

<https://doi.org/10.15407/knit2023.01.065>  
УДК 53.083.98

**О. І. ШЕВЧЕНКО**<sup>1</sup>, в. о. зав. наук.-техн. відділу, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.  
**А. І. ЩЕНКО**<sup>2</sup>, старш. наук. співроб.  
**М. О. БОНДАРЕНКО**<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри

<sup>1</sup>Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

<sup>2</sup>Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича Національної академії наук України  
вул. Академіка Кржижановського 3, Київ, Україна, 03142

<sup>3</sup>Черкаський державний технологічний університет  
Бульвар Шевченка 460, Черкаси, 18006

## ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРЕВАГИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХОНЬ МАТЕРІАЛІВ КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

У роботі наводяться переваги методу атомно-силової мікроскопії (АСМ) як одного з найбільш універсальних та перспективних методів дослідження поверхонь матеріалів космічної техніки. Із порівняння результатів дослідження нітриду алюмінію (AlN) методами растрової електронної мікроскопії (РЕМ) та АСМ встановлено, що, не дивлячись на більшу роздільну здатність методу РЕМ, основними його недоліками є неможливість проведення вертикального сканування поверхонь та відсутність можливості дослідження їхніх фізико-механічних властивостей. Встановлено переважні особливості процесу дослідження рельєфу поверхонь методом АСМ, які полягають у можливості високоточного позиціонування вимірювального інструмента (з точністю визначення заданої ділянки — до 40 нм); усунення викривлення отриманого зображення досліджуваної ділянки та автоматичному коригуванні швидкості проведення досліджень. Визначені середні арифметичні значення мікронерівностей поверхонь нітриду алюмінію, отримані методом АСМ, дорівнювали  $R_a = 147$  нм,  $R_q = 163$  нм для зразків, які не піддавалися впливу екстремального середовища та  $R_a = 381$  нм,  $R_q = 422$  нм для зразків, які протягом 120...140 год піддавалися дії екстремального середовища, що імітує космічні умови (температура 550 °С, тиск 6.8...7.2 мкбар). Також визначено максимальну пористість у поверхневому шарі (до 1.5 мкм) зразків з нітриду алюмінію, яка становила 3...5.2 %.

**Ключові слова:** атомно-силова мікроскопія, нітрид алюмінію, матеріали космічної техніки, нанорельєф поверхні.

### ВСТУП

Інтенсивний розвиток космічної техніки та досліджень, що відбувається останнім часом, став можливим завдяки активному створенню і застосуванню нових концептуальних підходів та практичних рішень у галузях композиційного матеріалознавства, аерокосмічного машино-

приладобудування, метрології, телекомунікації тощо, безпосередньо пов'язаних з космічними технологіями. У свою чергу, цим забезпечується підвищена увага до космічної тематики як зі сторони пересічних громадян, так і з боку фахових вчених — дослідників космосу, а також інженерів-розробників аерокосмічних пристроїв та

Цитування: Шевченко О. І., Щенко А. І., Бондаренко М. О. Особливості та переваги дослідження поверхонь матеріалів космічної техніки методом атомно-силової мікроскопії. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 1 (140). С. 65—73. <https://doi.org/10.15407/knit2023.01.065>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

систем. Це пов'язано зі значним підвищенням не лише продуктивності та функціональності компонентної бази космічних пристроїв, але й підвищенням точності й надійності методів та засобів контролю робочих параметрів цих пристроїв, а також контролю зміни геометричних характеристик та функціональних властивостей поверхні матеріалів, які використовуються в екстремальних умовах космічного простору. Як зазначено в роботі [19], саме контроль поверхні матеріалів, які піддаються впливу космічних факторів (наднизьких та надвисоких температур, низького тиску, впливу радіаційного космічного випромінювання тощо) на етапі випробування або ранніх стадіях їхньої експлуатації дозволяє виявити їхні можливі дефекти та брак, що, у свою чергу, мінімізує виникнення аварійних ситуацій при запуску або експлуатації космічної техніки. Останні, на думку фахівців [9, 13, 21], є основною причиною найбільш гучних аварій та катастроф, пов'язаних з дослідженнями космосу.

Методи дослідження параметрів мікрогеометрії та механічних властивостей поверхонь досить різноманітні. Проте спільною рисою цих методів є необхідність вимірювання параметрів у тонкому поверхневому шарі ( $\approx 10$  нм). Це зумовлює високу (в окремих випадках граничну) чутливість вимірювальних систем, що використовуються. Найпопулярнішими на сьогоднішній день є методи мікроскопії. Проте, враховуючи особливості усіх згаданих методів нановимірювань, методи профілометрії, інтерферометрії та оптичної мікроскопії не підходять через низьку роздільну здатність та недостатню точність нанометричних вимірювань, а також ряду артефактів, що докладно розглянуто в роботі [1].

Для проведення високоякісних досліджень стану поверхні рельєфу і фізичних властивостей поверхонь композиційних матеріалів космічної техніки, поряд з більш традиційними методами електронної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, добре зарекомендували себе методи сканувальної зондової мікроскопії (СЗМ) [1, 4, 20], які, на відміну від традиційних, мають ряд незаперечних переваг (висока точність визначення мікронерівностей поверхні — до одного нано-

метра, чутливість — до  $10^{-12}$  Н, продуктивність (час дослідження зразка обмежується лише обраними режимами сканування і не витрачається на підготовчу та завершальні стадії дослідження), можливість провадити дослідження як твердих неорганічних, так і органічних поверхонь високої в'язкості та пружності, як в умовах газового або повітряного середовища, так і в умовах вакууму, відсутність ефектів «тіні» та аберації, притаманних електронній мікроскопії, а також відсутність спотворень результатів досліджень від впливів потужних електромагнітних полів). Серед таких методів СЗМ вигідно відрізняється метод атомно-силової мікроскопії (АСМ), на основі якого можуть бути реалізовані методики визначення як геометричних, так і механічних (мікротвердості, зносостійкості, внутрішнього тертя тощо) характеристик поверхонь матеріалів. Водночас, враховуючи компактність обладнання атомно-силових мікроскопів, їхню незалежність від додаткового високоенергетичного обладнання (як для електронних мікроскопів та рентгеноструктурних дифрактометрів), а також відсутність негативного впливу на результати досліджень з боку зовнішніх факторів (невагомість, космічне радіаційне випромінювання тощо), даний метод має перспективи застосування у космосі (наприклад, у дослідженнях на МКС або в умовах інших космічних об'єктів Сонячної системи) [14]. При цьому останні досягнення розробників апаратної і методичної бази методів СЗМ [15, 16] дозволяють проводити за його допомогою ряд унікальних досліджень і випробувань, не обмежуючись механічними характеристиками і топологією поверхні матеріалів. Це відкриває перспективу застосування методів СЗМ для комплексних досліджень поверхонь матеріалів космічної техніки в одному робочому циклі.

Питаннями проведення досліджень матеріалів методами СЗМ займається ряд відомих вітчизняних та закордонних вчених, серед яких слід відмітити В. А. Бикова, Г. Бінніга, Б. Брушана, К. Гербера, В. Л. Карбівського, К. Куейта, В. Л. Миронова, М. М. Рожицького, Х. Ропера, А. І. Свиридзонка, Д. В. Снежка, С. А. Чижика та інших [3, 7, 9, 11, 12].

Проте питання комплексного нанометричного дослідження стану поверхні космічних матеріалів в одному циклі вимірювань в літературних джерелах не висвітлені. З іншого боку, саме комплексне дослідження поверхні викликає ряд труднощів і проблем: швидкий вихід з ладу вимірювального інструмента; неможливість однозначного визначення і позиціонування зонда в зону вимірювань після проведення чергового етапу досліджень або заміни вимірювального інструмента; динамічні зміни вимірюваних властивостей поверхні (особливо для фото-, електро-, біоактивних матеріалів), які тягнуть за собою релаксаційні зміни поверхневого шару матеріалу на нанометричному рівні (тепловий дрейф атомів, механічні та електричні мікрореформації тощо) [22].

Метою роботи є порівняння основних переваг дослідження поверхонь матеріалів космічної техніки методом атомно-силової мікроскопії з результатами дослідження цих поверхонь методом растрової електронної мікроскопії.

#### **ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ ПОВЕРХОНЬ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ**

Як основне дослідницьке обладнання в роботі використано атомно-силовий мікроскоп NT-206 (Microtestmachine). Для візуалізації об'єкта при збільшенні до 100 разів використано оптичну камеру «Logitech» виробництва США, поле огляду якої дорівнює  $1 \times 0.75 \text{ мм}^2$ .

Як об'єкт дослідження використано зразки кераміки з нітриду алюмінію AlN (у кількості шести штук), як такого, що знайшов широке та перспективне використання у різних приладах космічної техніки (наприклад антени з електричним скануванням, активні адаптивні антени, антени з просторовим складанням потужності та інші) [8, 10] завдяки своїй високій теплопровідності, хорошим електроізоляційним властивостям, низькому коефіцієнту теплового розширення при відносно невисокій вартості при можливості збереження працездатності у широкому діапазоні температур. Нітрид алюмінію на сьогодні є найперспективнішим матеріалом відведення тепла від теплонавантажених елементів у ви-

бах космічної техніки [17]. Останнім часом ряд зарубіжних фірм [2], що випускають електронні компоненти, переходять на використання нітриду алюмінію практично у всіх галузях, де традиційно застосовувався оксид берилію.

Дослідження об'єкту виконувалися по робочих гранях зразків у 15 зонах  $10 \times 10 \text{ мкм}$  на кожній робочій грані. При цьому для досягнення високої збіжності результатів вимірювань повторні дослідження в кожній із обраних зон провадилися не менше десяти разів.

Як вимірювальний інструмент застосовувалися кремнієві конічні зонди марки CSC-38 (виробник «Micromash», Німеччина) з радіусом вістря 10 нм. Даний зонд найбільш поширений при масовій діагностиці нанорельєфу та механічних характеристик твердих поверхонь. У порівнянні з іншими типами зондів він має такі переваги: висока точність сканування (до 0.2 нм по осі Z та до 10 нм по осі XY); висока чутливість до невеликих перепадів рельєфу поверхні; не руйнує досліджувану поверхню; має широкий діапазон вимірюваних поверхонь, належить до бюджетного класу зондів (середня вартість зонду 15...30 €) [5].

Дослідження на АСМ провадилися у нормальних умовах [18]: температура  $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ , відносна вологість повітря не більше 80 %, атмосферний тиск  $100 \pm 4 \text{ кПа}$ , напруга мережі живлення 220 В, частота мережі живлення 50 Гц. Досліджувані об'єкти розміщали на предметному столику АСМ, де здійснювалося їхнє сканування у статичному режимі. При цьому були використані кремнієві зонди «Ultrasharp CSC12» (Mikromasch).

Дослідження стану поверхонь матеріалів (нанорельєфу, пористості, наявності мікрорефектів) із застосуванням методу атомно-силової мікроскопії здійснювалося у послідовності, представленій на рис. 1.

На рис. 2 показано зовнішній вигляд вимірювального комплексу на базі атомно-силового мікроскопа NT-206.

Загалом підготовка зразків та обладнання до процесу досліджень, а також проведення повного циклу досліджень зразка в одній зоні становило 12...18 хв.



Рис. 1. Алгоритм проведення дослідження поверхонь за допомогою АСМ

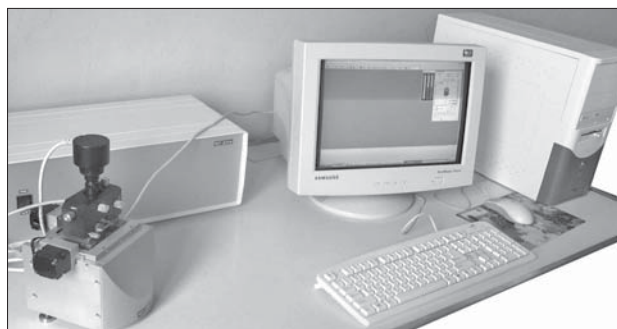


Рис. 2. Атомно-силовий мікроскоп NT-206 в комплексі з системою керування та ПЕОМ

Аналіз результатів сканування поверхонь полягає у дослідженні профілю по обраному напрямку площадки, розподілу висот, кутової гістограми та обробка інформації про геометричні показники досліджуваної поверхні за допомо-

гою програмного продукту Surface Viewer v.6.2 (використовується на АСМ NT-206).

Шляхом удосконалення програмно-апаратного, математичного та методичного забезпечення вимірювальної системи АСМ NT-206, яке було проведене в роботі [6], можна зазначити особливості дослідження рельєфу поверхонь матеріалів на даному пристрої, що визначають його переваги:

- можливість «запам'ятовувати» поточне положення досліджуваної ділянки з максимальною точністю 40 нм з метою повторного повернення системою АСМ вимірювального інструменту на неї;

- урахування дисторсії зображення досліджуваної ділянки, яка виникає через сферичний рух вимірювального інструменту у процесі вимірювань, а також зміщення об'єкта досліджень відносно центра предметного столика;

- автоматичне коригування швидкості досліджень на різних стадіях сканування (підведення зонда до поверхні, визначення «глибини» западини або «висоти» рельєфу поверхні у вимірюваній точці, переїзд сканувальної голівки на наступну ділянку тощо), що дозволяє вирішити взаємовиключні завдання: максимально збільшити швидкість досліджень при дотриманні максимальної точності.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ АСМ

В результаті досліджень сканограм розподілу мікронерівностей та поверхневої пористості на поверхні досліджуваних зразків було встановлено, що середнє арифметичне значення мікронерівностей лежить в діапазоні від  $R_a = 147$  нм (середньостатистичне значення мікронерівностей  $R_q = 163$  нм) для зразків, що не піддавалися впливу екстремального середовища (рис. 3), до  $R_a = 381$  нм (середньостатистичне значення мікронерівностей  $R_q = 422$  нм) — для зразків, що піддавалися протягом тривалого часу (120...140 год) дії екстремального середовища, що імітує космічні умови (температура 550 °С, тиск 6.8...7.2 мкбар) (рис. 4). Максимальна пористість у поверхневому шарі (до 1.5 мкм) цих зразків з нітриду алюмінію становила відповідно 3...5.2 %.



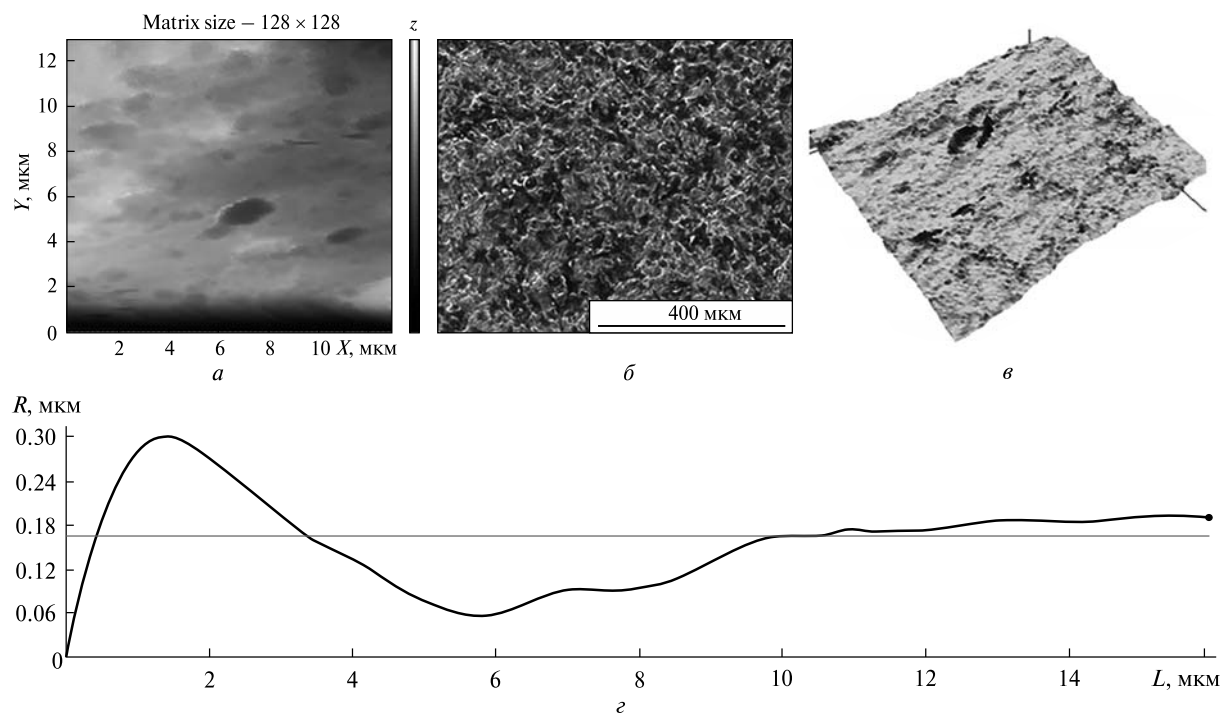


Рис. 3. Зображення ділянки поверхні ( $13 \times 13 \text{ мкм}$ ) зразка AlN, що не піддавався умовам екстремального середовища:  $a$  — отримане методом АСМ (NT-206),  $b$  — методом РЕМ (JSM-6700F),  $в, г$  — відновлене 3D-зображення цієї ділянки та її профілограма

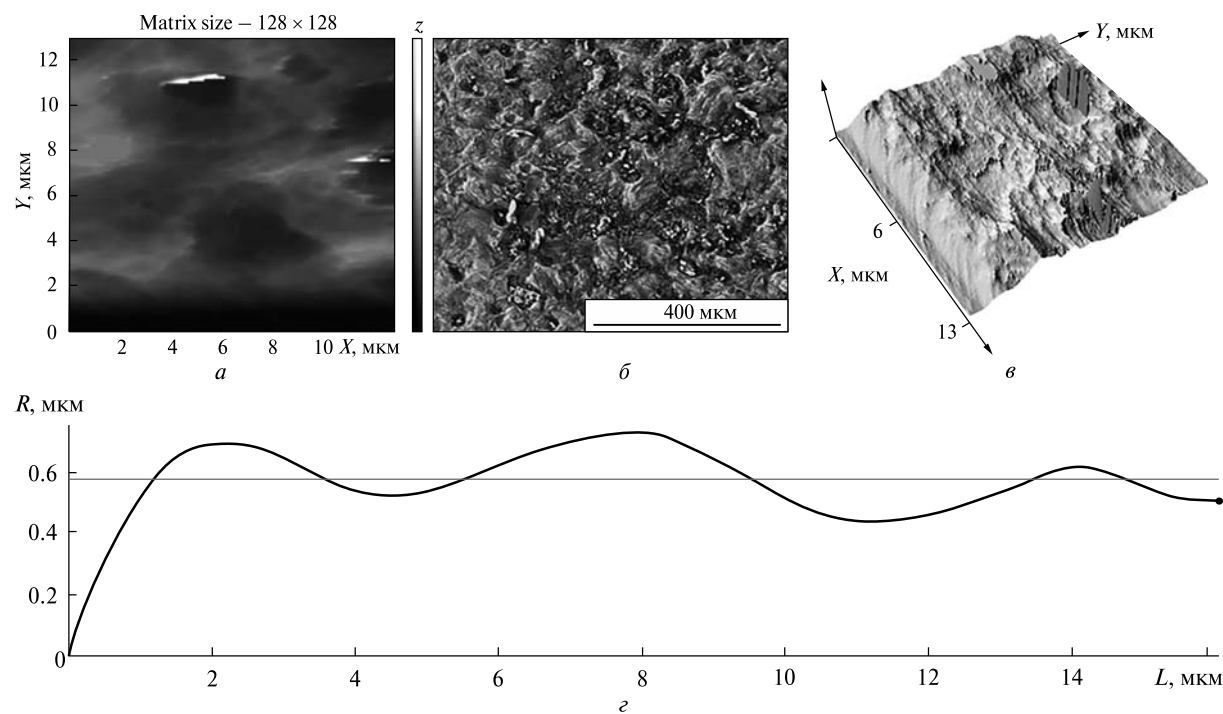


Рис. 4. Те ж для зразка AlN, що протягом тривалого часу піддавався умовам екстремального середовища

Порівняльна оцінка результатів вимірювань нанорельєфу здійснювалася шляхом порівняння отримуваних результатів з результатами, отриманими методом растрової електронної мікроскопії (JEOL JSM-6700F) в Центрі колективного користування українського представництва «Токуо-Воекі» (м. Київ), як найближчого методу діагностування рельєфу поверхонь.

Так, порівнюючи результати, отримані методами АСМ та РЕМ (рис. 3, 4, а, б), в цілому видно ідентичність зовнішнього вигляду поверхні досліджуваних зразків. Проте метод АСМ має ширші можливості, ніж метод РЕМ, а саме: можливість отримання високоточного 3D-зображення досліджуваної поверхні та профілограми її перерізу (рис. 3, 4, в, г).

Контроль точності, надійності та збіжності досліджуваного нанорельєфу методом АСМ здійснювався шляхом сканування поверхні калібрувальної решітки TGZ1 (період решітки —  $3 \pm 0.05$  мкм) в кількості 40 циклів сканувань з подальшим аналізом якості отримуваних результатів.

Отримані результати оцінки надійності та відтворюваності результатів дослідження нанорельєфу поверхонь досліджуваних зразків зведені в табл. 1.

Таким чином, за результатами оцінки точності, надійності та збіжності результатів дослі-

**Таблиця 1. Максимальні значення показників надійності та відтворюваності результатів експериментальних досліджень нанорельєфу зразків нітриду алюмінію**

Зразок	Похибка вимірювань, %	Надійність, кількість циклів вимірювання	Похибка відтворюваності результатів, %	Похибка збіжності результатів, %
<i>AlN, без впливу екстремального середовища</i>				
Зразок 1	5	46	2	3
Зразок 2	4.8	50	7	6
Зразок 3	5.1	50	4	5
<i>AlN, після впливу екстремального середовища протягом 120...140 год</i>				
Зразок 4 (120 год)	7.8	53	15	5
Зразок 5 (130 год)	8.5	48	18	6
Зразок 6 (140 год)	8.9	49	22	5

дження можна стверджувати про доцільність використання методу АСМ для дослідження стану поверхні. Водночас по результатах оцінок відтворюваності за їхнім порівнянням з результатами, отриманими методом РЕМ, спостерігається суттєве відхилення їхніх значень для зразків, що підлягали впливу екстремального середовища протягом тривалого часу.

### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті досліджень стану поверхонь зразків AlN, що знайшли активне застосування у виробках космічної техніки, встановлено залежності точності вимірювання рельєфу поверхні (розбіжність відносної похибки вимірювання мікронерівності досліджуваних поверхонь) від часу експлуатації зразків в екстремальних умовах.

Як видно із залежностей, представлених на рис. 5, зі збільшенням часу експлуатації зразків в екстремальних умовах розбіжність відносної похибки вимірювання мікронерівності збільшується від початкового значення (порядку 5 %) до граничного, що максимально відповідає 8.9 % при значенні часу експлуатації 140 год. Така висока розбіжність, на думку авторів, пов'язана з певними обмеженнями точного визначення мікронерівностей поверхні зі збільшенням перепадів її висот, яке відбувається внаслідок хімічного та фізико-механічного руйнування цієї поверхні у процесі її експлуатації в умовах підвищених температур та різких перепадів тиску.

При цьому відхилення точності вимірювання рельєфу поверхні нітриду алюмінію протягом усього часу експлуатації зразків відбувається за законом, близьким до лінійного. Водночас для зразків, досліджених методом РЕМ, закономірність розбіжності відносної похибки вимірювання мікронерівності має вигляд степеневого рівняння і збільшується незначно (з 14.3 до 14.7...15.2 %).

При порівнянні АСМ-зображень поверхонь зразків AlN із зображеннями, отриманими методом РЕМ, на останніх візуально спостерігалася вища якість отримуваних зображень. При цьому більш високоточні та надійні чисельні дані про характеристики поверхні цих зразків були отримані методом АСМ. Це дозволяє стверджувати,

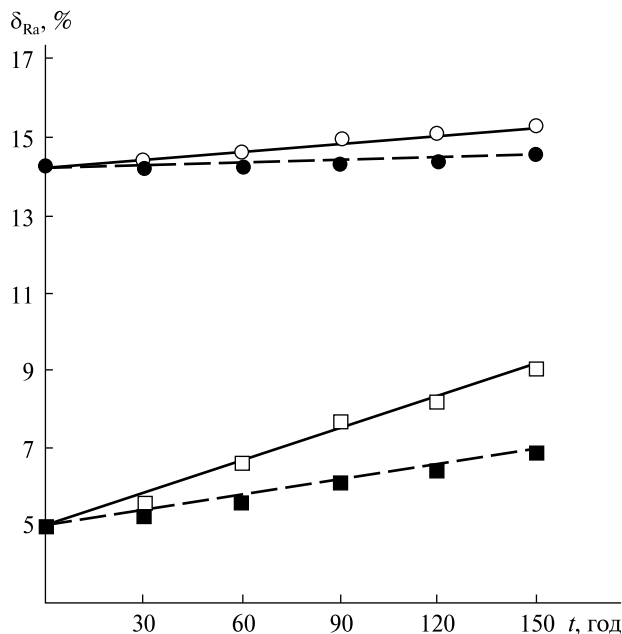


Рис. 5. Залежності точності вимірювання рельєфу поверхні від терміну  $t$  експлуатації зразків в екстремальних умовах. Розбіжність відносної похибки вимірювання мікронерівності досліджуваних поверхонь: квадратики — оцінки, отримані методом АСМ; кружечки — методом РЕМ

що для отримання якісних даних, які мають максимальну інформативність про стан поверхні, слід застосовувати комбіноване дослідження з використанням можливостей як методу РЕМ, так і методу АСМ.

## ВИСНОВКИ

В результаті порівняння результатів дослідження матеріалів космічної техніки методами РЕМ та АСМ показано, що роздільна здатність методу РЕМ більша, проте вертикальне сканування,

а також дослідження фізико-механічних властивостей поверхонь цим методом неможливе. У зв'язку з цим метод АСМ є найбільш універсальним та перспективним видом мікроскопії, що знайшов широке застосування не лише при дослідженні мікрогеометричних параметрів, але й для визначення механічних характеристик поверхонь як провідників, так і діелектриків.

Встановлено переважні особливості процесу дослідження рельєфу поверхонь матеріалів методом АСМ шляхом удосконалення матеріально-технічної та методичної бази цього методу, і які полягають у можливості високоточного позиціонування вимірювального інструмента (з точністю визначення заданої ділянки до 40 нм); автоматичне коригування швидкості досліджень; усунення викривлення отриманого зображення досліджуваної ділянки тощо.

Досліджено, що середні арифметичні значення мікронерівностей поверхонь нітриду алюмінію, отримані методом АСМ, лежать в діапазоні від  $R_a = 147$  нм (середньостатистичне значення мікронерівностей  $R_q = 163$  нм) для зразків, що не піддавалися умовам екстремального середовища, до  $R_a = 381$  нм (середньостатистичне значення мікронерівностей  $R_q = 422$  нм) — для зразків, що піддавалися протягом тривалого часу (120...140 год) дії екстремального середовища, що імітує космічні умови (температура 550 °С, тиск 6.8...7.2 мкбар). Максимальна пористість у поверхневому шарі (до 1.5 мкм) цих зразків з нітриду алюмінію становить 3...5.2 %.

Грунтуючись на отриманих результатах, в подальшому планується продовжити дослідження поверхневих властивостей різноманітних матеріалів космічної техніки методом АСМ.

## REFERENCES

1. Antonyuk V. S., Tymchuk H. S., Bondarenko Yu. Yu., et al. (2013). *Microscopy methods and tools*. Kyiv: NTUU «KPI», 336 p. [in Ukrainian].
2. Barbarini E., Villamor A. (2019). The power of electronics. *I-Micronews*. URL: [https://www.i-micronews.com/the-power-of-electronics/?utm\\_source=Zoho\\_Campaigns&utm\\_campaign=iMN13Sept2019Asia&utm\\_medium=email&cn-reloaded=1](https://www.i-micronews.com/the-power-of-electronics/?utm_source=Zoho_Campaigns&utm_campaign=iMN13Sept2019Asia&utm_medium=email&cn-reloaded=1) (Last accessed: 23.09.2022).
3. Belyanin A. F., Bouilov L. L., Zhirnov V. V., et al. (1999). Application of aluminum nitride films for electronic devices. *Diamond and Related Materials*, **8** (2–5), 369–372.
4. Birdi K. S. (2003). *Scanning probe microscopes. Application in science and technology*. Florida: CRC Press LLC, 328 p. [in English].
5. Bondarenko M. A., Bondarenko J. J., Shelestovskaya S. A. (2011). Research of Influence of the State of Surface of Probes for AFM on Exactness and Quality of the Topograms. *Electronics and Nanotechnology*, 60.
6. Bondarenko M. O., Bondarenko Yu. Yu., Antonyuk V. S. (2015). Prospects of using the atomic force microscopy method to study the condition and physical and mechanical characteristics of the surfaces of precision engineering products. *Bull. Lviv Polytechnic Nat. Univ. Ser.: Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrument engineering*, 822, 72–77 [in Ukrainian].
7. Chizhik S. A., Sviridenok A. P., Suslov A. A. (2009). Eyes and hands of nanotechnology. *Sci. innov.*, **3**, 53–55 [in Russian].
8. Ghidini T. (2018). Materials for space exploration and settlement. *Nature Mater.*, **17**, 846–850.
9. Giessibl F. (2003). Advances in Atomic Force Microscopy. *Revs Modern Phys.*, **75** (3), 949–983.
10. Itsenko A. I., Shevchenko A. I., Bogdan G. A. (2019). Controlling the uniformity of the distribution of strength characteristics in aluminum nitride materials based on the results of acoustic measurements. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Ser. tekhnichni nauky.*, **30** (69), 51–55 [in Ukrainian].
11. Jalili N., Laxminarayana K. (2004). A review of atomic force microscopy imaging systems: application to molecular metrology and biological sciences. *Mechatronics*, **14**, 907–945.
12. Magonov S. N., Myung-Hwan Whangbo (2008). *Surface analysis with STM and AFM: Experimental and theoretical aspects of image analysis*. Oxford, UK: Wiley, 335 p.
13. Miria M. (2018). NTRS — NASA Technical reports server: Aerospace materials and applications. Finckenor, US: NASA Marshall Space Flight Center Huntsville, 145 p.
14. Nanotechnology in Space With nanosurf atomic force microscope looking for life on Mars as part of Phoenix Mars mission (Jun. 6 2008). URL: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2183> (Last accessed: 23.09.2022).
15. NT-MDT (2021). URL: [http://www.ntmdt-tips.com/catalog/gratings/afm\\_cal/products.html](http://www.ntmdt-tips.com/catalog/gratings/afm_cal/products.html) (Last accessed: 23.09.2022).
16. Plath A. (2022). Atomic Force Microscopy (AFM) in Scanning electron microscopy (SEM): Innovation combines both technologies in real-time. *BioTrib* (Apr. 28 2022). URL: <https://biotrib.eu/atomic-force-microscopy-afm-in-scanning-electron-microscopy-sem-innovation-combines-both-technologies-in-real-time/> (Last accessed: 23.09.2022).
17. Schonberg W. P. (1992). Aluminum 2219-T87 and 5456-H116: A comparative study of spacecraft wall materials in dual-wall structures under hypervelocity impact. *Acta Astronautica*, **26** (11), 799–812.
18. Skoryna E., Medyanik V., Bondarenko M., et al. (2018). The investigation of the nanoreliefs of optical elements of measuring instruments, which modified by electron-beam microprocessing. *Innovations*, **1**, 30–33.
19. Tachikawa S., Nagano H., Ohnishi A., et al. (2022). Advanced passive thermal control materials and devices for spacecraft: A review. *Int. J. Thermophys.*, **43**, 91.
20. West P. (2013). Introduction to atomic force microscopy: Theory, practice and applications. URL: <http://www.AFMUniversity.org/> (Last accessed: 23.09.2022).
21. Wiesendanger R. (1994). *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy*. Cambridge, UK: Univ. Press, 625 p.
22. Zhong F., Changhe H., Danylyuk Yu., Auner G. (2000). Development of an AlN deep UV detector for space application. *MRS Proceedings*, 639 p.

Стаття надійшла до редакції 23.09.2022

Після доопрацювання 09.10.2022

Прийнято до друку 17.10.2022

Received 23.09.2022

Revised 09.10.2022

Accepted 17.10.2022



*O. I. Shevchenko*<sup>1</sup>, interim Head of Scientific and Technical Department, Dr. Sci. in Tech., Senior Researcher

*A. I. Itsenko*<sup>2</sup>, Senior Researcher

*M. O. Bondarenko*<sup>3</sup>, Dr. Sci. in Tech., Professor, Head of Department

<sup>1</sup> Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine

27, Akademik Zabolotny Str., Kyiv, 03143 Ukraine

<sup>2</sup> I. M. Frantsevich Institute for Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine

3 Krzhizhanovsky Str., Kyiv, 03142 Ukraine

<sup>3</sup>Cherkasy State Technological University

460 Shevchenko Blvd, Cherkasy, 18006 Ukraine

#### PECULIARITIES AND ADVANTAGES OF STUDYING THE SURFACES OF SPACE TECHNIQUE MATERIALS BY ATOMIC FORCE MICROSCOPY

The article presents the advantages of the atomic force microscopy (AFM) method as one of the most versatile and promising methods for studying the surfaces of space engineering materials. A comparison of the results of the study of such materials using the example of aluminum nitride (AlN) by the methods of scanning electron microscopy (SEM) and AFM was carried out. As a result of the comparison, it was established that, despite the higher resolution of the SEM method, its main disadvantages are the impossibility of vertical scanning of surfaces and the lack of an opportunity to study their physical and mechanical properties. The main features of the process of studying the topography of surfaces using the AFM method have been established. They are the possibility of high-precision positioning of the measuring instrument (with the accuracy of determining a given area — up to 40 nm), elimination of distortion of the obtained image of the studied area, and automatic correction of the research speed. The arithmetic mean values of the micro-roughnesses of the aluminum nitride surfaces obtained by the AFM method were determined both for samples that were not exposed to extreme environmental conditions ( $R_a = 147$  nm;  $R_q = 163$  nm) and samples that were exposed to extreme environmental conditions for a long time (120...140 hours), which simulates space conditions (temperature 550 °C, pressure 6.8...7.2 μbar) ( $R_a = 381$  nm;  $R_q = 422$  nm). The maximum porosity in the surface layer (up to 1.5 μm) of aluminum nitride samples was also determined in the range of 3...5.2%.

**Keywords:** atomic force microscopy, aluminum nitride, space engineering materials, surface nanorelief.