

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 620.178.151.6

**ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХОНЬ
ВИРОБІВ НАНОЕЛЕКТРОНІКИ МЕТОДОМ СКЛЕРОМЕТРІЇ***Білокінь С. О.**Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна*

Показана перспективність методу атомно-силової мікроскопії, як єдиного методу дослідження мікрогеометричних параметрів та фізико-механічних характеристик (в нанометровому діапазоні) в одному циклі сканування за допомогою кремнієвого зонду, модифікованого вуглецевим покриттям. Описана методика та наведені дослідження мікротвердості та зносостійкості тонких покриттів SiO₂, HfO₂ та Au (мікротвердість, відповідно, 9,02 ГПа, 7,8 ГПа, 0,34 ГПа; зносостійкість, відповідно, 18,3 у.о.; 23,1 у.о.; 31,6 у.о.). В результаті порівняння з довідниковими даними визначено, що мікротвердість поверхневого шару матеріалу більша за мікротвердість в глибині матеріалу.

Ключові слова: атомно-силова мікроскопія, мікротвердість, зносостійкість, наноелектроніка, склерометрія

Вступ. Постановка задачі

Створення функціональних матеріалів та наноструктур на їх основі для нових виробів наноелектроніки потребує детального вивчення їх фізико-механічних властивостей (створення економічних сонячних батарей, більш щільних і стабільних комірок пам'яті, вивчення впливу квантових ефектів на елементи деталей наноелектроніки). Такий розвиток нанотехнологій вимагає створення нових методів дослідження властивостей, нових методик та аналітичних моделей. Одним із найважливіших досліджень є вивчення фізико-механічних властивостей матеріалів в нанометричному діапазоні, для чого перспективним є застосування наноіндентування та склерометрії.

Прилади, що реалізують процес наноіндентування та склерометрії, влаштовані наступним чином. Вони містять вузол навантаження та прецизійний датчик для реєстрації переміщення наноіндентора, контролерний блок і комп'ютер з пакетом програм для керування усіма робочими циклами приладу, збирання, обробки та зберігання даних. Для вибору місця проникнення наноіндентора призначено оптичний мікроскоп, а для позиціонування і переміщення зразка – багатокоординатний столик [1].

Згідно із міжнародним стандартом ISO 14577:2002 фізико-механічні дослідження відносяться до категорії досліджень в нанометровому діапазоні за умови проникнення індентора в зразок на глибину $h \leq 20$ нм. Це відкриває нові можливості у дослідженні механічних характеристик поверхонь елементів наноелектроніки та функціональних покриттів на них товщиною, що не перевищує

50 нм [2]. Проте при такій несуттєвій глибині проникнення на результат дослідження суттєвим чином впливають навали, які виникають при витісненні матеріалу в місцях проникнення індентора.

У той же час, застосування методу склерометрії при вивченні фізико-механічних характеристик матеріалу має низку переваг перед методом наноіндентування, а саме: менший вплив пружного відновлення, можливість вивчення переходу від пружної до пластичної деформації, можливість вивчення зносостійкості, а також можливість дослідження адгезії плівок товщиною в декілька нанометрів до твердих поверхонь.

Перспективним для склерометрії діелектричних матеріалів є метод атомно-силової мікроскопії (АСМ), на основі якого можливо визначити фізико-механічні характеристики матеріалу. Метод має наступні переваги:

1. Можливість попереднього вибору місця проникнення наноіндентора, що включає різкі перепади мікрогеометричних параметрів або сторонніх включень.
2. Можливість наноіндентування з одночасною візуалізацією навалів в місці контакту зонду-індентора з поверхнею, врахування яких істотно впливає на результати вимірювання мікротвердості.
3. Експресність вимірювання мікротвердості, що пов'язана з можливістю дослідження мікрогеометрії поверхні та мікротвердості в одному циклі сканування. При цьому пружне відновлення поверхні відбитка після зняття навантаження несуттєве.
4. Можливість контролю за допомогою тестових решіток мікрогеометрії поверхні наноіндентора в процесі вимірювання, що дозволяє проводити більш точні обчислення механічних властивостей поверхонь.

Одним з найсуттєвіших недоліків АСМ є швидке зношування вимірювального елемента (кремнієвого зонду). Тому в даній роботі пропонується використовувати кремнієвий зонд, модифікований вуглецевим покриттям із залученням комбінованого методу резистивного осадження в вакуумі з подальшою електронно-променевою мікрообробкою [3].

Таким чином, метою роботи є дослідження мікротвердості та зносостійкості поверхонь матеріалів елементів наноелектроніки кремнієвим зондом, модифікованим вуглецевим покриттям за методикою склерометрії.

Порядок проведення дослідження

Ідея визначення зносостійкості методом АСМ полягає у дряпанні зразка індентором подальшим скануванням зони деформації поверхні (рис. 1).

В якості досліджуваних матеріалів використовувались зразки, що являють собою плоскопаралельні пластини розміром $20 \times 20 \times 2$ мм з матеріалів, які знайшли широке застосування у виробках сучасної наноелектроніки, мікрооптомеханіки та мікрооптики, а саме: тонкі покриття SiO_2 , HfO_2 та Au товщиною до 50 нм на підкладках із кремнію Kp0 .

Склерометричне дослідження мікротвердості та зносостійкості тонких покриттів на діелектричній поверхні кремнію КрО проводилося в такій послідовності:

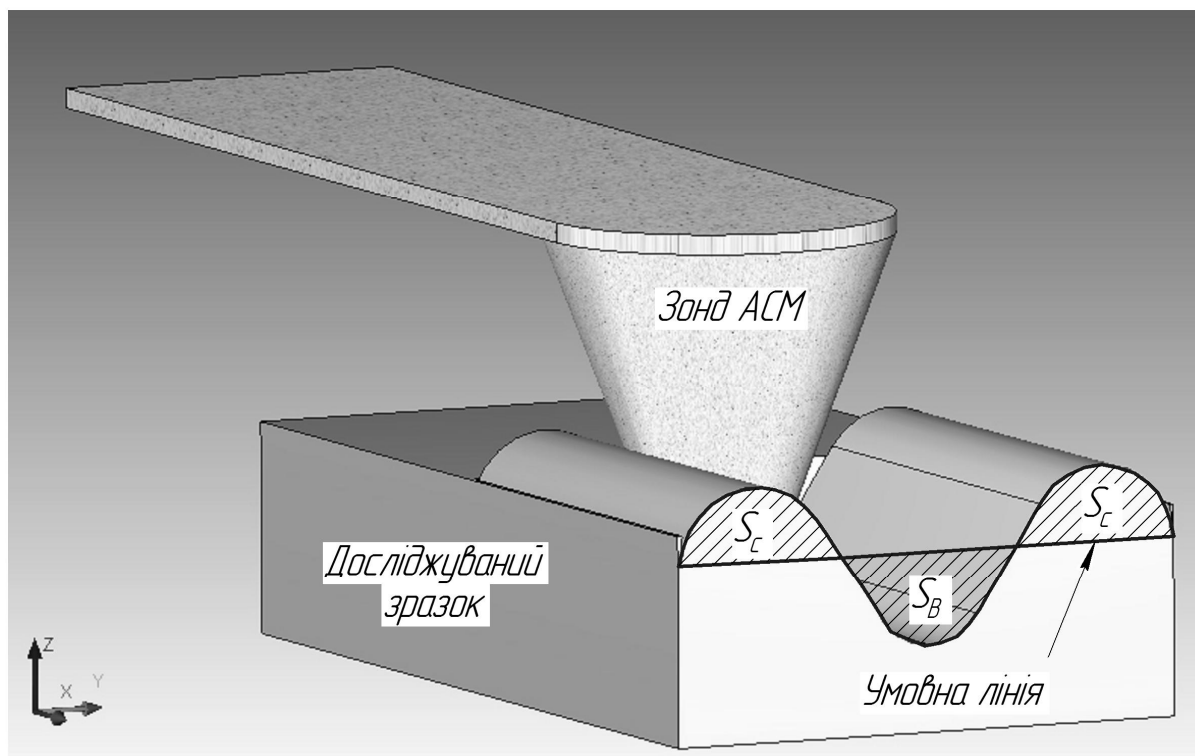


Рис. 1. Схема проведення експерименту по дослідженню зразків на зносостійкість методом склерометрії за допомогою методу АСМ

1. Проводиться сканування зразка для вибору місця проведення склерометрії.
2. Внаслідок оптичної візуалізації обирається лінія, вздовж якої проводилося дослідження (місце проведення дослідження не повинно мати різких перепадів рельєфу та сторонніх включень).
3. Проводиться склерування поверхні.
4. Сканується місце проведення дослідження, внаслідок чого визначається об'єм вдавненого матеріалу та об'єм матеріалу, зміщеного в бугри в межах лінії дряпання.
5. Обчислюється мікротвердість досліджуваного матеріалу за формулою [4]:

$$H = c \cdot \frac{P}{b^2}, \quad (1)$$

де c – коефіцієнт форми індентора (обчислюється дослідженням матеріалу з відомим показником твердості, наприклад плавленого кварцу); $P = 8$ мкН – нормальне зусилля при якому наносилися подряпини; b – середнє арифметичне значення ширини подряпини.

6. Обчислюється зносостійкість. При постійному нормальному навантаженні на зонд-наноіндентор показником зносостійкості служить обернено пропорційна величина повному об'єму V_d деформованого індентором матеріалу [5]:

$$k = \frac{V_0}{V_d} = \frac{V_0}{V_d + V_c}, \quad (2)$$

де V_d – об'єм вдавненого матеріалу, що дорівнює $S_d^{cp} L = \frac{\sum_{i=1}^n S_d^i}{n} L$;

S_d^{cp} – середня площа перерізу видавленого матеріалу в n перерізах, перпендикулярних напрямку лінії;

S_d^i – площа i -го перерізу деформованого матеріалу, обмеженого профілем впадин лінії та умовною лінією поверхні зразка;

$L = 36$ мкм – контрольна довжина лінії;

V_c – об'єм матеріалу, зміщеного в бугри деформації за межами лінії, що

дорівнює $S_c^{cp} L = \frac{\sum_{i=1}^n S_c^i}{n} L$;

S_c^{cp} – середня площа перерізу зміщеного матеріалу в n перерізах, перпендикулярних напрямку лінії;

S_c^i – площа i -го перерізу зміщеного матеріалу, обмежена профілем напливів по обом границям лінії та умовній лінії поверхні зразка);

$V_0 = 10^{-3}$ – еталонний об'єм матеріалу, введений для отримання безрозмірності показника k .

Обговорення результатів дослідження

Результати дослідження представлені в табл. 1, а на рис. 2 представлено АСМ-зображення та топограму, отримані в процесі проведення склерометрії методом АСМ на прикладі кремнієвого зразка з покриттям SiO₂.

Таблиця 1. Результат дослідження мікротвердості та зносостійкості кремнієвих поверхонь з різними покриттями на них

Матеріал покриття	Мікротвердість, H , ГПа	Довідникові значення мікротвердості, H , ГПа	Критерій зносостійкості, k^*
SiO ₂	9,02	8,5	18,3
HfO ₂	7,8	6,6	23,1
Au	0,34	0,245	31,6

*) Критерій зносостійкості представлений в умовних одиницях, де за 100 у.о. приймається зносостійкість алмазу

В результаті проведеної методики виявлено, що твердість поверхневого шару матеріалу більша за твердість в його глибині, що може бути зв'язано з тим, що в поверхневому шарі зв'язків між молекулами більше.

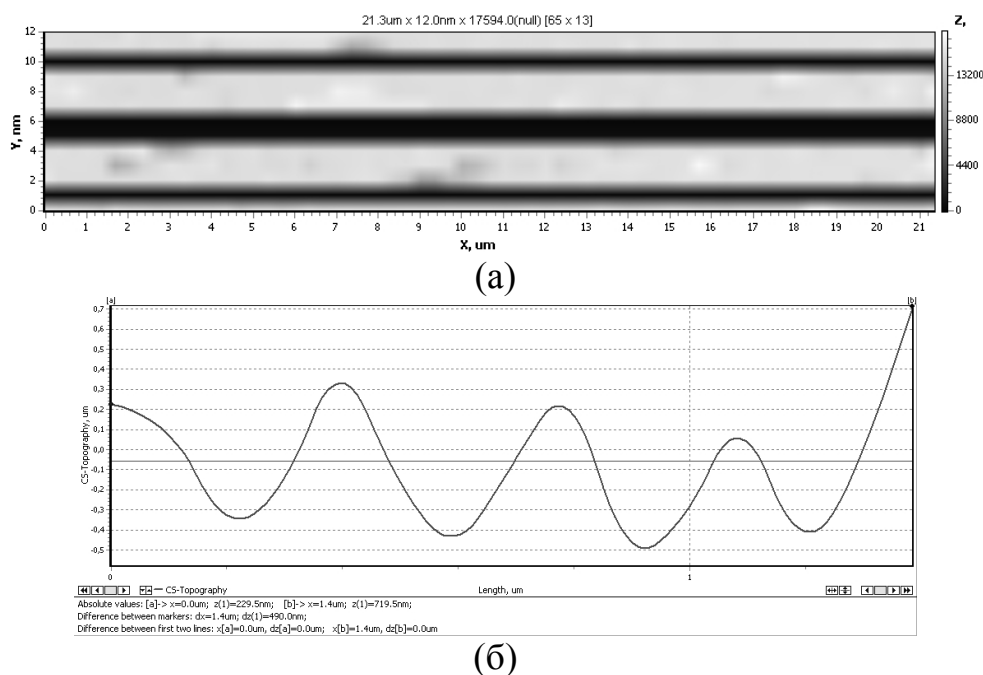


Рис. 2. АСМ-зображення (а) та профілограма (б) результату склерометрії кремнієвої пластини Кр0 з тонким покриттям SiO_2 (товщина 50 нм) при використанні кремнієвого зонду, модифікованого вуглецевим покриттям

Висновки

1. Показано, що кремнієві зонди, модифіковані тонким вуглецевим покриттям можуть застосовуватися для дослідження механічних характеристик (мікротвердості та зносостійкості) поверхонь виробів наноелектроніки (на прикладі кремнієвих пластин з тонкими (менше 50 нм) функціональними покриттями SiO_2 , HfO_2 , Au на них) методом склерометрії із застосуванням атомно-силового мікроскопу в одному циклі сканування.
2. Встановлені значення мікротвердості тонких покриттів на поверхні кремнію. Так, для SiO_2 значення мікротвердості становить 9,02 ГПа, для HfO_2 – 7,8 ГПа, для Au – 0,34 ГПа. Також встановлено відносну зносостійкості цих матеріалів, яка становить (в умовних одиницях, де за 100 у.о. приймається зносостійкість алмазу): для SiO_2 – 18,3 у.о.; для HfO_2 – 23,1 у.о., для Au – 31,6 у.о. Ці дані близькі до довідникових даних, що свідчить про адекватність проведених досліджень.
3. Визначено, що мікротвердість поверхневого шару матеріалу більша за мікротвердість в його глибині, що може бути пов'язано з тим, що в поверхні нанесеного матеріалу, який знаходиться в безпосередньому контакті з матеріалом основи (або на відстані від неї порядку 0,5-2 нм) на результати визначення мікротвердості впливає мікротвердість матеріалу основи.

Література

1. Кухарева И. Е.// Вестник ХНАДУ. – 2011. – Вып. 54. – С. 33 - 39.
2. Oliver W., Pharr G.// J. Mater. Res., Vol. 19, No. 1, Jan 2004. P.3

3. Шелестовская С. А., Бондаренко М. А., Котляр А. В. и др. // Сборник докладов IX Международной конференции «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии», 2010. – С. 156 – 162.
4. Усеинов С. С. Соловьев В. В. Гоголинский К. В. и др. // Нанотехника. Инженерный журнал. – 2008. – №1. – С. 111 – 115.
5. Соколов Г. Н., Зорин И. В., Литвиненко-Арьков В. Б. // Сварка и диагностика. – 2012. – № 2. – С. 34 – 39.

*Надійшла до редакції
17 вересня 2013 року*

© Білокінь С. О., 2013

УДК 620.179.14(088.8)

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ УЯВНИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ КООРДИНАТНИХ СИСТЕМ РУХУ ВЕРСТАТНОГО ОБЛАДНАННЯ. ЧАСТИНА 2

¹⁾Скицюк В.І., ²⁾Вайнтрауб М.А.

¹⁾Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
²⁾Інститут професійно-технічної освіти НАПН України, м. Київ, Україна

У попередній частині статті [1] було доведено вплив аргументу на коефіцієнт k функції $y = kx$ та показано на конкретному прикладі, до чого це призводить у технологічних процесах. Наразі пропонується подальше застосування цієї методики на прикладі зносу інструмента під час процесу металообробки.

Для кращого уявлення проблеми як приклад обрано чотири типові ситуації зносу різального інструмента у процесі металообробки та приведено основні фізико-математичні залежності розвитку цих процесів. Показано, яким чином реалізуються функції, означені у попередній статті [1]. Аналітично доведено зону реалізації можливого зносу різального інструмента.

Ключові слова: уявна координата, реальна координата, деструкція.

Вступ

Загальна методика визначення стану різального інструмента (РІ) у процесі технологічної обробки деталей у приладобудуванні полягає у тому, що є необхідність попереднього створення аналітичних моделей стану процесу металообробки під час виготовлення надточних деталей на верстатах із числовим програмним керуванням (ЧПК). Як наслідок, необхідно розглянути теоретичне підґрунтя технічних і фізичних характеристик технологічного обладнання для виготовлення деталей наноприладів. Подібні дослідження можливі на підставі реалізації дослідів щодо аналізу фізичних процесів у технологічній зоні.

Такому аналітичному дослідженню підлягають наступні чинники технологічного процесу: знос різальних інструментів; кінематичні параметри системи РІ; зв'язок роботи головного рушія та колової частоти обертання деталі під час обробки. Оскільки у попередній частині статті [1] розглядалися деструктивні явища, які відбуваються у системі координат верстатів із ЧПК, а саме: розходження між уявною та реальною системою координат, то необхідно дослідити