

**М. О. Бондаренко**, к.т.н., доцент  
Черкаський державний технологічний університет  
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна  
[maxxium@ukr.net](mailto:maxxium@ukr.net)

### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ ПРИЛАДІВ ТОЧНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

*Показано можливість проведення комплексного дослідження таких механічних характеристик елементів точного приладобудування, як: мікротвердості, зносостійкості та адгезійної міцності поверхневого шару в одному циклі вимірювання із залученням методу атомно-силової мікроскопії. Встановлено, що таке комплексне дослідження дозволяє скоротити час вимірювання механічних характеристик у 1,7-2,5 рази, а також підвищити точність отримуваних результатів у 2,4-4 рази за рахунок врахування навалів, що утворилися внаслідок наноінденування та склерометричних досліджень, а також часу релаксаційного відновлення матеріалу поверхні в місці проникнення зонду атомно-силового мікроскопа в поверхню.*

**Ключові слова:** атомно-силова мікроскопія, точне приладобудування, наноінденування, склерометрія, адгезійна міцність.

**Актуальність наукового дослідження.** Розвиток технологій виготовлення елементів пристроїв точної механіки, що знаходять широке застосування як для наукових досліджень, так і на практиці у точному приладобудуванні, спрямований у бік мініатюризації таких пристроїв аж до нанометричних розмірів. При цьому основною вимогою до цих технологій залишається дотримання високої ефективності і надійності виробів, що виготовляються. Проте реалізація цього завдання неможлива без сучасних засобів і методів дослідження мікрогеометрії та фізико-механічних характеристик їх поверхонь.

Як показують результати аналізу, проведеного автором [1–3], досі відсутні достатній науковий доробок теоретичних та метрологічних основ, а також достатня кількість експериментальних результатів, які дозволили б запропонувати універсальний неруйнівний метод дослідження стану поверхні та її фізико-механічних характеристик, що мав би високу точність вимірювання і контролю цих параметрів і в той же час володів високою продуктивністю та оперативністю вимірювання. Незважаючи на певні успіхи в розробленні теоретичних основ вимірювання на нанометричному рівні різноманітних характеристик елементів точного приладобудування, загальний методологічний підхід до проведення таких досліджень на сьогодні відсутній. Розробка та реалізація такого підходу забезпечували б мінімальну похибку при виникненні різноманітних

стохастичних і змінних у часі факторів та збурень, що, як правило, є випадковими функціями часу.

Серед існуючих методів дослідження поверхні найбільш перспективним є метод атомно-силової мікроскопії (АСМ), який не вимагає спеціальної підготовки досліджуваного зразка. При цьому, сам метод є неруйнівним, має високу точність (до одиниць ангстрема) та чутливість дослідження (десятки наноньютонів). Незважаючи на те, що основним призначенням атомно-силового мікроскопа є дослідження нанопрофілю та топографії поверхні, цей метод також може використовуватися при дослідженні різних фізико-механічних характеристик поверхонь різноманітних за своєю природою матеріалів на нанорівні [4–6].

Деякі питання проведення комплексних нанометричних досліджень, які здійснюються на базі АСМ для різних умов застосування, опрацьовані рядом вітчизняних та закордонних вчених, як-то: Свірідовою О. В., Снежком Д. В., Рожицьким Н. Н., Биковим В. А., Чижиком С. А., Міроновим В. Л., Сусловим А. А., Толстіхіною А. Л., Кузнецовою Т. А., Занавескіним М. Л. та іншими. Проте залишаються невирішеними ряд проблем щодо високоточного, ефективного та оперативного дослідження механічних характеристик елементів приладів точного приладобудування із залученням методу АСМ. Однією з таких проблем є відсутність

універсальної методики для проведення комплексного дослідження стану поверхні з наступним визначенням основних фізико-механічних характеристик виробів точного приладобудування.

Основна проблема активного застосування цього підходу для дослідження механічних характеристик діелектричних матеріалів полягає в необхідності правильного вибору зонду для АСМ. Зазвичай для сканування зразка використовують кремнієвий зонд, а для наноідентування – алмазний. Для сканування та ідентування в одному циклі не підходить жоден з них, оскільки кремнієвий зонд занадто крихкий для проведення наноідентування, а застосування алмазного зонду для сканування діелектричних матеріалів не є раціональним через його високу вартість та високу твердість, що призводить до руйнування м'яких зразків і, як результат, до спотворення результатів сканування.

Найбільш перспективним підходом у вирішенні цього питання є застосування модифікованих вуглецевим функціональним покриттям кремнієвих зондів для сканування ними твердих матеріалів у контактному режимі [7].

Тому дослідження поверхневих механічних характеристик поверхонь виробів точного приладобудування із застосуванням методу атомно-силової мікроскопії в комплексі та в одному циклі сканування є актуальним.

**Метою роботи** є розробка та експериментальне підтвердження методики комплексного дослідження мікротвердості, зносостійкості та адгезійної міцності елементів точного приладобудування методом атомно-силової мікроскопії, що дозволяє підвищити оперативність та точність вимірювань механічних характеристик.

**Порядок проведення експерименту.** Дослідження стану та фізико-механічних характеристик поверхонь зразків проводилися на приладі «NT-206V» (ТДВ «Мікротестмашина», Білорусь) із застосуванням кремнієвих зондів «Ultrasharp CSC12» («Mikromasch», Німеччина), модифікованих вуглецевим покриттям товщиною 8 нм. При цьому для підвищення достовірності отримуваних результатів дослідження стану та фізико-механічних характеристик проводилися не менш ніж на п'яти ділянках площею  $13 \times 13$  мкм по поверхні кожного із зразків.

Об'єктами дослідження є ділянки механічних наноконтактів із золота (покриття тов-

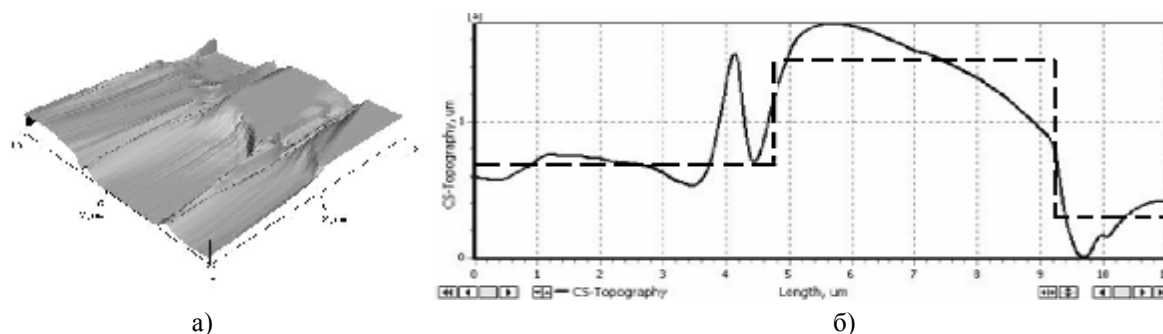
щиною 500 нм, отримане методом гальванізації на керамічному валу струмозмінального ротора гіроскопу) і керамічного корпусу мікрогіроскопів, що знаходять широке застосування в сучасній робототехніці як елементи приладів навігаційних систем. Ці об'єкти у вигляді попередньо підготовлених зразків відносилися до приладів, які не знаходились в експлуатації.

Вибір необхідної ділянки на поверхні зразка здійснювався системою мікропозиціонування і вбудованим оптичним довгофокусним мікроскопом Logitech («Logitech Inc», США). Після ультразвукового очищення зразка дослідження в етиловому спирті його базували на магнітному предметному столику. Застосування вбудованого довгофокусного мікроскопа та системи мікропозиціонування дозволило з точністю до 2,5 мкм визначити ділянку елемента, поверхня якої досліджувалася. Як робочий був обраний статичний режим роботи АСМ, який має меншу точність порівняно з динамічним режимом, проте дозволяє досліджувати саму поверхню зразка, ігноруючи наявність на ній вологи і залишків органічних речовин (спирту, жирних кислот тощо).

Для підвищення точності і відтворюваності результатів дослідження всі вимірювання проводилися на 5...6 зразках одного типу.

Після завершення процесу вимірювання за допомогою системи мікропозиціонування здійснювався переїзд вимірювальної головки на наступну ділянку. Результати вимірювань заносилися в пам'ять персонального комп'ютера, який входить до складу діагностичного комплексу атомно-силової мікроскопії, з метою подальшої візуалізації, дослідження та аналізу.

**Обговорення результатів експерименту.** Дослідження наногеометрії поверхні – найбільш затребуваний метод АСМ. Разом з високою роздільною здатністю він дозволяє відобразити мікрорельєф поверхні з точністю по висоті близько 0,1-0,2 нм (рис. 1). Серед обмежень методу АСМ в дослідженні топології поверхні слід зазначити високу чутливість методу до змін фізичних параметрів досліджуваного зразка: його хімічного складу, твердості, адгезії, що утруднює отримання та інтерпретацію даних топографії для ряду матеріалів. Ще одна проблема, яка обмежує використання цього методу, – низька повторюваність вимірювань у результаті швидкої зношуваності зонду.



**Рис. 1. Тривимірне АСМ-зображення (а) та профілограма поверхні (б) механічних наноконтактів із золота, сформованих на поверхні струмознімального елемента мікрогіроскопа. Штрих-лінією позначено теоретичний профіль поверхні**

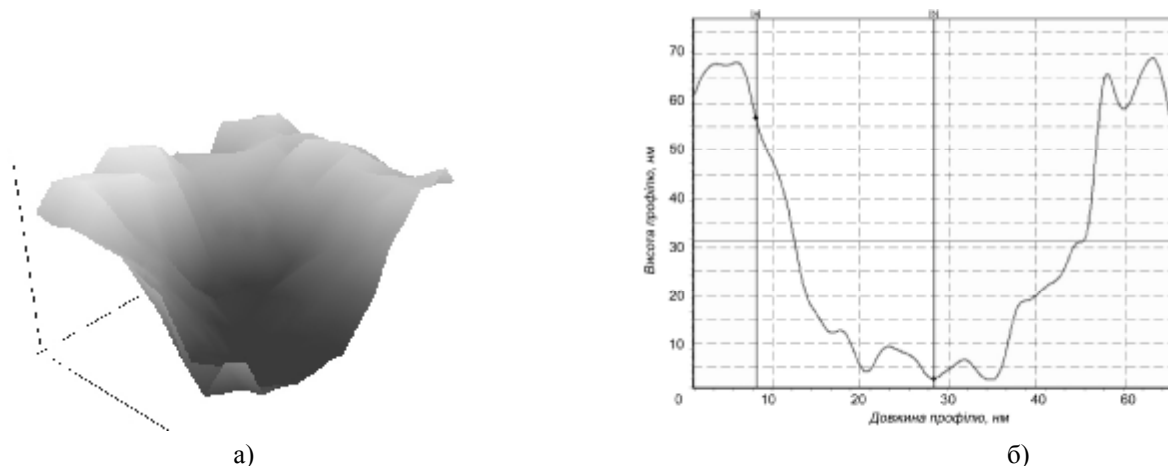
Як можна побачити з профілографи механічного наноконтакту, яка наведена на рис. 1, профіль, отриманий за допомогою АСМ (суцільна лінія), майже повністю відповідає теоретичному профілю поверхні на границі цього контакту (відхилення між реальним та теоретичним профілями не перевищує 5-8 %).

Проте слід звернути увагу на таку, не вирішену досі проблему, як неточність і «тремор» зображення поверхні при скануванні ділянок, менших 1 нм, що пов'язано з температурним дрейфом, мікровібрацією довкілля і механічною інерцією самої системи. Вирішення такої проблеми може полягати у виборі оптимальних режимів та умов проведення сканування, а також у дотриманні вимог до навколишнього середовища та підготовки зразків при проведенні експерименту.

Іншою проблемою, яка має місце при нанометричних вимірюваннях, є наявність артефактів сканування на результатах дослідження. Найчастіше такі артефакти представляються на топограмах та профілографах сканування у вигляді виколів або глибоких та

вузьких тріщин і є наслідками дії зовнішніх чинників у процесі сканування (вібрації, звукові збурення, температурні флуктуації тощо). Особливістю останнього артефакту є його суворя орієнтація вздовж осі сканування ОХ. Усунення проблеми артефактів, як правило, полягає у застосуванні спеціальних демпферних пристроїв. Ще одним із надійних заходів позбавлення від артефактів сканування є розташування діагностичного обладнання (як безпосередньо пристрою сканування АСМ, так і блоків керування) на нижніх поверхнях будівель (в ідеалізованому випадку – на цокольних поверхнях) шляхом прикріплення до стіни в спеціальному захисному корпусі.

Серед методик проведення механічних вимірювань слід виділити метод наноідентування як такий, що з досить високою точністю дозволяє отримувати інформацію про мікротвердість окремих нанометричних ділянок досліджуваної поверхні. Наноідентування проводиться шляхом аналізу механічного відгуку поверхні зразка на втискування наноідентора АСМ (рис. 2).



**Рис. 2. Зовнішній вигляд ділянки поверхні золотого покриття на керамічному корпусі гіроскопа з відбитком наноідентора, отриманим методом АСМ (а), і профіль відбитка АСМ-наноідентора (б)**

Процес проникнення індентора АСМ в досліджувану поверхню полягає в наступному. При зростанні сили вдавлювання індентора до значень  $P = 700 \dots 800$  мкН змінюється тип деформації поверхні зразка від пружної до пластичної. Межі між пружною і пластичною деформаціями залежать від радіуса вістря індентора, природи матеріалу та від величини навантаження. Значення мікротвердості досліджуваного матеріалу при цьому визначається за формулою

$$H = \frac{F_{max}}{k \cdot A_c},$$

де  $F_{max}$  – максимальне навантаження на зонд при індентуванні;  $A_c$  – площа проекції контакту між зондом і поверхнею досліджуваного матеріалу;  $k$  – коефіцієнт, що враховує форму індентора.

Для контролю похибки вимірювання мікротвердості за цим методом проводиться контрольне вимірювання зразка, що має стабільне значення мікротвердості (як контрольний зразок використовують плавлений кварц). Порівняння отриманих результатів дослідження здійснюється з довідковими даними або з даними, отриманими атестованим методом. У розробленій методиці як атестований метод використовується метод мікроіндентування Вікерса із застосуванням алмазної пірамідки на приладі DuroScan-10/20 (Центр колективного користування ТОВ «Мелітек-Україна»).

За допомогою методу наноіндентування можна визначити не лише нанотвердість поверхні, але й модуль її пружності. При цьому похибка визначення цих параметрів не перевищує 10 %, що є досить високим значенням при визначенні модуля Юнга. Так, отримані значення мікротвердості для тонкого покриття Au становили  $37 \pm 2$  кгс/мм<sup>2</sup>, що відповідає даним, отриманим методом мікроіндентування за Вікерсом ( $36,2$  кгс/мм<sup>2</sup>).

Оцінювання зносостійкості поверхні зразка методом АСМ здійснюється шляхом дряпання цієї поверхні індентором з подальшим скануванням зони деформації (похибка визначення точності не перевищує 18 %).

Після підготовки зразків та налаштування АСМ проводиться сканування досліджуваних поверхонь для вибору місця проведення трибологічного дослідження. Далі, обравши режим роботи приладу «Трибологічна лінія», визначається лінія проведення дослідження – однорідна поверхня без включень і різких перепадів рельєфу. При цьому слід задавати зростаюче навантаження (0,3-1 мН), час навантаження (1,5-6 мс) і кількість трибологічних ліній (треків) – від 3 до 5.

За залежністю сили від глибини проникнення зонда, виведеною на екран, оцінюються механічні характеристики досліджуваних поверхонь. Після цього сканується місце проведення трибологічної лінії, внаслідок чого визначається об'єм вдавненого матеріалу та об'єм матеріалу, зміщеного в навали деформації по межах лінії (рис. 3).

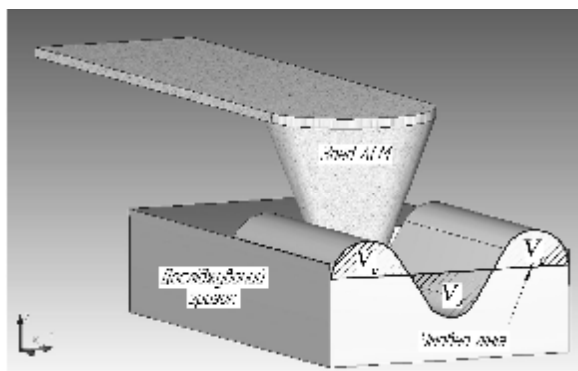


Рис. 3. Схема визначення умовного коефіцієнта зносостійкості методом склерометрії за допомогою АСМ

Результатом обчислення зносостійкості при постійному нормальному навантаженні на індентор служить показник, обернено пропорційний повному об'єму  $V_0$  деформованого індентором матеріалу:

$$k = \frac{V_0}{V_a} = \frac{V_0}{V_0 + V_a},$$

де  $V_a$  – об'єм вдавненого матеріалу, що дорівнює  $V_a = S_a^{н0} L$ ;  $S_a^{ср}$  – середня площа перерізу

видавненого матеріалу в  $n$  перерізах, перпендикулярних напрямку лінії;  $L$  – контрольна довжина лінії;  $V_c$  – об'єм матеріалу, зміщеного в бугри деформації по межах лінії, що дорівнює  $V_c = S_c^{об} L$ ;  $S_c^{сеп}$  – середня площа перерізу зміщеного матеріалу в  $n$  перерізах, перпендикулярних напрямку лінії;  $V_0 = 10^{-3}$  – еталонний об'єм матеріалу, введений для отримання безрозмірності показника  $k$ :

$$k = \frac{V_0}{V_a} = \frac{V_0}{V_a + V_c}.$$

Таким чином, були досліджені тонкі золоті покриття (150 нм) на керамічній основі з використанням кремнієвих зондів при навантаженні зонда-наноіндентора на поверхню  $5 \cdot 10^{-4}$  Н (рис. 4).

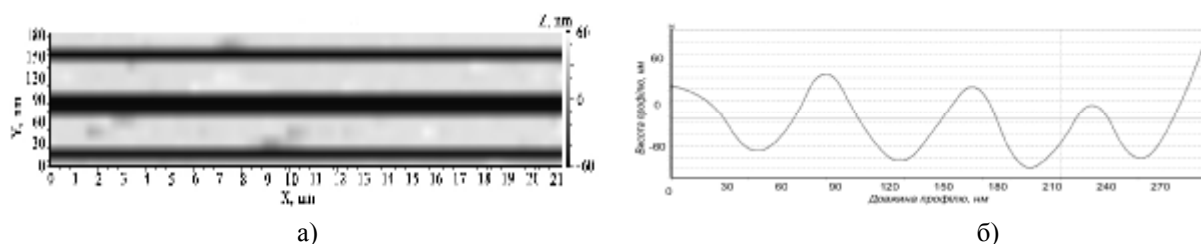


Рис. 4. АСМ-зображення (а) та топограма (б) результату склерометрії поверхні ротора мікрогіроскопа з тонким покриттям золота (товщина 150 нм)

При цьому, довжина треку становила 36 мкм, а середні площі перерізу, відповідно, видавленого та зміщеного матеріалу:  $S_e^{сеп} = 85 \text{ нм}^2$ ,  $S_c^{сеп} = 118 \text{ нм}^2$ . За результатами склерометрії (рис. 4) бачимо, що поверхня досліджуваних зразків мала високу однорідність та високу стійкість до дряпання, а умовний коефіцієнт зносостійкості (тобто відношення зношуваності матеріалу, що контактує з даною поверхнею, до зношуваності самої поверхні) становив 0,28-0,32 (за 1,0 приймається зносостійкість алмазу), що відповідає високим значенням зносостійкості для золотих покриттів (похибка визначення не перевищує 3-5 %).

За результатами дослідження зроблено висновок про практичну можливість якісного оцінювання за критерієм зносостійкості тонких покриттів на різноманітних матеріалах із

залученням методики склерометрії методом атомно-силової мікроскопії.

Визначення адгезійної міцності тонких оксидних покриттів на діелектричних матеріалах із застосуванням методу атомно-силової мікроскопії полягає у багатопрхідному скануванні зразка з поступовим впровадженням зонду атомно-силового мікроскопа в досліджувану поверхню. При цьому крок впровадження зонду контролюється оператором атомно-силового мікроскопа і, залежно від товщини покриття, становить 1-10 нм.

Аналізуючи серію отриманих профілів при скануванні золотого покриття на кераміці (рис. 5), можна не лише кількісно визначити адгезійну міцність покриття, але й оцінити її зміну зі збільшенням товщини покриття.

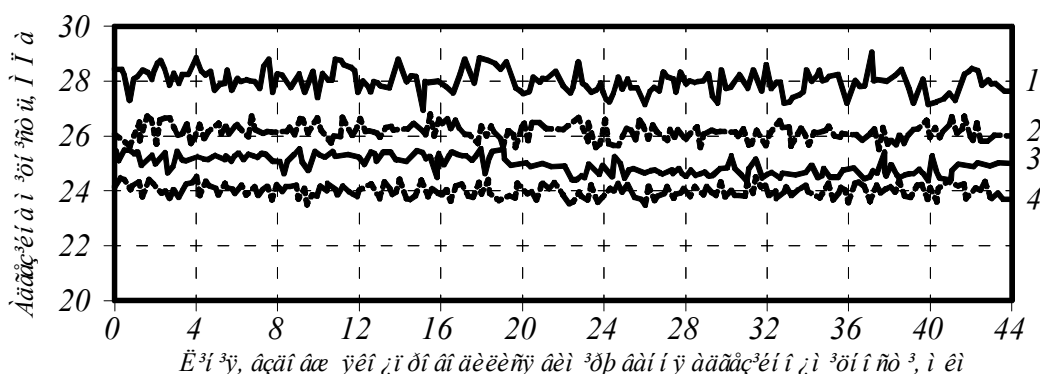


Рис. 5. Профілі розподілу адгезійної міцності по товщині золотого покриття на керамічному корпусі гіроскопа (товщина покриття – 150 нм) залежно від глибини проникнення зонду атомно-силового мікроскопа: 1 –  $h = 0$  (поверхня покриття); 2 –  $h = 50$  нм; 3 –  $h = 100$  нм; 4 –  $h = 150$  нм (межа між основою і покриттям)

За результатами визначення адгезійної міцності було встановлено значення адгезійної міцності цього покриття, що становило  $28 \pm 0,8$  МПа на його поверхні. Проведені дослідження також дозволили встановити, що у міру збільшення товщини покриття його адгезійна міцність зменшується за експоненціальним законом.

У той же час явною перевагою методу АСМ у визначенні механічних характеристик поверхонь є можливість урахування навалів, що утворилися внаслідок проникнення зонду у зразок, а також пружного відновлення форми відбитку після відведення зонду від поверхні. А головною перевагою методу є можливість проведення досліджень в одному циклі вимірювань.

Використання цих методик у дослідженні фізико-механічних характеристик поверхонь відкриває нові перспективи при дослідженні розподілу сил тертя між двома взаємодіючими поверхнями в різноманітних мікромеханічних пристроях і системах. Обмеження методу АСМ при механічних вимірюваннях поверхні пов'язані з труднощами при розшифровці отримуваної в експериментах інформації, необхідністю вибору і побудови математичної моделі механічної взаємодії, а також з необхідністю використання спеціальних зондів.

**Висновки.** Показана можливість методу атомно-силової мікроскопії здійснювати високоточні та оперативні дослідження механічних характеристик поверхонь елементів виробів точного приладобудування, а саме: мікротвердості, зносостійкості та адгезійної міцності поверхневого шару, що проводяться в одному циклі вимірювання і дозволяють враховувати навали матеріалу в місцях проникнення зонда-індентора в досліджувану поверхню, а також пружну релаксацію матеріалу поверхні в цих місцях. Запропоноване автором комплексне дослідження дозволяє скоротити час вимірювання механічних характеристик в 1,7-2,5 рази, підвищити точність отримуваних результатів у 2,4-4 рази.

Універсальність запропонованої методики полягає у можливості визначення механічних характеристик не лише в масивному матеріалі, але й у тонких покриттях, нанесених на елементи приладів точної механіки. При цьому отримувана точність ви-

значення цих характеристик в разі різняться від інших, альтернативних методів визначення механічних характеристик. На прикладі струмоznімального елемента ротора гіроскопа, який являє собою керамічний вал з нанесеним на нього тонким покриттям (близько 150 нм) Au, встановлені мікротвердість ( $37 \pm 2$  кгс/мм<sup>2</sup>), зносостійкість (0,28-0,32) та адгезійна міцність ( $28 \pm 0,8$  МПа) цих покриттів.

Подальший розвиток методу АСМ в точному приладобудуванні, на думку автора, може бути реалізований у ряді методик та пристроїв на базі устаткування для атомно-силової мікроскопії, наприклад: при реалізації інструментів нанодриль і нановеретено, що дозволяють створювати в поверхнях елементів точної механіки мікро- і наноотвори при формуванні структурних утворень, проведенні механоактивації поверхневих шарів наносвердлінням, при визначенні просторової структури речовини, що дозволить не лише відновити хімічний склад речовини, але й її просторову орієнтацію, а також при створенні струминного нанопринтера, що дозволить створювати високоточні наноструктури і нанопристрої точного приладобудування на їх основі тощо.

### Список літератури

1. Шука А. А. Нанoeлектроника : учеб. пособ. / А. А. Шука ; под ред. А. С. Сигова. – [2-е изд.]. – М. : БИНОМ, Лаборатория знаний, 2012. – 342 с.
2. Miyake S. Mechanical nanoprocessing of layered crystal structure materials by atomic force microscopy / S. Miyake, K. Matsuzaki // Japanese Journal of Applied Physics. – 2002. – Vol. 41, no. 9. – P. 5706–5712.
3. Nanofabrication by mechanical and electrical processes using electrically conductive diamond tip / S. Miyake, H. Zheng, J. Kim, M. Wang // Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. – 2008. – Vol. 26, no. 5. – P. 1660–1665.
4. Методи та засоби мікроскопії : [монографія] / В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко та ін.]. – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – 336 с.
5. Butt H. Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation

- and applications / Butt H., Cappella B., Kappl M. – *Surface Science Reports*. – 2005. – 59. 1–152.
6. Chizhik S. A. Nanomechanical and nanodiagnosics methods based on scanning probe microscopy / S. A. Chizhik // *Modern applications of nanotechnologies: thesis*. – Minsk, 27-29.06.2012. – 1 p.
  7. Formation of wear-resistant coatings on silicon probes for atomic force microscopy by thermal vacuum evaporation / V. S. Antonyuk, S. O. Bilokin, M. O. Bondarenko et al. // *Journal of Superhard Materials*. – 2015. – Vol. 37, No. 2. – P. 112–119.
  8. Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа / [В. С. Антонюк и др.] // *Наноинженерия*. – 2014. – № 3 (33). – С. 13–16.
  9. Білокін С. О. Визначення фізико-механічних характеристик поверхонь виробів наноелектроніки методом склерометрії / С. О. Білокін // *Вісник технічного університету України «КПІ»*. – 2013. – Вип. 46. – С. 112–117. – (Серія : Приладобудування).
  10. Билоконь С. А. Влияние сил адгезии между исследуемой поверхностью и зондом для атомно-силовой микроскопии / С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, В. С. Антонюк // *Наноинженерия*. – 2012. – № 6 (12). – С. 41–45.
  4. Antonjuk, V. S., Timchik, G. S. Bondarenko, Ju. Ju. et al. (2013) *Methods and facilities of microscopy*. Kyiv: NTUU «KPI», 336 p. [in Ukrainian].
  5. Butt, H., Cappella, B. and Kappl, M. (2005) Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications. *Surface Science Reports*, 59. 1–152.
  6. Chizhik, S. A. (2012) Nanomechanical and nanodiagnosics methods based on scanning probe microscopy. *Modern applications of nanotechnologies: thesis*. Minsk, 27-29.06, 1 p.
  7. Antonyuk, V. S., Bilokin, S. O., Bondarenko, M. O. et al. (2015) Formation of wear-resistant coatings on silicon probes for atomic force microscopy by thermal vacuum evaporation. *Journal of Superhard Materials*, 37 (2), pp. 112–119.
  8. Antonyuk, V. S. et al. (2014) Features of measuring of microhardness of dielectric surfaces by silicic probe of atomic-force microscope. *Nanoinzheneriya*, 3 (33), pp. 13–16 [in Russian].
  9. Bilokin', S. O. (2013) Determination of physical and mechanical descriptions of surfaces of nanoelectronics wares by the method of scratching research. *Visnyk tehnicnoho universytetu Ukrayiny «KPI», Serija Pryladobuduvannya*, (46), pp. 112–117 [in Ukrainian].
  10. Bilokon', S. A., Bondarenko, M. A. and Antonyuk, V. S. (2012) The influence of forces of adhesion between the investigated surface and a probe for atomic-force microscopy. *Nanoinzheneriya*, 6 (12), pp. 41–45 [in Russian].

### References

1. Shhuka, A. A. (2012) Nanoelectronics. In: A. S. Sigov (Ed.). 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: BINOM. *Laboratorija znanij*, 342 p. [in Russian].
2. Miyake, S. and Matsuzaki, K. (2002) Mechanical nanoprocessing of layered crystal structure materials by atomic force microscopy. *Japanese Journal of Applied Physics*, 41 (9), pp. 5706–5712.
3. Miyake, S., Zheng, H., Kim, J. and Wang, M. (2008) Nanofabrication by mechanical and electrical processes using electrically conductive diamond tip. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 26 (5), pp. 1660–1665.

**M. O. Bondarenko, Ph.D.**

Cherkasy State Technological University  
Shevchenko Blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine  
[maxxium@ukr.net](mailto:maxxium@ukr.net)

**RESEARCH OF MECHANICAL DESCRIPTIONS OF ELEMENTS  
OF PRECISION INSTRUMENT-MAKING DEVICES  
BY THE METHOD OF ATOMIC-FORCE MICROSCOPY**

*In the article the possibility of complex research of such mechanical descriptions of elements of precision instrument-making as microhardness, wearproofness and adhesion strength of superficial layer in one cycle of measuring with the use of the method of atomic-force microscopy is presented.*

*The aim of the work consists in the development and experimental confirmation of the methodology of complex research of microhardness, wearproofness and adhesion strength of elements of precision instrument-making by the method of atomic-force microscopy that allows to increase an operability and exactness of measuring of mechanical descriptions.*

*For the achievement of the put aim, except analytical calculations of values of measurands, a few experiments have been in-process conducted on validifying of calculation values. The obtained results well correlate with calculation data and data, got by other authors on good authorities.*

*Another advantage of the offered methodology is unique possibility of the determination of mechanical descriptions of thin coverages of the devices of fine mechanics inflicted on elements. Thus, on the example of current-collecting element of gyroscope rotor, that is a ceramic shaft with thin coverage (of the order of 500 nm) of Au inflicted on it, a microhardness (37 kg-force/mm<sup>2</sup>), wearproofness (0,28-0,32) and adhesion strength (28 MPa) of these coverages are set.*

*This complex research offered by the author allows to shorten time of measuring of mechanical descriptions in 1,7-2,5 times, to increase exactness of obtained results in 2,4-4 times. It takes place due to the account of helter-skelters, that appear as a result of nanoindentation and scratching researches, and also the time of relaxation renewal of the material of a surface in the place of penetration of a probe by atomic-force microscopy in the surface.*

**Keywords:** *atomic-force microscopy, precision instrument-making, nanoindentation, scratching researches, adhesion strength.*

*Рецензенти: В. М. Лукашенко, д.т.н., професор,  
М. П. Мусієнко, д.т.н., професор*