(5)
Пластина малої товщини (консоль)	$T(z,t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1)q_{n0}}{\lambda_0} \times \left[\frac{a_0^2 t}{H} + \frac{3z^2 - H^2}{6H} + \frac{2H}{\pi^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\cos\left(\frac{\pi n z}{H}\right)}{n^2} e^{-\left(\frac{\pi a_0 n}{H}\right)^2 t} \right] \right\}^{\frac{1}{v+1}}$	(6)
Напівсферичний елемент (зонд)	$T(r,t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1)q_{n0}R}{\lambda_0} \left[\frac{3a_0^2 t}{10R^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R \sin\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)}{\mu_n^3 \cos(\mu_n R)} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n a_0}{R}\right)^2 t} \right] \right\}$	(7)
Торцева поверхня циліндру (п'єзо-сканер)	$T(r,z,t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1)}{4\pi\lambda_0} \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{r^2 \xi^2}{4} + \frac{r^4 \xi^4}{64} - \frac{r^6 \xi^6}{2304} \right) \times \left[p_{01} \left(1 - \frac{R_1^2 \xi^2}{8} + \frac{R_1^4 \xi^4}{192} - \frac{R_1^6 \xi^6}{9216} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + p_{02} \left(1 - \frac{\xi^2}{8} (R_2^2 - R_1^2) + \frac{\xi^4}{192} (R_2^2 - R_1^2) - \frac{\xi^6}{9216} (R_2^2 - R_1^2) \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \left[e^{-z\xi} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2a_0\sqrt{t}} - \xi a_0\sqrt{t} \right) \right) - e^{-z\xi} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2a_0\sqrt{t}} + \xi a_0\sqrt{t} \right) \right) \right] d\xi \right\}^{\frac{1}{v+1}}$	(8)

Пояснення до формул (5) – (8): T_0 – початкова температура моделі, К; v – коефіцієнт Пуасона, q_{n0} – зовнішній тепловий потік, Вт/м²; r, R – радіуси вістря та основи зонда відповідно, м; a_0^2 – коефіцієнт теплопровідності, м²/с; t – час термічного впливу, с; ξ – змінна товщина шару, що нагрівається, м; z – глибина проникнення зонду в зразок, м; H – товщина пластини, м; p_{01}, p_{02} – потужності джерел теплового впливу, Вт.

Кількісне визначення теплових витрат в елементах блоку контролю проводилося за допомогою програми, що була розроблена в дисертаційній роботі. При цьому використовувалися відомі значення геометричних параметрів та теплофізичних характеристик матеріалів, з яких виготовляються, як елементи блоку контролю, так і об'єкти контролю.

В результаті розрахунків встановлено, що найбільше тепловиділення відбува-

ється в зоні контакту зонду з поверхнею (рис. 6).

Узгодження цих моделей проводилося за схемою теплового балансу, в якому спільний тепловий внесок рівномірно розподілявся між усіма елементами, що приймали участь у теплообміні (враховувалися також теплофізичні властивості матеріалів, з яких виготовлялися ці елементи). Оцінка адекватності розглянутих моделей теплообміну полягала у складанні та дослідженні еквівалентної теплової схеми АСМ, яка ґрунтується на використанні низки теплових опорів.

Розв'язання таких систем рівнянь проводилося в спеціалізованому програмному додатку "ELCUT". Це дозволило зробити висновок про найбільші теплові витрати внаслідок тертя зонду по поверхні (порядку 68%). Результати експериментів підтверджуються аналітичними розрахунками.

Таким чином, в результаті складання та розв'язання системи силових (1) – (4) та теплофізичних (5) – (8) аналітичних рівнянь, в яких враховувалися геометричні параметри та теплофізичні характеристики конструктивних елементів блоку контролю і об'єктів контролю, а також процеси, що відбуваються з матеріалами на нанометричному рівні, проведено уточнення математичних моделей взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів. Дослідження цих моделей дозволило визначити лімітуючі фактори (сили електростатичної F_{ec} , капілярної F_k взаємодії та дисипацію тепла в зоні фізичного контакту зонду з поверхнею в результаті його тертя об поверхню Q_l), що негативно впливають, як на результати контролю, так і на стан зонду та поверхні. Мінімізація лімітуючих факторів шляхом застосування оригінальних технічних рішень дозволила більш точно (відносна похибка зменшується на 2 – 3,5%, а коефіцієнт варіації – на 2 – 2,4%) встановити діапазон робочих параметрів сканування, що забезпечують стабільну роботу АСМ в процесі контролю: час механічної релаксації $(4,8 – 6) \cdot 10^{-3}$ с; швидкість (18 – 26) нм/с та крок сканування (78 – 82) нм.

В четвертому розділі методом планування експерименту були розроблені та досліджені нові експериментально-статистичні моделі для оцінювання впливу кліматичних факторів та робочих параметрів АСМ при застосуванні та довготривалому зберіганні зонду на процес неруйнівного контролю, а також встановлені діапазони характеристик, в межах яких підвищується точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю при визначенні характеристик компонентів МСТ.

Враховано, що найбільший дестабілізуючий вплив на експлуатаційні характеристики зондів АСМ чинять: кліматичні фактори (при тривалому зберіганні зонду в умовах оточуючого середовища) та робочі параметри процесу контролю.

В зв'язку з цим були розроблені експериментально-статистичні моделі та отримані регресійні залежності метрологічних характеристик (точності, чутливості та

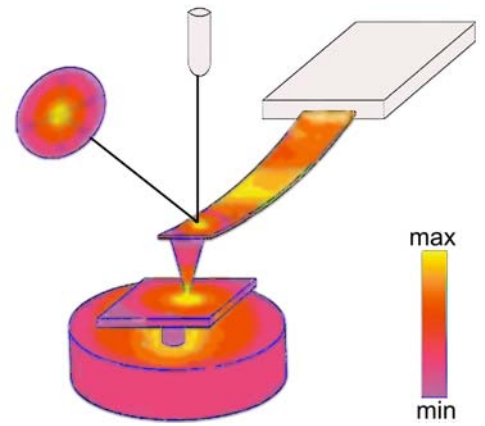


Рис. 6. Розподіл тепловиділення в елементах блоку контролю АСМ (за результатами аналітичних розрахунків)

відтворюваності результатів контролю) від кліматичних факторів оточуючого середовища та робочих параметрів контролю. Наприклад, отримані регресійні залежності відносно похибки результатів контролю (ϵ , %) мають наступний вигляд:

– від кліматичних факторів: температури (T , К), відносної вологості (ϕ , %), концентрації аміаку (C_{NH_3} , мг/м³) та з'єднань сірки (C_S , мг/м³):

$$\begin{aligned} \epsilon = & 13,271 + x_1 - x_2 - x_3 + x_4 + 0,351 \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ & + 0,455 \cdot x_3 \cdot x_4 - 0,412 \cdot x_2 \cdot x_4 + y_1 - y_2 - y_3 - y_4, \end{aligned} \quad (9)$$

де $x_1 = 0,279 \cdot (T - 295,131)$; $x_2 = 0,026 \cdot (\phi - 30,011)$; $x_3 = 3,55 \cdot (C_{NH_3} - 0,036)$; $x_4 = 1,316 \cdot (C_S - 0,005)$; $y_1 = 0,671 \cdot (T^2 - 0,082T + 0,210)$; $y_2 = 0,004 \cdot (\phi^2 - 0,015\phi + 0,223)$; $y_3 = 0,355 \cdot (C_{NH_3}^2 - 0,005C_{NH_3} + 0,011)$; $y_4 = 0,001 \cdot (C_S^2 - 0,001C_S + 0,008)$;

– від робочих параметрів процесу контролю: часу механічної релаксації (τ , с), швидкості (V , нм/с) та кроку сканування (h , нм):

$$\begin{aligned} \epsilon = & -151,185 - x_1 + x_2 + x_3 - 0,832 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ & + 0,029 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,021 \cdot x_2 \cdot x_3 + y_1 + y_2 + y_3, \end{aligned} \quad (10)$$

де $x_1 = 0,425 \cdot (V - 16,25)$; $x_2 = 2,15 \cdot (h - 85,011)$; $x_3 = 0,001 \cdot (\tau - 0,006)$; $y_1 = 1,163 \cdot (V^2 - 0,027V + 0,087)$; $y_2 = 0,458 \cdot (h^2 - 0,076h + 0,494)$; $y_3 = 0,008 \cdot (\tau^2 - 0,087\tau + 0,284)$.

Перевірка значущості коефіцієнтів рівнянь регресії, що була проведена за критерієм Стьюдента з використанням не менше десяти паралельних дослідів, показала важливість усіх коефіцієнтів отриманих рівнянь та не перевищувала значення $t_i < t_m$. Встановлено, що усі отримані моделі інформативні ($Fr_{роз} > Fr_{кр}$), адекватні ($F_{роз} > F_{кр}$) та стійкі (число обумовленості $cond \rightarrow 1$). Аналогічним чином були одержані рівняння регресії чутливості роботи блоку контролю АСМ (S) та відтворюваності ($Conv$) результатів контролю від кліматичних факторів та параметрів сканування.

В результаті комплексного системного аналізу методу АСМ були встановлені закономірності впливу кліматичних факторів та робочих параметрів процесу контролю на точність, чутливість і відтворюваність результатів контролю мікрогеометрії та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ, представлені на рис.7.

Отриманий результат показав:

– підвищення температури оточуючого середовища до температури понад 299 К веде до підвищення теплового дрейфу атомів поверхні, чим збільшує відносну похибку контролю на 3 – 7%, а зменшення температури до позначки менше 293 К – погіршує характеристики блоку контролю, що, в свою чергу, збільшує похибку контролю на 8 – 11% (рис.7.а);

– збільшення вологості оточуючого середовища до величини понад 70% (рис.7, а) збільшує відносну похибку результатів контролю на 5 – 8% та зменшує достовірність отримуваних результатів, що пов'язано з підвищенням ступеня впливу капілярних сил;

– зменшення вологості до значення менше 30% (рис.7, а) веде до збільшення вільних носіїв заряду та їх рухливості, чим створюється ризик виникнення електричного пробоя між зондом і поверхнею та руйнування останніх;

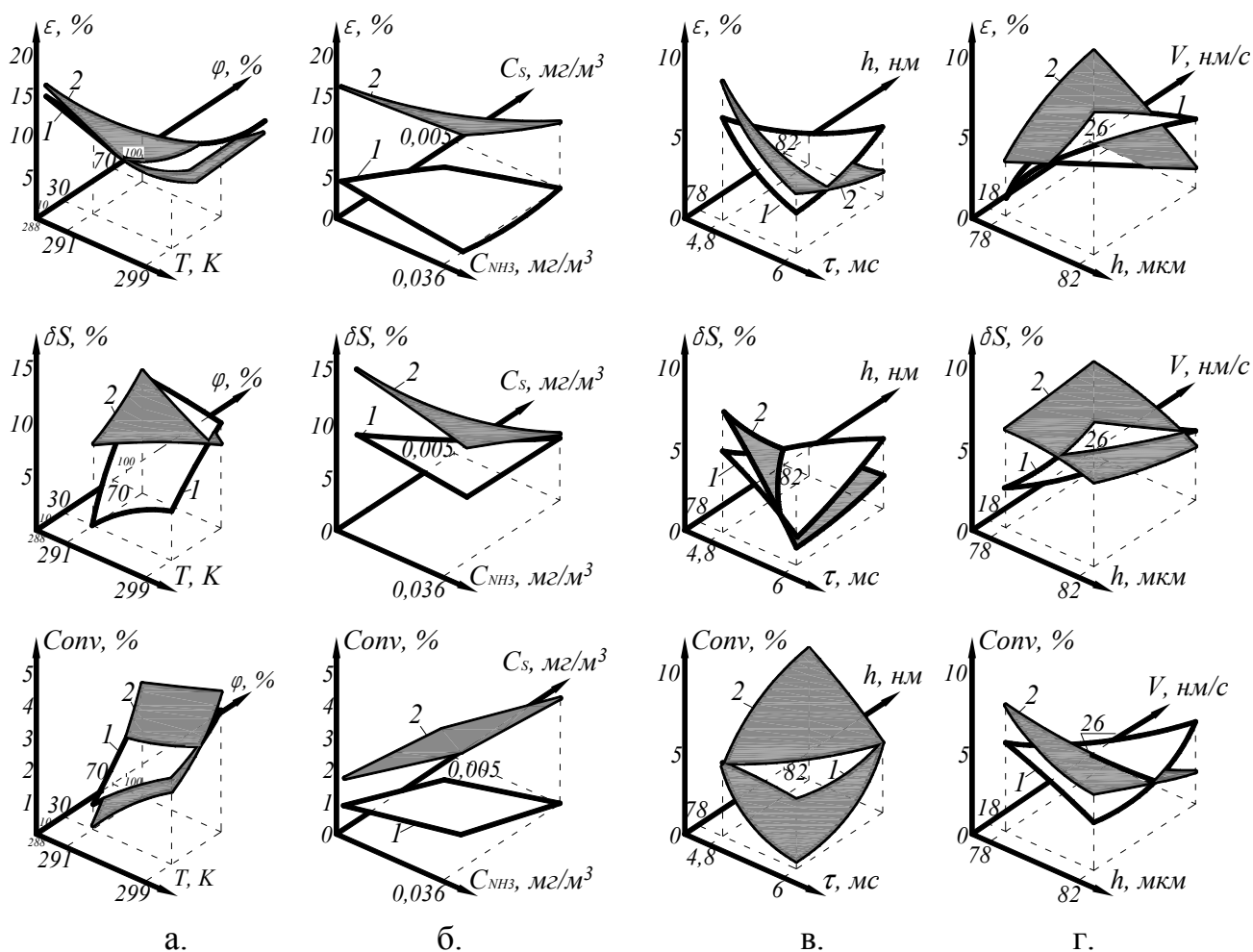


Рис. 7. Закономірності впливу на точність (ϵ – відносна похибка), зміну чутливості (δS) та відтворюваність ($Conv$ – коефіцієнт варіації) результатів контролю методом АСМ кліматичних факторів оточуючого середовища (а, б) та робочих режимів (в, г): а – за сталих значень концентрацій з'єднань аміаку C_{NH_3} та сірки C_S (1 – $C_{NH_3} = 0$, $C_S = 0$; 2 – $C_{NH_3} = 0,036 \text{ мг/м}^3$, $C_S = 0,005 \text{ мг/м}^3$); б – за сталих значень температури T та відносної вологості φ (1 – $T = 291 \text{ К}$, $\varphi = 30\%$; 2 – $T = 299 \text{ К}$, $\varphi = 70\%$); в – за сталих значень часу механічної релаксації τ (1 – $\tau = 4,5 \text{ мс}$, 2 – $\tau = 6,6 \text{ мс}$); г – за сталих значень швидкості сканування (1 – $V = 18 \text{ нм/с}$; 2 – $V = 45 \text{ нм/с}$)

– зменшення концентрації аміаку в оточуючій атмосфері до $0,036 \text{ мг/м}^3$, з одночасним зменшенням концентрації з'єднань сірки до $0,005 \text{ мг/м}^3$ (рис.7, б) дозволяє уникнути корозії срібного покриття системи електродів п'єзочипу та дзеркала системи позиціонування блоку контролю, чим підвищити чутливість методу АСМ на 5 – 9%;

– час механічної релаксації менший за $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ збільшує відносну похибку при контролі механічних величин на 5 – 7%, тоді, як час релаксації більший за $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ значно збільшує час контролю поверхні та веде до деформування, як досліджуваної поверхні, так і до прискореного “затуплення” вістря зонду АСМ (рис.7, в).

– швидкість сканування менша за 18 нм/с та крок сканування менший за 78 нм ведуть до “залипання” зонду до поверхні, тоді як перевищення швидкості сканування

понад 45 нм/с та кроку сканування понад 82 нм призводять до збільшення відносної похибки на 8 – 12% та зменшення чутливості – на 2 – 6% (рис.7, г).

На підставі наведених залежностей (рис.7) проведено експертне оцінювання значущості впливу кліматичних факторів та робочих параметрів на точність, чутливість та відтворюваність результатів при контролі характеристик компонентів МСТ (табл.5).

Таблиця 5

Експертна оцінка значущості впливу кліматичних факторів та робочих параметрів процесу контролю на точність, чутливість та відтворюваність методу АСМ

Метрологічні характеристики	Експертна оцінка значущості впливу різних факторів на:		
	Точність	Чутливість	Відтворюваність
Кліматичні фактори та параметри процесу контролю			
Кліматичні фактори			
Температура, T , К	0,42	0,116	0,43
Відносна вологість, φ , %	0,35	0,214	0,313
Концентрація аміаку, C_{NH_3} , мг/м ³	0,043	0,437	0,165
Концентрація з'єднань сірки, C_S , мг/м ³	0,187	0,233	0,092
Робочі параметри			
Швидкість сканування, V , нм/с	0,403	0,39	0,386
Крок сканування, h , нм	0,34	0,18	0,288
Час релаксації, τ , с	0,257	0,43	0,326

Подальше удосконалення інструментальної та апаратно-методичної бази забезпечить підвищення точності, чутливості, відтворюваності та надійності процесу контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ, чим покращить дотримання вимог, які висуваються до методів та засобів неруйнівного контролю системою міжнародних стандартів.

В результаті проведених розрахунків встановлені раціональні діапазони параметрів зовнішнього середовища та робочих параметрів процесу контролю, а саме: робоча температура (293 – 299) К, відносна вологість (30 – 70)%, концентрації аміаку в оточуючій атмосфері (не більше 0,036 мг/м³) та з'єднань сірки (не більше 0,005 мг/м³), час механічної релаксації $(4,5 - 6,6) \cdot 10^{-3}$ с, швидкість (18 – 45) нм/с та крок сканування (78 – 85) нм. Визначено, що між цими параметрами та даними отриманими в третьому розділі дисертаційного дослідження існує прямий сильний кореляційний зв'язок (показник кореляції $r = 0,93$).

Подальші розробка та дослідження експериментально-статистичних моделей дозволили спрогнозувати терміни експлуатації (t_e) та довготривалого зберігання (t_{dmz}) зонду АСМ:

$$t_e = 148 - 0,33 \cdot (T - 292) - 12,01 \cdot (\varphi - 0,3) - 3,38 \cdot (C_{NH_3} - 0,036) \cdot (C_S - 0,005) + \\ + 29,42 \cdot (V - 18) \cdot (0,023 \cdot \tau^2 - 0,128\tau) - 0,06 \cdot (V - 26) \cdot (0,3h - 78) + 0,015 \cdot (312 \cdot \tau^2 - 0,264) \times (11) \\ \times (127 \cdot \varphi^2 - 8,9) - 2,12 \cdot T \cdot (0,012 \cdot C_{NH_3}^2 - 0,003) \cdot (0,002 \cdot C_S^2 - 0,0018).$$

$$t_{дмз} = 7505 - 512,12 \cdot (T - 291) - 97,3 \cdot (1,6 \cdot \varphi^2 + 2,4 \cdot \varphi - 0,35) - \\ - 23,1 \cdot (C_{NH_3} - 0,038) \cdot (C_S - 0,008) + 1671 \cdot T^2 \cdot (4,45 \cdot C_{NH_3}^2 - 0,14) \cdot (C_S^2 - 0,064). \quad (12)$$

З цих моделей випливає, що збільшення часу механічної релаксації з одночасним збільшенням кроку сканування та зменшенням швидкості сканування збільшує час надійної експлуатації зондів зі 120 – 140 хвилин до 160 – 200 хвилин, тоді, як зменшення температури та відносної вологості оточуючого середовища з одночасним зменшенням концентрацій з'єднань аміаку та сірки в повітрі веде до збільшення часу довготривалого зберігання з 7500 – 9000 годин до 9400 – 10800 годин. Крім того, дана модель дозволяє спрогнозувати максимальний термін експлуатації та тривалого зберігання зондів АСМ.

В процесі розв'язання рівняння регресії (11) – (12) з урахуванням прискореного старіння та необхідності проведення проміжного контролю стану зонду, визначався інтервал часу, через який слід проводити такий контроль. У даному випадку, “нульовий” контроль стану зонду АСМ здійснюється з використанням еталонних тест-об'єктів. Для підтвердження коректності подальшої експлуатації зонду встановлено, що початковий контроль стану зонду слід проводити не пізніше 16 – 18 хвилин (5 – 8 робочих циклів) від початку його експлуатації.

Таким чином, розроблені в розділі нові експериментально-статистичні моделі дозволили оцінити вплив кліматичних факторів та робочих параметрів контролю при застосуванні і довготривалому зберіганні зондів АСМ на точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю характеристик поверхонь компонентів МСТ. Встановлені за допомогою цих моделей раціональні діапазони кліматичних факторів збільшили приведений термін експлуатації зонду на 30 – 40%, ймовірність його безвідмовної роботи – з 0,89 – 0,93 до 0,98 та зменшили в 1,2 – 3,4 рази швидкість корозії зонду.

П'ятий розділ присвячений розвитку інструментальної та апаратно-методичної баз АСМ, що ґрунтуються на розроблених в роботі методичному комплексі, математичних та експериментально-статистичних моделях, та які забезпечуватимуть підвищення точності, чутливості, відтворюваності та надійності контролю геометричних і механічних характеристик пристроїв МСТ.

Розвиток інструментальної бази АСМ полягав у розробці методу виготовлення універсального інструментарію для нанометричного контролю шляхом використання електронно-променевого модифікування. Показано, що за допомогою такого інструментарію (зондів АСМ та тест-об'єктів) можна проводити комплексний контроль геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ з високою точністю, відтворюваністю та надійністю.

Автором запропоновано два концептуально нових підходи до виготовлення універсального інструментарію для проведення комплексного нанометричного контролю методом АСМ, технологічні схеми яких наведені на рис. 8. Застосування таких підходів дозволило суттєво збільшити строк служби зондів та підвищити відтворюваність результатів контролю.



Рис. 8. Технологічна схема виготовлення наноінструменту для АСМ:
а – повний технологічний цикл; б – модифікація стандартного інструментарію

Виготовлені за вказаними технологіями зонди для досліджень в АСМ підлягали обов'язковому контролю в процесі виготовлення окремих елементів блоку контролю. Також проводився аналіз хімічних, структурних та експлуатаційних характеристик зондів, отриманих у вищезазначені способи.

Для коректної роботи блоку контролю в контактному режимі важливим питанням залишається точність визначення відхилення кантилеверу АСМ за рівнем теплових шумів, як самого кантилеверу, так і шумів оптичної системи. В результаті проведених розрахунків встановлено, що теплові шуми (k) та відхилення (A) кантилеверу внаслідок їх дії дорівнюють, відповідно: $k = 2$ нм; $A = 14,2$ нм.

Результати рентгенофлуоресцентного аналізу хімічного складу отриманих зондів та покриттів на них (прилад “S1 Titan”, виробник: “Bruker”, Німеччина), а також дифрактометричного аналізу (прилад “D8” виробник: “Fabline”, Bruker, Німеччина)

показали високу однорідність та упорядкованість структури покриття. При цьому, такі зонди за структурою та хімічним складом не поступаються зондам відомих марок.

Для забезпечення єдності та гарантованої точності контролю мікрогеометрії, що проводяться в нанометровому діапазоні із залученням методу АСМ необхідно проводити первинне та періодичне калібрування зонду за еталонними зразками – тест-об'єктами. Тому в розділі запропоновано технологічні основи виготовлення тестових структур для АСМ (рис. 8,б), а також розглянуто можливість використання нестандартних структур, на кшталт пластин з монокристалічного кремнію, фрагментів штампів для DVD-дисків та голограм тощо, в якості тест-об'єктів.

Результати калібрування АСМ за допомогою тест-об'єктів виготовлених за запропонованою в дисертації технологією, що порівнювалися з результатами, отриманими на атестованих тест-решітках МШПС-2.0К, TGZ3 та зразку з монокристалічного кварцу, показали високу точність дотримання геометрії профілю таких тестових структур (відхилення від результатів отриманих на атестованих об'єктах, не перевищувати 5,5%), та, разом з цим, дозволили визначити поправочні коефіцієнти мікротвердості та зносостійкості матеріалу зонду АСМ (рис.9).

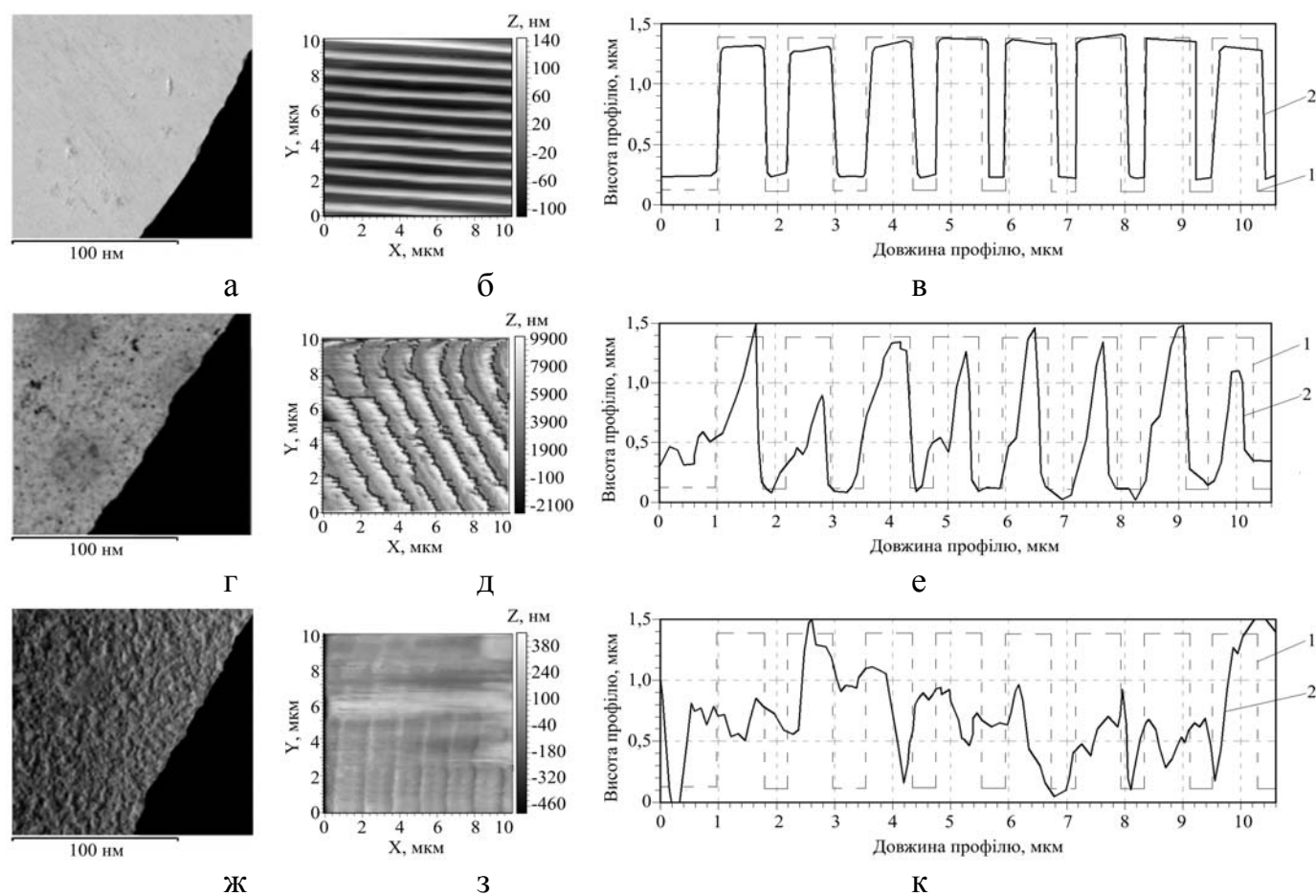


Рис. 9. Мікрознімки (а, г, ж) фрагменту поверхні кремнієвого зонду CSC38, топограми ділянки поверхні (б, д, з) та профілі (в, е, и) поверхні TGZ1 (період – $2,2 \pm 0,05$ мкм); вихідні дані (а – в), після дослідження модифікованим (г – е) та не модифікованим (ж – к) кремнієвим зондом (100 хв експлуатації): 1 – вихідний профіль калібрувальної решітки; 2 – профіль решітки отриманий зондом, що експлуатувався

Таким чином, показана доцільність використання виготовлених тест-об'єктів в якості універсальних мір, що дозволяють визначати та коригувати, як геометричні параметри зонда, так і характеристики блоку контролю АСМ.

Для автоматизації процесу контролю МСТ методом АСМ з метою мінімізації впливу людського фактору та забезпечення можливості віддаленого управління та спостереження за процесом контролю в розділі наводяться основні етапи та результати розробки спеціалізованого апаратного та програмно-математичного забезпечення. Для цього проводилося вдосконалення окремих елементів та вузлів апаратного забезпечення методу АСМ, що дозволяє максимально автоматизувати процес контролю характеристик компонентів МСТ. Так, для удосконалення блоку контролю АСМ пропонується застосовувати розроблені за участю автора системи: позиціонування лазерного променя на зонд АСМ (патент України №91425) та видалення залишкового трибоелектричного заряду (патент України №91523). Це дозволяє гнучко керувати робочими режимами контролю, розширити межі досліджуваної ділянки поверхні з одночасним збільшенням її деталізації, а також збільшити механічну (в тому числі акустичну та вібраційну) і теплову стабільності процесу контролю.

За представленими вище результатами в дисертаційній роботі запропонована та технічно реалізована функціональна схема (рис.10) автоматизованої системи для контролю характеристик МСТ методом АСМ.

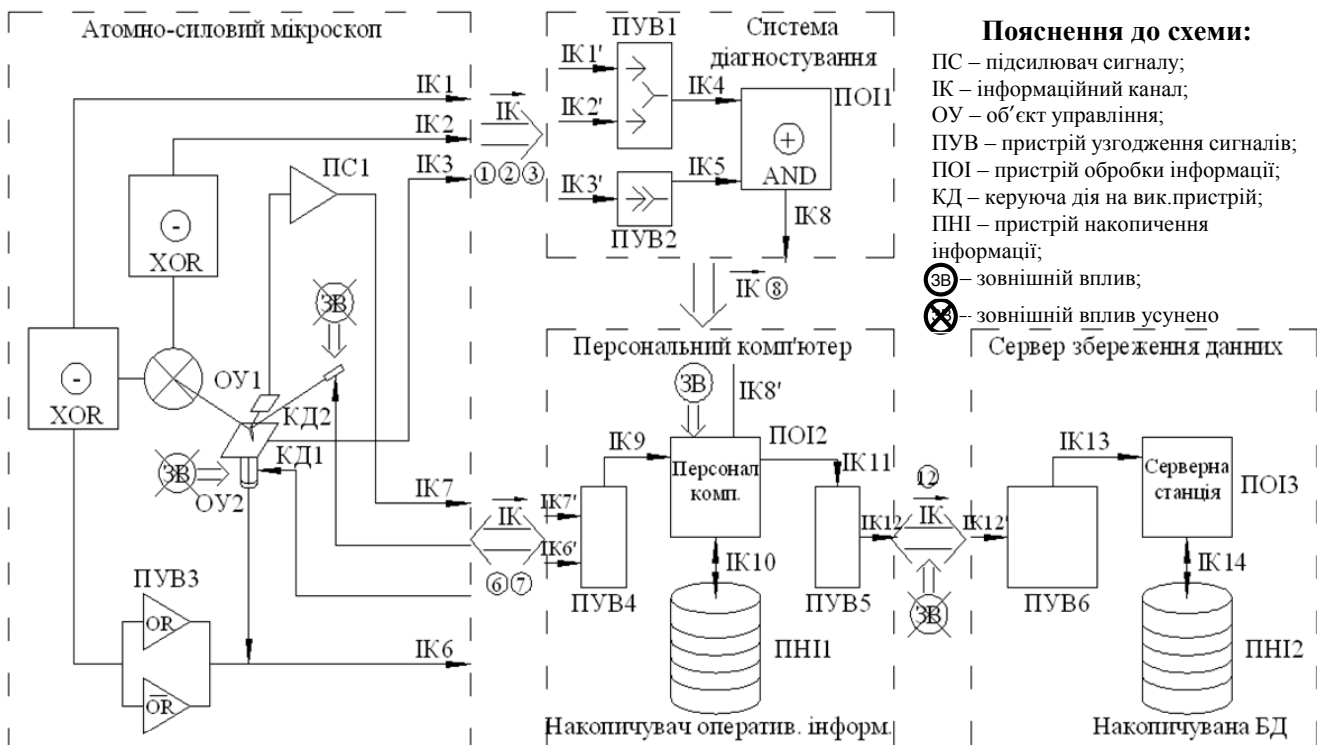


Рис.10. Функціональна схема автоматизованої системи контролю на базі АСМ

Вдосконалення автоматизованої системи контролю полягало у запровадженні системи діагностування та підключенні до віддаленого серверу збереження даних, а також у вдосконаленні системи контролю на базі АСМ. Так, на відміну від базової конструкції, вдосконалена автоматизована система АСМ складається з чотирьох

основних блоків, узгодження між якими відбувається за інформаційними каналами зв'язку USB. Інформація про положення зразка та зонду (з системи фотодетектування) із АСМ поступає на контролер автоматизованої системи контролю, де попередньо обробляється, і далі подається на ПК, куди також потрапляє інформація з результатами сканування та інформація про стан і положення виконавчих пристроїв АСМ – п'єзосканеру, системи зворотного зв'язку тощо. В результаті запровадження автоматизованої системи контролю зменшено час зворотного зв'язку на 28 – 32%, чим забезпечено своєчасне коректування алгоритму та режимів роботи АСМ. Це дозволило додатково підвищити швидкість проведення дослідження на 35 – 40% та забезпечити високу надійність роботи приладу.

Підвищення якості проведення контролю після запровадження вищезазначеної автоматизованої системи на базі АСМ підтверджувалося шляхом визначення відносної похибки результатів контролю. Так, розраховане значення загальної похибки для ідеалізованого випадку проведення контролю геометричних та механічних характеристик поверхні методом АСМ становило $\delta_{\Sigma} = 2,7\% < 5,5\%$, чим дотримувалися умови стандарту ISO/IEC 17025:2005.

Реалізація процесу автоматизації дослідницького обладнання на базі АСМ дозволяє максимально усунути зовнішній вплив на нього з боку оператора, а саме: повністю автоматизувати процеси налаштування лазера системи фотодетектування, системи попереднього підведення п'єзосканера до зразка та отримання залежності “відстань-сила”, виключити необхідність організації підключення до зовнішнього серверу збереження даних, а також мінімізувати витрати енергії на отримання і збереження даних за рахунок прямого п'єзоефекту, що виникає в зоні контакту зонду з поверхнею, завдяки чому виключити суб'єктивні фактори прийняття рішень та підвищити швидкодію проведення досліджень на 35 – 40%. За оператором залишаються функції встановлення зразка на предметний столик приладу, включення автоматизованої системи контролю та запуск спеціалізованого програмного забезпечення.

На основі реалізації процесу автоматизації системи контролю АСМ в дисертаційній роботі обґрунтовано і запропоновано новий підхід до побудови метрологічних комплексів, в яких контроль геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ мінімізує безпосереднє фізичне втручання в роботу комплексу з боку оператора та дозволяє застосовувати зовнішні бази накопичення знань. Це лягло в основу створення на базі “Лабораторії атомно-силової мікроскопії та нанометричних досліджень” віртуальної лабораторії нанометричних випробувань.

Таким чином, запропоновано та науково обґрунтовано новий метод підвищення точності, чутливості та відтворюваності процесу неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ на основі розробленого інструментального та програмно-апаратного забезпечення для автоматизації проведення контролю з урахуванням дії дестабілізуючих факторів. Це дозволило проводити високоточний (похибка $\varepsilon = 2,7 - 5,4\%$, зміна чутливості $\delta S = 0,2 - 0,5$ нм,

відтворюваність $Conv \leq 5\%$) та надійний (ймовірність безвідмовної роботи зондів, $P_A = 0,95 - 0,98$) контроль характеристик об'єктів дослідження, гнучко керувати робочими параметрами процесу контролю, а також дозволяє звести до мінімуму вплив людського фактору, здійснювати віддалене управління та спостереження за процесом контролю, виключити суб'єктивні фактори прийняття рішень, підвищити швидкодію проведення контролю та розширити межі досліджуваної ділянки поверхні (у вертикальній площині з 2 – 3 мкм до 4,5 – 6 мкм) з одночасним збільшенням її деталізації.

У шостому розділі представлені результати експериментального випробування на базі розроблених методів і засобів неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ шляхом підвищення точності, чутливості та відтворюваності результатів такого контролю, а також наводиться порівняння цих результатів з результатами досліджень, отриманими базовим методом АСМ та альтернативними методами контролю механічних характеристик компонентів МСТ.

Усі експериментальні випробування проводилися на зразках із матеріалів, що знайшли широке використання при виготовленні компонентів МСТ, а саме: аморфного (a-Si) та полікристалічного (h-Si) кремнію, оптичного скла сорту “крони” марки К8, п'єзоелектричної кераміки системи ЦТС марки ЦТС-19, оксидних та металевих покриттів на кремнієвій основі та нанорозмірних структур на них. В той же час результати, що були отримані при використанні запропонованих методик та з урахуванням теоретичних досліджень, проведених в дисертаційній роботі, підтверджувалися стандартизованими методами дослідження на атестованому обладнанні. При цьому отримуваним запропонованим методом результати корелюють з результатами альтернативних тестових методів.

Дослідження стану поверхні проводилося на експериментальних зразках, в якості яких виступали елементи мікроактуатора із п'єзоелектричної кераміки марки ЦТС-19 зі срібними електродами, нанесеними на них, а також керамічні елементи датчика мікроакселерометру. Використовуючи розроблену систему діагностувалися приладні артефакти на поверхнях таких зразків, визначалася їх топологія та проводилося профілювання окремих ділянок поверхні, а отримані результати порівнювалися з результатами дослідження, отримуваними за допомогою базового методу АСМ (рис.11).

АСМ-зображення ділянок поверхні срібних електродів елементів із п'єзокераміки ЦТС-19, що діагностувалися за допомогою розробленої автоматизованої системи контролю (рис.11, а), показали набагато меншу кількість артефактів, пов'язаних з негативним впливом на зонд поверхневих сил взаємодії, на відміну від АСМ-зображень, отриманих за допомогою базового методу АСМ (рис.11, б).

Можливість програмно-апаратного розширення зони проведення досліджень у вертикальній площині з 2 – 3 мкм до 4,5 – 6 мкм дозволяє розширити номенклатуру структурованих поверхонь виробів МСТ, стан та механічні характеристики яких можуть бути визначені та проконтрольовані розробленим методом.

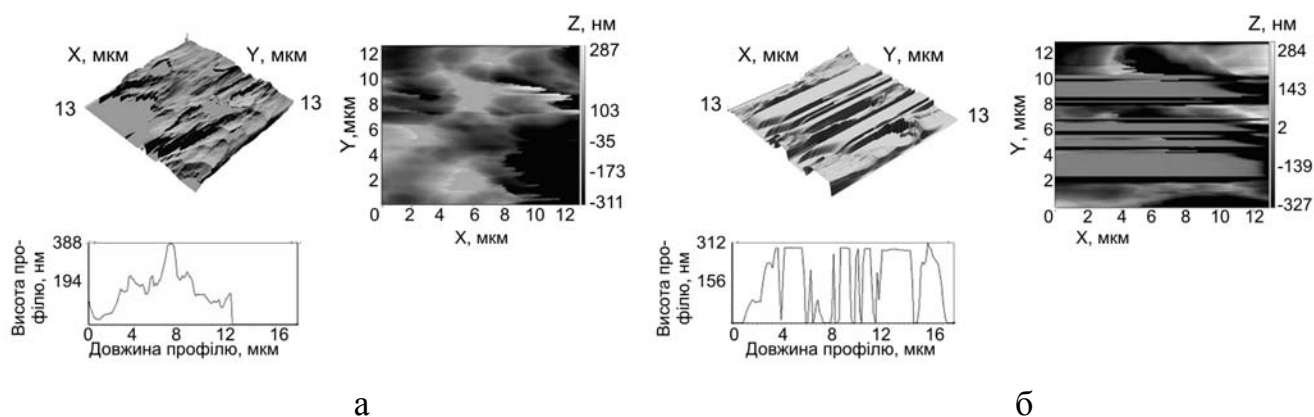


Рис. 11. Діагностування приладних артефактів на ділянці поверхні (13×13 мкм) провідного покриття (Ag) на п'єзоелементі мікроактуатора “АП-Б 1,0/01” (виробник: ТОВ “Аврора-ЭЛМА”, Росія): вгорі – трьохвимірне зображення ділянки поверхні та топограма поверхні; знизу – профіль поверхні ділянки уздовж головної діагоналі. Діагностування проводилося за допомогою розробленої автоматизованої системи контролю (а) та за допомогою базового методу АСМ (б) за однакових умов експерименту

В той же час, при проведенні досліджень із визначення профілю поверхні керамічних елементів датчика мікроакселерометру “Н3LIS331DL” (“STMicroelectronics”, США), окрім розширення зони проведення досліджень у вертикальній площині більш, як у 2 рази, спостерігалось значне покращення якості отримуваних топограм та профілограм (відсутні приладні артефакти та дисторсія поверхні) та зменшення відносної похибки результатів визначення мікрорельєфу поверхні.

В результаті дослідження та аналізу морфології поверхні матеріалів (рис. 12)

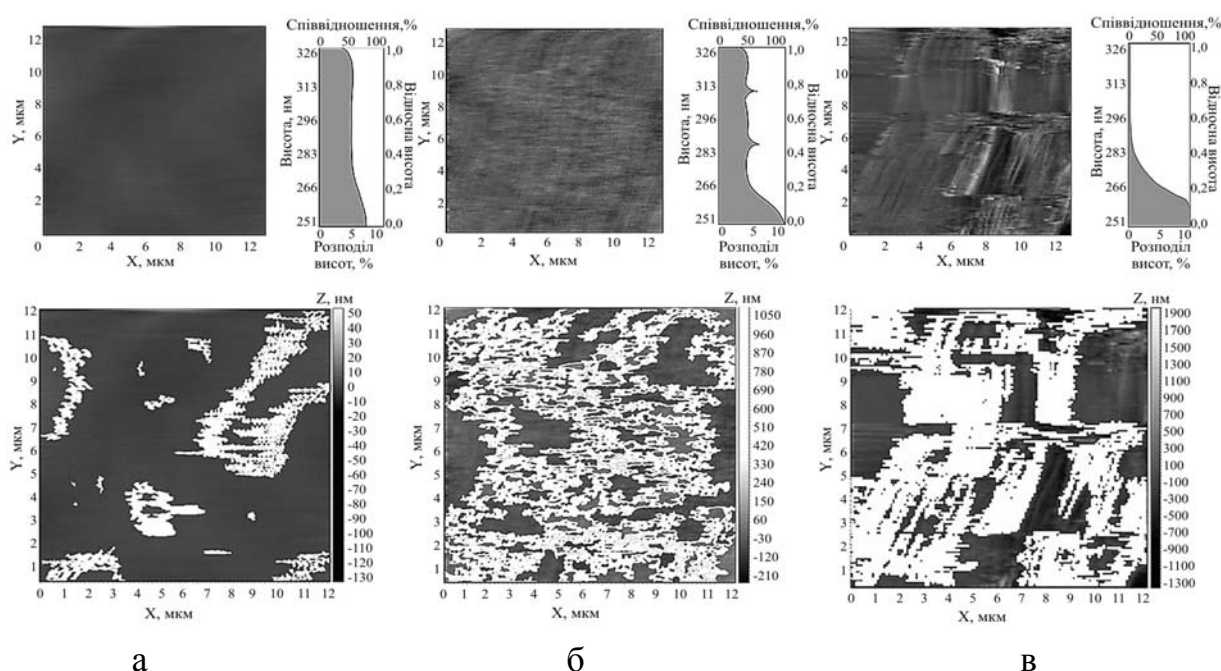


Рис.12. Топограма поверхні та гістограма розподілу нерівностей по кількості для різних висот (верхня частина рисунку), а також динаміка розвитку морфології поверхні (нижня частина рисунку) для кераміки ЦТС-19, що не використовувалася (а), після п'яти (б) та після 10 років використання (в) в лабораторних умовах

встановлено, що на початку експлуатації поверхня була менш розвинутою, з більш однорідною морфологією, з незначною кількістю мікродфектів. Тоді як після п'яти років експлуатації в умовах технологічної лабораторії, а, особливо, після десяти років, поверхня стала більш розвинутою, має менш однорідну морфологію, а кількість мікродфектів збільшилася у 2,5 – 5,5 разів.

Експериментальне визначення на прикладі тонких покриттів механічних характеристик за методиками, запропонованими в даній роботі, дозволило встановити залежності таких характеристик від глибини проникнення зонду (рис.13) та терміну експлуатації цих покриттів (рис.14).

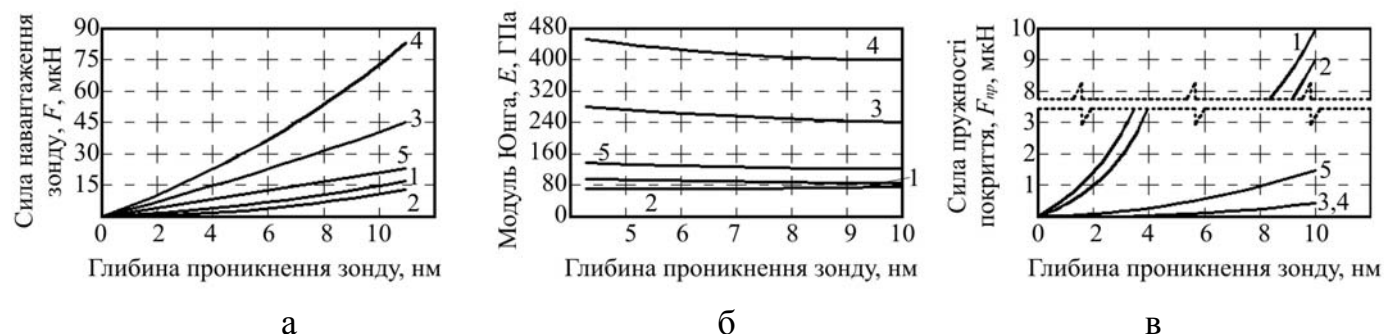


Рис.13. Результати експериментів із визначення модуля Юнга та сили пружності тонких покриттів: а – силові криві, отримані з експерименту; залежність модуля Юнга E зразків (б) та сили пружності тонких покриттів $F_{пр}$ (в) від глибини Δh проникнення зонду в поверхню зразка. Покриття товщиною 20 нм: 1 – Au; 2 – Ag; 3 – HfO₂; 4 – Al₂O₃; 5 – CuO-BaO-La₂O₃

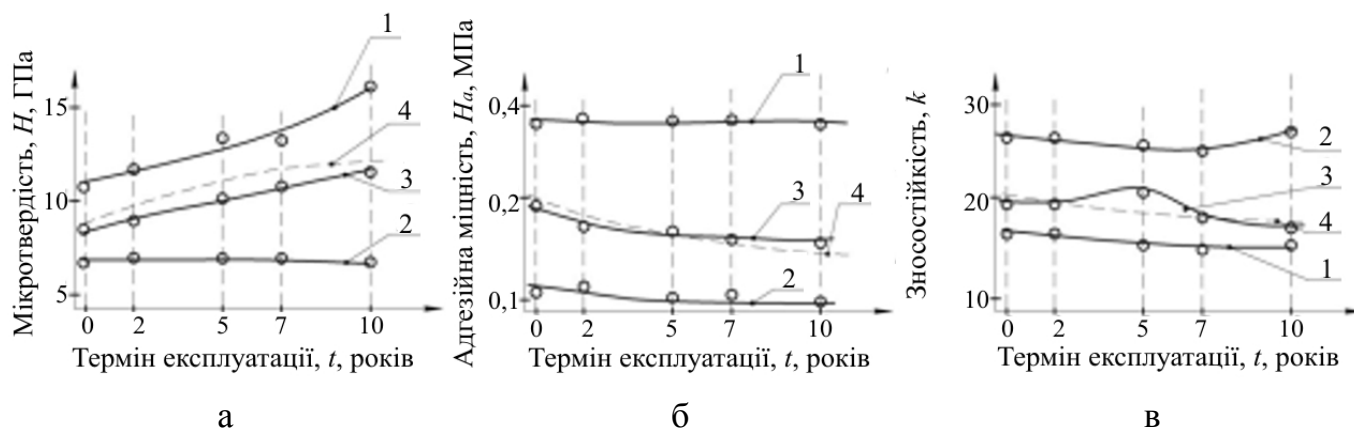


Рис.14. Залежність мікротвердості (а), адгезійної міцності (б) та зносостійкості (в) золотого покриття (товщина 20 нм) на полікристалічній кремнієвій (h-Si) підкладинці елементу мікрогіроскопу “SL720” (виробник: “CSM Ltd”) від терміну його експлуатації за різних режимів проведення експерименту: 1 – $P_{мтв} = 0,55$ мН; $\tau = 9$ с; $P_{скл} = 0,6$ мН; 2 – $P_{мтв} = 0,83$ мН; $\tau = 17$ с; $P_{скл} = 0,8$ мН; 3 – $P_{мтв} = 0,15$ мН; $\tau = 11$ с; $P_{скл} = 0,5$ мН; 4 – залежності отримані альтернативними атестованими методами (а – мікротвердомір “DuroScan-10/20”; б – адгезіометр “AT-101”; в – трибометр “FT2”).

Таким чином, в результаті проведених досліджень та порівняння отриманих результатів з результатами, отриманими альтернативними методами (методами

растрової електронної мікроскопії, трибометрії, мікротвердометрії за Віккерсом тощо), була встановлена висока точність (похибка визначення нанорельєфу та механічних характеристик не перевищує 4,8%) та надійність (ймовірність безвідмовної роботи виміральної системи, не менше 0,95 – 0,98) за умов проведення не менше десяти паралельних дослідів і врахування впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища та раціональних робочих режимів експлуатації.

В роботі представлено перспективні напрямки подальшого розвитку методів та засобів АСМ у точному приладобудуванні, суть яких полягає у використанні нових функціональних можливостей АСМ: визначення товщини, механічних та електрофізичних характеристик тонких покриттів та поверхневого шару, а також характеристик масивних елементів та наноструктур (рис.15).

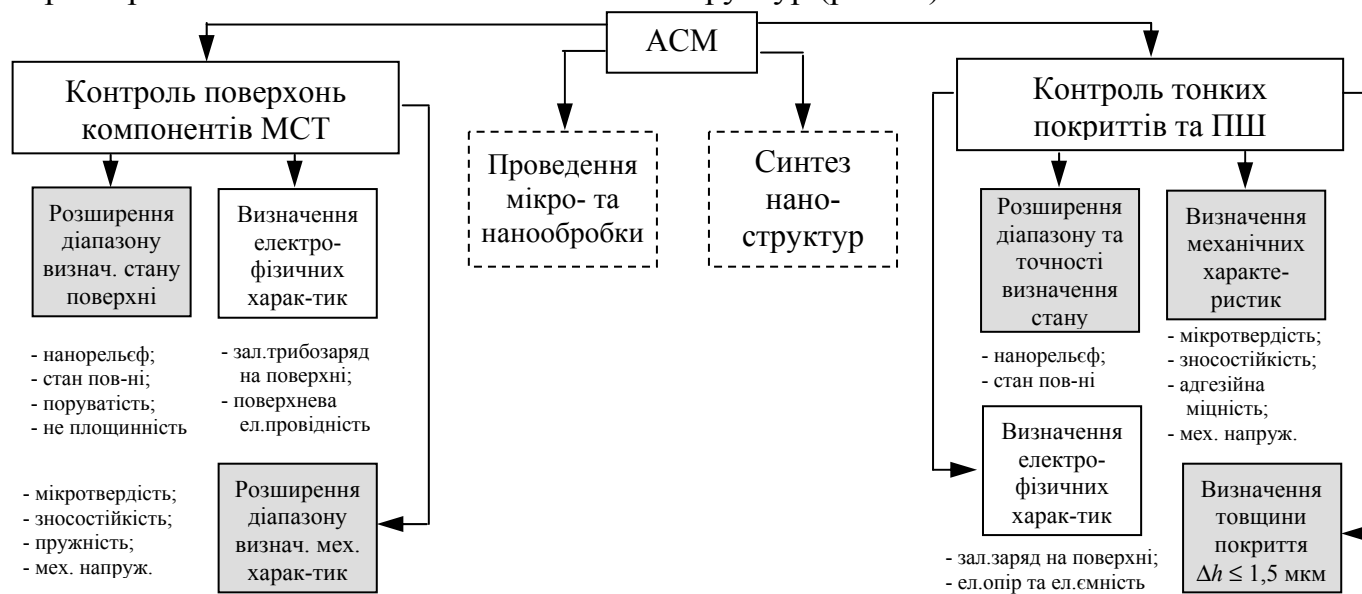


Рис.15. Схематичне зображення розвитку функціональних можливостей методу АСМ

Також встановлене можливе розширення діапазонів функціональних можливостей методу АСМ, що може використовуватися при проведенні комплексного контролю різноманітних об'єктів в нанорозмірному діапазоні.

На основі узагальнення результатів досліджень наводяться практичні рекомендації щодо подальшого використання розробленого науково-обґрунтованого методу покращення метрологічних характеристик методу АСМ та нової системи автоматизації процесу контролю мікрогеометрії та механічних характеристик поверхонь МСТ в промисловості, наукових організаціях та в навчальному процесі закладів вищої освіти України.

У висновках сформульовані основні результати дисертаційного дослідження.

У додатках наведено загальну методику проведення теоретичних та експериментальних досліджень, порядок визначення похибок при контролі характеристик компонентів МСТ, інструкцію по роботі з програмою для обробки інформації з автоматизованої системи контролю, а також наводяться акти про практичне впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена нова науково-технічна проблема удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки шляхом застосування автоматизованих систем вимірювання і контролю цих характеристик з урахуванням дії дестабілізуючих факторів, розроблення математичних та експериментально-статистичних моделей, що в цілому представляє собою наукові основи керування якістю процесу контролю та має практичне значення для галузей мікросистемного та оптико-електромеханічного приладобудування з подальшим їх впровадженням у виробництво, що повністю відповідає поставленій меті.

При виконанні дисертаційної роботи отримані такі наукові результати:

1. Вперше на базі сформульованих теоретичних положень, отриманих закономірностей, розроблених моделей та програмно-апаратних засобів автоматизації процесу контролю, що підтверджені експериментальними дослідженнями, створена наукова методологія удосконалення методів та засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки, що дозволяє покращити точність, підвищити чутливість та відтворюваність результатів контролю з урахуванням дії дестабілізуючих факторів.

2. Розроблено уточнені математичні моделі взаємодії зондів приладів атомно-силової мікроскопії з поверхнями матеріалів на підготовчій, завершальній стадіях та стадії сканування поверхні, шляхом врахування силових та енергетичних складових процесів, що дозволяє встановити лімітуючі фактори такої взаємодії (сили електростатичної, капілярної взаємодії та дисипацію тепла в зоні фізичного контакту зонду з поверхнею), а також з більшою точністю та відтворюваністю (відносна похибка зменшується на 2 – 3,5%, а коефіцієнт варіації – на 2 – 2,4%) визначити діапазони зміни параметрів, що забезпечує стабільну роботу приладів атомно-силової мікроскопії: час механічної релаксації $(4,8 – 6) \cdot 10^{-3}$ с), швидкість (18 – 26 нм/с) та крок (78 – 82 нм) сканування.

3. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі для оцінювання впливу кліматичних факторів та робочих параметрів атомно-силової мікроскопії при застосуванні та довготривалому зберіганні зонду на процес неруйнівного контролю, що дозволяють встановити раціональні діапазони їх зміни: температури (293 К – 299 К), відносної вологості (30% – 70%), концентрації аміаку (до $0,036 \text{ мг/м}^3$) та з'єднань сірки в оточуючій атмосфері (до $0,005 \text{ мг/м}^3$), часу механічної релаксації $(4,5 – 6,6) \cdot 10^{-3}$ с), швидкості (18 – 45 нм/с) та кроку сканування (78 – 85 нм).

4. Встановлені нові закономірності впливу кліматичних факторів на результати контролю геометричних і механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки:

– дотримання температури в зоні вимірювання на рівні 293 К – 299 К і відносної вологості оточуючого середовища в діапазоні значень 30 – 70% зменшує відносну похибку на 8 – 11% та відтворюваність результатів дослідження у 2,1 – 2,4 рази;

– зменшення концентрації аміаку в оточуючій атмосфері до $0,036 \text{ мг/м}^3$ та з'єднань сірки до $0,005 \text{ мг/м}^3$, що дозволяє уникнути корозії срібного покриття системи електродів п'єзочипу та дзеркала системи позиціонування атомно-силового мікроскопу, чим підвищує чутливість методу на 17 – 19%.

5. Вперше визначені діапазони зміни робочих параметрів методу атомно-силової мікроскопії, в межах яких зменшується швидкість корозії поверхні зонду в 1,2 – 3,4 рази, чим підвищується термін його експлуатації у 2,6 – 3,5 рази та ймовірність безвідмовної роботи – на 5 – 10%.

6. Встановлено, що застосування комбінованого електронно-променевого модифікування поверхонь зондів приладів атомно-силової мікроскопії покращує їх експлуатаційні характеристики (мікротвердість, зносостійкість, механічну, хімічну та біологічну стійкість до зовнішніх дестабілізуючих факторів тощо), що дозволяє підвищити ймовірність безвідмовної роботи зондів на 5 – 11% та термін їх експлуатації у 2,6 – 3,5 рази з урахуванням дії дестабілізуючих факторів.

7. Розроблено новий метод підвищення точності, чутливості та відтворюваності процесу неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки на базі розробленого інструментального та програмно-апаратного забезпечення для автоматизації проведення контролю з урахуванням дії дестабілізуючих факторів, застосування якого дозволяє:

– проводити вимірювання і контроль характеристик об'єктів дослідження з похибкою 2,7 – 5,4% та ймовірністю безвідмовної роботи зондів 0,95 – 0,98 шляхом застосування зондів атомно-силових мікроскопів та тест-об'єктів, модифікованих з використанням електронно-променевої мікрообробки;

– керувати робочими параметрами в процесі контролю шляхом застосування систем позиціонування лазерного променя на зонд атомно-силового мікроскопу та видалення залишкового трибоелектричного заряду;

– розширити межі досліджуваної ділянки поверхні (у вертикальній площині в 1,5 – 2,25 рази) та збільшити її деталізацію в 1,6 – 2,1 рази.

8. Отримані наукові результати знайшли застосування на підприємствах України та Республіки Білорусь (підтверджено актами впровадження), що дозволило: зменшити відносну похибку вимірювання у 1,5 – 2 рази; зменшити час проведення контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки в 1,3 – 1,5 рази, збільшити відтворюваність результатів дослідження – у 2,4 рази, термін експлуатації зондів – до 3,5 разів та ймовірність безвідмовної роботи зонду на 5 – 10%, отримати економічний ефект 200 тис. грн. Окремі результати дисертації впроваджені у навчальний процес Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” та Черкаського державного технологічного університету.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] Г. М. Дубровська, Н. І. Божко та М. О. Бондаренко, *Приклади застосування фізичних методів дослідження структури поверхні* (Удоун Офсет Принтерс, Сільхет, 2007), 248 с.

Здобувачем розроблено методикау вивчення мікрогеометрії поверхні композиційних матеріалів методом атомно-силової мікроскопії та представлено матеріали досліджень виконаних за даною методикою.

[2] В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, О. В. Верцанова, Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Білокінь та М. О. Бондаренко, *Мікроскопія в нанотехнологіях* (НТУУ «КПІ», Київ, 2014), 258 с.

Здобувачем розроблено методологію проведення дослідження мікрорельєфу, поверхневих фізико-механічних та техніко-експлуатаційних властивостей матеріалів та нанометричних структур на таких поверхнях, а також їхні оптичні, електричні та феромагнітні властивості з використанням методу АСМ.

[3] В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Білокінь, С. П. Ральченко, В. О. Андрієнко та М. О. Бондаренко, *Контроль параметрів якості функціональних покриттів* (НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, 2018), 396 с.

Здобувачем розроблено та обґрунтовано методики контролю параметрів якості функціональних покриттів методом атомно-силової мікроскопії.

[4] М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко и С. А. Шелестовская, “Исследование состояния поверхности кремниевых зондов для атомно-силовой микроскопии на точность и качество получаемых топограмм”, *Электроника и связь*. **61** (2). 14 – 17 (2011). **(видання включене до міжнародної наукометричної бази даних IndexCopernicus).**

Здобувачем доведена можливість модифікації поверхонь зондів, які пройшли інтенсивну експлуатацію, шляхом осадження на них тонких та ультратонких покриттів з подальшою електронною обробкою.

[5] Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Вплив режимів ультразвукового очищення п’єзоелектричних елементів на якість сформованих на їхніх поверхнях срібних електродів”, *Вісн. Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут”*. **64**. 87 – 90 (2012). **(видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: Index Copernicus, Open Academic Journals Index (OAJI), CiteFactor, WorldCat, BASE, EBSCO та індексується директорією відкритого доступу (DOAJ)).**

Здобувачем проведені експериментальні дослідження процесу ультразвукового очищення поверхонь зразків п’єзоелектричних елементів перед нанесенням на них срібних електродів методом термічного осадження у вакуумі.

[6] В. С. Антонюк, П. О. Фіалковський та М. О. Бондаренко, “Дослідження характеристик біологічних об’єктів методами атомно-силової та растрової електронної мікроскопії”, *Вісн. Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут”*. **47**

(1). 145 – 149 (2014). **(видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: Index Copernicus, BASE, WorldCat, OpenAIRE).**

Здобувачем проведені дослідження морфології та пружних властивостей біологічних об'єктів (на прикладі елемента суглоба) методом АСМ.

[7] М. О. Бондаренко, “Дослідження механічних характеристик елементів приладів точного приладобудування методом атомно-силової мікроскопії”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (2), 21 – 28 (2015). **(видання включене до міжнародної наукометричної бази даних IndexCopernicus).**

[8] В. С. Антонюк, Ю. І. Коваленко, Ю. Ю. Бондаренко та М. О. Бондаренко, “Підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь елементів виробів з оптичного скла мікрообробкою електронним потоком у вакуумі”, Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. **72** (1). 3 – 8 (2015). **(видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: Ulrich's Periodicals Directory, ResearchBib, UIF та індексується директором відкритого доступу (DOAJ)).**

Здобувачем запропоновані оптимальні режими низькоенергетичної електронно-променевої мікрообробки поверхонь оптичного скла К8, що приводить до покращення їх мікротвердості та зносостійкості.

[9] С. Ан. Клименко, С. А. Клименко та М. О. Бондаренко, “Дослідження топографії контактних поверхонь інструментів із ПНТМ на основі КНБ”, Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. **73** (2). 51 – 58 (2015). **(видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: Ulrich's Periodicals Directory, ResearchBib, UIF та індексується директором відкритого доступу (DOAJ)).**

Здобувачем проведено аналіз розподілу мікронерівностей, умовних сил тертя та адгезійної міцності по поверхні різального інструменту.

[10] І. В. Дробот, Т. Ю. Уткіна, М. П. Рудь та М. О. Бондаренко, “Автоматизована система моделювання процесу електронної обробки оптичних матеріалів”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (3), 38 – 41 (2006).

Здобувачем проведені експериментальні дослідження за результатами роботи розробленої в статті автоматизованої системи моделювання електронної обробки.

[11] В. М. Шарапов, А. М. Гуржій та М. О. Бондаренко, “Исследование характеристик токопроводящих электропроводных пьезокерамических элементов”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (спецвипуск), 255 – 257 (2007).

Здобувачем проведені дослідження методом АСМ зміни стану срібних електродів п'єзокерамічних елементів при їх довготривалому зберіганні.

[12] М. О. Бондаренко, “Дослідження впливу низькоенергетичного електронного потоку на мікрогеометрію поверхонь п'єзокерамічних елементів”, Труды Одесского политехнического университета. **32** (2), 149 – 153 (2009).

[13] М. А. Bondarenko, G. V. Kanashevich and H. V. Vertsanova, “Study of forming terms thin diamond similar nanostructures thermal vacuum-depositing”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (спецвипуск), 114 – 116 (2009).

Здобувачем виявлено закономірність в зміні процентного вмісту компонентів в осаджуваному покритті в залежності від складу напилюваного матеріалу, його геометричних характеристик і хімічної чистоти матеріалу.

[14] М. О. Бондаренко, О. В. Котляр та Н. І. Божко, “Мікрогеометрія плівкових композиційних матеріалів на основі $\text{CuO-BaO-La}_2\text{O}_3$ ”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (2), 55 – 58 (2009).

Здобувачем проведено вивчення внутрішнього тертя в отриманих тонких плівках для отримання інформації про внесок міжфазних поверхонь та про вплив матеріалу підложки (SiO_2) на стабільність та рівномірність мікрогеометрії поверхні.

[15] М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко та С. О. Білокінь, “Вивчення умов утворення наноструктур на поверхнях п’єзоелектричних керамік під дією стрічкового електронного потоку”, Вісн. Східноукр. Нац. ун-ту ім. В. Даля. **162** (8). 30 – 34 (2011).

Здобувачем досліджено методом АСМ умови створення наноструктур на поверхні п’єзоелектричної кераміки електронно-променеви́м способом.

[16] С. А. Білоко́нь, М. А. Бондаренко и Ю. Ю. Бондаренко, “Определение адгезионной прочности тонких оксидных покрытий на диэлектрических материалах методом атомно-силовой микроскопии”, Зб. наук. праць “Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології”. **12** (2). 295 – 302 (2014).

Здобувачем визначено адгезійну міцність тонких оксидних покриттів на діелектричних матеріалах із застосуванням методу атомно-силової микроскопії з використанням багатопрохідного сканування зразка.

[17] М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко та В. С. Антонюк, “Перспективи використання методу атомно-силової микроскопії для дослідження стану та фізико-механічних характеристик поверхонь виробів прецизійного машинобудування”, Вісн. нац. ун-ту «Львівська політехніка». (822), 72 – 77 (2015).

Здобувачем встановлені основні напрямки досліджень топограми та фізико-механічних характеристик поверхонь виробів прецизійного машинобудування.

[18] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Дослідження фізичних характеристик діелектричних поверхонь за допомогою діагностичного стенда на базі АСМ”, Вісн. Чернігів. держ. технол. ун-ту. **78** (2), 176 – 181 (2015).

Здобувачем розроблена блок-схема та описана робота стенду та схеми автоматизації процесу вимірювання з використанням методу АСМ.

[19] С. А. Білоко́нь, М. А. Бондаренко и В. С. Антонюк, “Влияние сил адгезии между исследуемой поверхностью и зондом для атомно-силовой микроскопии”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **12** (6). 41 – 45 (2012). URL: <http://www.mashin.ru/eshop/journals/nanoinzheneriya/2012/07/> (іноземне видання).

Здобувачем відпрацьовані робочі режими формування тонких покриттів діоксиду титану на поверхні кремнієвих зондів резистивним методом з їх подальшою електронно-променевою обробкою.

[20] V. S. Antonyuk, M. A. Bondarenko and Yu. Yu. Bondarenko, “Studies of thin wear-resistant carbon coatings and structures formed by thermal evaporation in a vacuum on piezoceramic materials”, Journal of superhard materials. **34** (4). 248 – 255 (2012). URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457612040065> (іноземне видання).

Здобувачем досліджено особливості отримання та вивчено умови формування зносостійких покриттів на п'єзокерамічних матеріалах термовакуумним осадженням.

[21] С. А. Билоконь, О. В. Свиридова, В. С. Антонюк и М. А. Бондаренко, “Повышение точности и срока эксплуатации зондов для атомно-силовой микроскопии”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **19** (1). 10 – 13 (2013). URL: <http://www.mashin.ru/eshop/journals/nanoinzheneriya/2013/18/> (іноземне видання).

Здобувачем вивчено процес підвищення точності та строку надійної експлуатації зондів для АСМ шляхом модифікації їх поверхонь вуглецевими покриттями.

[22] В. С. Антонюк, С. А. Билоконь и М. А. Бондаренко, “Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **33** (3). 13 – 16 (2014). URL: <http://www.mashin.ru/eshop/journals/nanoinzheneriya/2024/3/> (іноземне видання).

Здобувачем вивчена можливість вимірювання микротвердості діелектричних матеріалів кремнієвим зондом АСМ, модифікованим вуглецевим покриттям.

[23] V. S. Antonyuk, S. O. Bilokin and M. O. Bondarenko, “Formation of Wear-Resistant Coatings on Silicon Probes for Atomic Force Microscopy by Thermal Vacuum Evaporation”, Journal of superhard materials. **37** (2), 112 – 119 (2015). URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457615020057> (іноземне видання).

Здобувачем перевірено якість нанесення покриттів та визначені їх микротвердість та зносостійкість.

[24] M. Bondarenko, I. Bondarenko and V. Antoniuk, “Peculiarities of metalized surfaces modification of silicon elements of microelectromechanical systems with low-power electronic flow”, Materials science. Non-equilibrium phase transformations. III (2). 2017, 53 – 55 (2017). URL: <http://stumejournals.com/journals/ms/2017/2/53> (іноземне видання).

Здобувачем показана практична можливість методу атомно-силової микроскопії оцінювати рівномірність тонких металевих покриттів на кремнієвих пластинах після електронної обробки.

[25] М. О. Бондаренко, С. О. Білокін та В.С.Антонюк, “Механізм виникнення та нейтралізація залишкової трибоелектрики при скануванні кремнієвим зондом атомно-силового микроскопу діелектричних поверхонь”, Ж. нано- електрон. фіз. **6** (2), 02018 – 1 (2014).

Здобувачем проведено розрахунок сил електростатичної взаємодії двох кремнієвих поверхонь та запропоновано модуль зняття електростатичного заряду.

[26] В. С. Антонюк, Ю. Ю. Бондаренко та М. О. Бондаренко, “Перспективи використання методу атомно-силової микроскопії при комплексному контролі

елементів приладів точного приладобудування”, Зб. наук. праць “Перспективні технології та прилади”. (5). 5 – 9 (2014).

Здобувачем розроблена технологія модифікування вимірювальних зондів АСМ функціональними покриттями для вимірювання різних фізичних параметрів і експлуатаційних характеристик досліджуваних поверхонь.

[27] В. С. Антонюк, С. О. Білокінь та М. О. Бондаренко, “Спосіб оцінки мікротвердості”, Патент України на корисну модель № 87907 (25 Лютий, 2014).

Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.

[28] С. О. Білокінь, В. С. Антонюк та М. О. Бондаренко, “Спосіб видалення залишкового трибоелектричного заряду”, Патент України на корисну модель № 91425 (10 Липень, 2014).

Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.

[29] С. О. Білокінь, В. С. Антонюк, Ю. І. Коваленко та М. О. Бондаренко, “Спосіб позиціонування лазерного променя на зонд атомно-силового мікроскопу”, Патент України на корисну модель № 91523 (10 Липень, 2014).

Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.

[30] С. О. Білокінь, В. С. Антонюк та М. О. Бондаренко, “Спосіб оцінки зносостійкості тонких покриттів”, Патент України на корисну модель № 117635 (26 Червень, 2017).

Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.

[31] М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко и Г. В. Канашевич, “Исследование поверхностей пьезокерамических элементов, модифицированных электронным потоком методом АСМ”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. VIII Междунар. сем. (Беларуская наука, Минск, 2008), с. 23 – 26.

Здобувачем проведено експериментальне дослідження поверхонь електродів на п’єзоелектричній кераміці методом АСМ.

[32] М. О. Бондаренко, Н. І. Божко та О. В. Котляр, “Вимірювання товщини тонких композиційних покриттів в процесі їхнього осадження у вакуумі”, в: Приладобудування – 2009: стан і перспективи: тези доп. VIII міжнар. наук.-техн. конф. (НТУУ “КПІ”, Київ, 2009), с. 188 – 189.

Здобувачем запропоновано метод вимірювання товщини тонких композиційних покриттів за допомогою кварцового резонатора.

[33] М. А. Бондаренко, М. П. Мусиенко та Ю. Ю. Бондаренко, “Виртуальная лаборатория атомно-силовой микроскопии и нанометрических исследований в современном технологическом университете”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. IX Междунар. сем. (Беларуская наука, Минск, 2010), с. 136 – 141.

Здобувачем розроблена концепція створення віртуальної лабораторії АСМ та нанометричних досліджень в сучасному технологічному закладі вищої освіти.

[34] М. А. Bondarenko, J. J. Bondarenko and S. A. Shelestovskaya, “Research of influence of the state of surface of probes for AFM on exactness and quality of the

topograms”, in: Electronics and nanotechnology ELNANO 2011: thesis XXXI Intern. Scien. Conf. (NTUU “KPI”, Kyiv, 2011), pp. 60.

Здобувачем встановлено граничний термін експлуатації кремнієвих зондів для АСМ та показана можливість часткового відновлення поверхонь зондів, що пройшли інтенсивну експлуатацію.

[35] М. А. Bondarenko, “Necessity of creation of virtual laboratory of physical research of materials”, in: System analysis and information technologies SAIT 2011: thesis Intern. conf. of science and tech. (ESC “IASA” NTUU “KPI”, Kyiv, 2011), pp. 404.

[36] М. А. Бондаренко, С. А. Шелестовская и А. В. Котляр, “Исследование кремниевых зондов атомно-силовых микроскопов, восстановленных комбинированным термовакуумным методом”, в: Растровая электронная микроскопия и аналитические методы исследования твёрдых тел РЭМ-2011: тезисы докл. XVII Рос. симпоз. (Черноголовка, 2011), с. 78 – 79.

Здобувачем проведено аналіз результатів експерименту з електронно-променевої модифікації кремнієвих зондів АСМ, що експлуатувалися, та показана можливість часткового відновлення їх експлуатаційних властивостей.

[37] М. А. Бондаренко, С. А. Шелестовская и Ю. Ю. Бондаренко, “Влияние микротвердости исследуемого материала на эксплуатационную пригодность зондов для АСМ”, в: Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: тезисы докл. XIX междунар. конф. (Киев, 2011), с. 192 – 193.

Здобувачем встановлено вплив мікротвердості досліджуваного матеріалу на експлуатаційну придатність зондів для АСМ.

[38] М. А. Бондаренко, В. А. Андриенко и С. А. Билоконь, “Создание виртуальной лаборатории атомно-силовой микроскопии в технологическом университете”, в: Электронная микроскопия: тез. докл. XXIV Рос. конф. (Черноголовка, 2012), с.210–211.

Здобувачем прийнято участь у розробці та реалізації віртуальної лаб-рії АСМ.

[39] С. А. Билоконь, И. А. Рева и М. А. Бондаренко, “Гидрофильное взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа с диэлектрической поверхностью”, в: Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення та перспективи: тези доп. II Всеукр. наук.-практ. конф. мол. вчен. та студ. (Луцьк, 2012), с. 33 – 35.

Здобувачем розроблена методика визначення сил адгезії при гідрофільній взаємодії зонда АСМ з діелектричною поверхнею.

[40] С. А. Билоконь, И. А. Рева и М. А. Бондаренко, “Математическое моделирование процесса деформации измерительной системы АСМ и расчет допустимых режимов ее работы” в: Методол. аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. X Междунар. конф. (Беларуская навука, Минск, 2012), с. 297 – 301.

Здобувачем проведено аналітичний розрахунок процесу взаємодії зонда з різними поверхнями та показана залежність такої взаємодії від механічних властивостей матеріалу досліджуваного зразка.

[41] М. О. Бондаренко, Ю. І. Коваленко та І. А. Рева, “Оцінка адгезійної міцності на стирання оксидних покриттів на оптичному склі методом АСМ”, в: Приладобудування: тези доп. XII міжнар. наук.-техн. конф. (НТУУ “КПІ”, Київ, 2013), с. 207.

Здобувачем розроблена методика вимірювання сили адгезійної міцності на стирання методом кривих підведення-відведення зонду АСМ до поверхні.

[42] Y. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko and E. V. Vertsanova, “Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology”, in: Physics and tech. of thin films and nanosyst.: thesis XIV Intern. conf. (Ivano-Frankivsk, 2013), pp. 92.

Здобувачем проведені дослідження упорядкованих оксидних структур на поверхнях діелектриків методом РЕМ.

[43] M. Bondarenko, Iu. Bondarenko and S. Bilokin, “Features of study of thin oxide coverages on the elements of microoptics and nanoelectronics by the method of AFM”, in: Electronics and Applied Physics: thesis IX intern. scient. conf. (Kyiv, 2013), pp. 54 – 55.

Здобувачем проведені вимірювання мікротвердості та зносостійкості оксидних покриттів на діелектрику методом АСМ за розробленою методикою склерометрії.

[44] С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко и Ю. Ю. Бондаренко, “Определение адгезионной прочности тонких оксидных покрытий на диэлектрических материалах методом АСМ”, в: Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии НАНСИС-2013: тезисы докл. IV междунар. научн. конф. (НТУУ «КПІ», Киев, 2013), с. 369.

Здобувачем проведено аналіз АСМ-профілів покриття оксиду алюмінію на оптичному склі та визначена адгезійна міцність покриття.

[45] М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко та В. О. Андрієнко, “Корегування точності вимірювання методом атомно-силової мікроскопії нанорозмірних структур утворених на поверхнях функціональних матеріалів”, в: Приладобудування: стан і перспективи: тези доп. XIII міжнар. наук.-техн. конф. (НТУУ «КПІ», Київ, 2014), с.83–84.

Здобувачем визначено час надійної експлуатації зондів АСМ та проведено корегування точності вимірювання наноструктур на функціональних матеріалах.

[46] Ю. И. Коваленко, М. А. Бондаренко и Ю. Ю. Бондаренко, “Измерение микротвердости тонких оксидных покрытий на оптических диэлектриках методом атомно-силовой микроскопии”, в: Электронная микроскопия: тезисы докл. XXV Рос. конф. (Черноголовка, 2014), с. 308 – 309.

Здобувачем показана можливість проведення досліджень методом АСМ мікротвердості тонких оксидних покриттів, сформованих на оптичному діелектрику за різних режимів та при різних умовах.

[47] С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко и В. А. Андриенко, “Минимизация влияния капиллярных сил при исследовании поверхностей изделий наноэлектроники в контактном режиме атомно-силового микроскопа”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. XI Междунар. конф. (Беларуская навука, Минск, 2014), с. 164 – 168.

Здобувачем визначені оптимальні режими сканування поверхонь виробів наноелектроніки методом АСМ.

[48] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та В. С. Антонюк, “Керування змочуваністю зондів атомно-силового мікроскопу для біологічних досліджень”, в: Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів: матер. XIII міжнар. наук.-техн. конф. (КрНУ, Кременчук, 2014), с. 89 – 90.

Здобувачем доведена можливість використання методу АСМ для маніпулювання біологічними об’єктами.

[49] М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко та С. О. Білокінь, “Діагностичний стенд для вимірювання фізичних характеристик поверхні на базі АСМ”, в: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС-2015): тези доп. V міжнар. наук.-практ. конф. (ЧНТУ, Чернігів, 2015), с. 214 – 215.

Здобувачем розроблено діагностичний стенд та досліджено його роботу для вимірювання фізичних характеристик поверхні матеріалів.

[50] В. С. Антонюк, М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Склерометрична оцінка зносостійкості тонких покриттів методом АСМ”, в: Інженерія поверхності и реновация изделий: тез. докл. XV Междунар. науч.-техн. конф. (Київ, 2015), с.17–19.

Здобувачем розроблена методика склерометричної оцінки зносостійкості тонких покриттів методом АСМ.

[51] I. Yatsenko, V. Antoniuk and M. Bondarenko, “Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making”, in: Innovations in ingeneering: Intern. scien.-tech. conf. (Burgas, Bulgaria, 2015), pp. 64 – 66.

Здобувачем проведено аналіз методом АСМ оптичних поверхонь до та після електронно-променевої обробки.

[52] М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Автоматизований комплекс для нанометричних досліджень”, в: Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2016): тези доп. наук.-техн. конф. (СумДУ, Суми, 2016), с. 200.

Здобувачем запропонована ідея та прийнято участь у практичній реалізації автоматизованого комплексу для нанометричних досліджень.

[53] M. Bondarenko and I. Bondarenko, “Power supply method of micro- and nanosystem engineering devices”, in: Energy Challenges & Mechanics: 6th Intern. Symp. (Inverness, 2016), pp. 245 – 246.

Здобувачем експериментально обґрунтовано спосіб перетворення механічної енергії в електричну та показана можливість побудови на цьому способі пристроїв для мікро- та наносистемної техніки..

[54] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та В. С. Антонюк, “Автоматизація досліджень за допомогою АСМ”, в: Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: тезисы докл. 16 Межд. науч.-практ. конф. (АТМ України, Київ, 2016), с. 214 – 216.

Здобувачем запропоновано алгоритм автоматизації процесу дослідження механічних характеристик матеріалів методом АСМ.

[55] М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко и С. А. Билоконь, “Энергетический теплообмен в зоне контакта зонда атомно-силового микроскопа с исследуемой поверхностью”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. XII Междунар. конф. (Беларуская навука, Минск, 2016), с. 235 – 241.

Здобувачем проведено математичне моделювання процесу нагріву окремих елементів вимірювального блоку АСМ; складена та досліджена еквівалентна теплова схема АСМ, що доводить адекватність розроблюваних математичних моделей.

[56] Ю. Ю. Бондаренко, М. О. Бондаренко и С. О. Білокінь, “Підвищення терміну експлуатації зондів атомно-силового микроскопу”, в: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017): тези доп. VII міжнар. наук.-практ. конф. (ЧНТУ, Чернігів, 2017), с. 97 – 99.

Здобувачем були отримані результати дослідження мікрогеометричних параметрів оптичних елементів модифікованими та не модифікованими кремнієвими зондами АСМ та виконано їх порівняння.

[57] М. А. Бондаренко, К. В. Базило, Ю. Ю. Бондаренко и В. В. Медяник, “Изучение микроэлектромеханических пьезоэлектрических структур методом атомно-силовой микроскопии”, в: Датчики, прилады та системи – 2017: тези доп. VI Міжнар. науково-техн. конф. (ФОП Чабаненко А.Ю., Черкаси, 2017), с. 45 – 48.

Здобувачем розроблена методика визначення механічних характеристик при дослідженні методом АСМ поверхонь мікроелектромеханічних п'єзоструктур.

[58] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та В. О. Андрієнко, “Преваги використання методу атомно-силової микроскопії в діагностиці нанооб'єктів та систем”, в: Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018): тези доп. X міжнар. наук.-практ. конф. (НАУ, Київ, 2018), с. 100 – 102.

Здобувачем запропонована технологія модифікування вимірювальних зондів АСМ функціональними покриттями, що дозволяє проводити вимірювання різних фізичних параметрів та експлуатаційних характеристик нанооб'єктів та їх систем.

[59] I. I. Bondarenko, V. V. Medianyuk, M. A. Bondarenko and V. S. Titarenko, “Investigation of Ordered Structures Formed on the Surface of Piezoceramic Elements”, в: Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2018): тези доп. наук.-техн. конф. (СумДУ, Суми, 2018), с. 86.

Здобувачем проведені експериментальні дослідження методом АСМ наноструктур, утворених на поверхнях п'єзоелектричних керамік.

Анотація

Бондаренко М. О. Розвиток методів та засобів атомно-силової микроскопії для неруйнівного контролю характеристик компонентів мікросистемної техніки. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. –

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України, Київ, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки шляхом застосування автоматизованих систем вимірювання і контролю цих характеристик з урахуванням дії дестабілізуючих факторів, розроблення математичних та експериментально-статистичних моделей, що в цілому представляє собою наукові основи керування якістю процесу контролю на основі методу атомно-силової мікроскопії та дозволяє зменшити відносну похибку на 8 – 11%, збільшити чутливість методу на 17 – 19% та відтворюваність результатів контролю у 2,1 – 2,4 рази, а також збільшити термін експлуатації зонду у 2,6 – 3,5 рази, ймовірність його безвідмовної роботи – на 5 – 10%, зменшити в 1,2 – 3,4 рази швидкість ерозії поверхні, а також визначити діапазон робочих параметрів сканування, що забезпечують стабільну роботу атомно-силового мікроскопу.

Ключові слова: неруйнівний контроль, атомно-силова мікроскопія, кліматичні фактори, робочі параметри, мікросистемна техніка, точність, чутливість, відтворюваність.

Аннотація

Бондаренко М. А. **Развитие методов и средств атомно-силовой микроскопии для неразрушающего контроля характеристик компонентов микросистемной техники.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и средства контроля и определения состава вещества. – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского” Министерства образования и науки Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы усовершенствования существующих и создания новых методов и средств атомно-силового микроскопии для неразрушающего контроля геометрических и механических характеристик компонентов микросистемной техники путем применения автоматизированных систем измерения и контроля этих характеристик с учетом действия дестабилизирующих факторов, разработки математических и экспериментально-статистических моделей, что в целом представляет собой научные основы управления качеством процесса контроля на основе метода атомно-силового микроскопии и позволяет уменьшить относительную погрешность на 8 – 11%, увеличить чувствительность метода на 17 – 19% и воспроизводимость результатов контроля в 2,1 – 2,4 раза, а также увеличить срок эксплуатации зонда в 2,6 – 3,5 раза, вероятность его безотказной работы – на 5 – 10%, уменьшить в 1,2 – 3,4 раза скорость

эрозии поверхности, а также определить диапазон рабочих параметров сканирования, обеспечивающих стабильную работу атомно-силового микроскопа.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, атомно-силовая микроскопия, климатические факторы, рабочие параметры, микросистемная техника, точность, чувствительность, воспроизводимость.

Summary

Bondarenko M. O. **Development of methods and means of atomic force microscopy for non-destructive testing of the characteristics of the components of microsystem technology.** – As a manuscript.

The dissertation for the degree of doctor of technical sciences on specialty 05.11.13 – Devices and methods of control and composition of substance. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The rapid development of devices of microsystem equipment (MST), observable recently, has undoubted advantages of these devices (miniature, high functionality, manufacturability, reliability, low power consumption, etc.). However, high requirements to the geometric and mechanical characteristics of MST devices in their manufacture and operation require the use of highly effective and rapid control methods, among which the atomic-force microscopy (AFM) method is promising.

At the same time, despite the advantages of the AFM method, its practical application in checkup the geometry and mechanical characteristics of materials is limited to a number of problems that have not been solved so far: the lack of data on the physical regularities of the influence of external conditions and control regimes on the metrological characteristics of the AFM method; insufficient comprehension of the processes of force and energy interaction of AFM probes with surfaces; lack of tools for all-inclusive research and so on.

Therefore, the dissertation is devoted to solving an important scientific and technical problem improvement of existing and creation of new methods and means of atomic-force microscopy for non-destructive testing of the geometric and mechanical characteristics of the components of the microsystem technology through the use of automated systems for measuring and controlling these characteristics with regard to the action of destabilizing factors, development of mathematical and experimental statistical models, which generally represents the scientific basis for managing the quality of the monitoring process based on the atomic force microscopy method and is of practical importance for the microsystem and optical-electromechanical instrument-making industries with their subsequent introduction into production.

To solve the problem of dissertational research, scientifically based methodology has been created to improve the methods and means of atomic force microscopy for non-destructive testing of the geometric and mechanical characteristics of the components of microsystem engineering through the development of mathematical and experimental statistical models, the use of methodological, technical and software tools to automate the

process of controlling these characteristics allows to improve the accuracy, increase the sensitivity and reproducibility of the results of the control, taking into account the actions of destabilizing factors.

Refined physical and mathematical models of the force and energy interaction of AFM probes with material surfaces minimized the limiting factors (capillary forces, electrostatic interaction forces, heat dissipation in the zone of the probe's physical contact with the surface). This reduced the relative error of measurement by 8 to 11%, increased the sensitivity of the method by 17 to 19%, and the convergence of the results of the study in 2,1 – 2,4 times. The range of scanning operating parameters (speed (18 – 26) nm / s, mechanical relaxation time $(4,8 - 6) \cdot 10^{-3}$ s, step (78 – 82 nm) was also determined, which ensures stable operation of the AFM during the measurement.

New experimental statistical models were proposed in the paper. This made it possible to estimate the influence of climatic factors (temperature, relative humidity, ammonia content, corrosion active sulfur compounds) on high accuracy (the discrepancy between the calculated and experimental data during ten parallel experiments does not exceed 4,8%) on metrological characteristics of the AFM method. The results obtained in the model allowed to increase the period of reliable operation of the probe by 30 – 40% and to reduce the rate of erosion of its surface by 1,2 – 3,4 times.

A new method has been developed to improve the accuracy, sensitivity and reproducibility of the process of non-destructive testing of the geometric and mechanical characteristics of components of microsystem engineering based on the developed tool and software and hardware for automating the monitoring, taking into account the effect of destabilizing factors, the use of which allows:

- to measure and control the characteristics of the objects of study with an error of 2,7 – 5,4% and the probability of failure-free operation of the probes 0,95 – 0,98 by using probes from atomic force microscopes and test objects modified using electron-beam micromachining;

- control the operating parameters in the control process by applying laser beam positioning systems to an atomic force microscope probe and removing residual triboelectric charge;

- expand the boundaries of the investigated surface area (in the vertical plane 1,5 – 2,25 times) and increase its detailing 1,6 – 2,1 times.

The results of the research were tested and found practical application in domestic and foreign enterprises (confirmed by the acts of implementation), and also used in the educational process of institutions of higher education in Ukraine.

Keywords: non-destructive control, atomic-force microscopy, climatic factors, operation parameters, microsystem technology, accuracy, sensitivity, reproducibility.