



УДК 621.9.01:620.178.7

MECHANICAL PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER OF CUBIC BORON NITRIDE-BASED COMPOSITES

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ

Klymenko S.A./ Клименко С.А.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0003-1464-3771

Zakiyev V.I./ Закієв В.І.*c.t.s. / к.т.н***Manokhin A.S./ Манохін А.С.***c.t.s., senior researche. / к.т.н., ст. досл.*

ORCID: 0000-0003-1479-8482

Melniychuk Yu.O./ Мельничук Ю.О.*c.t.s., senior researche. / к.т.н., с.н.с.*

ORCID: 0000-0002-5982-8983

Koreykina M.Yu./ Копейкіна М.Ю.*c.t.s., senior researche. / к.т.н., с.н.с.*

ORCID: 0000-0002-5956-5503

Klymenko S.An./ Клименко С.Ан.*c.t.s., senior researche. / к.т.н., ст. досл.*

ORCID: 0000-0002-7913-5519

Chumak A.O./ Чумак А.О.*c.t.s. / к.т.н.*

ORCID: 0000-0001-9054-3196

Ryabchenko S.V./ Рябченко С.В.*c.t.s. / к.т.н.*

*V. Bakul Institute for Superhard Materials, Kyiv, Avtozavodska 2, 04074
Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ, Автозаводська 2, 04074*

Анотація. У роботі представлено результати визначення механічних (властивостей міцності та деформаційних властивостей) властивостей поверхневого шару зразків композитів на основі кубічного нітриду бору (cBN), що використовуються для роботи в умовах високих термобаричних навантажень з тертям. Показано, що для оцінки працездатності таких композитів недостатньо враховувати лише їх об'ємні механічні характеристики – вирішальне значення мають параметри поверхневого шару, які визначають процеси тертя, зношування та зародження тріщин. У статті обґрунтовано вибір скретч-тестування (склерометрії) як комплексного методу визначення механічних властивостей поверхневого шару зразків матеріалів. Розглянуто трибо- та деформаційно-спектральний аналізи, багатопрохідне тестування на подряпини зразків композитів різного складу, визначено параметри контактної взаємодії індентора з досліджуванним поверхневим шаром, а також проаналізований зв'язок між отриманими спектральними, термодинамічними параметрами сканування, силовими та геометричними параметрами контактної взаємодії індентора з досліджуванним поверхневим шаром зразків композитів, твердістю та станом їх структури. Запропоновано підходи до ранжирування працездатності різних композитів на основі отриманих показників сканування їх досліджуваного поверхневого шару. Результати роботи можуть бути використані для оптимізації складу та технології виготовлення композитів на основі cBN.



Ключові слова: композити, кубічний нітрид бору (cBN), поверхневий шар, механічні властивості, склерометрія, трибо-спектральний аналіз, деформаційно-спектральний аналіз, багатопрохідне тестування на подряпини, твердість, зносостійкість.

Вступ.

Відомо, що об'ємні механічні характеристики матеріалів інструментів, що контактують з оброблюваним матеріалом в зоні обробки, далеко не завжди визначають працездатність інструментів, що працюють в умовах високих термобаричних навантажень при інтенсивному терті. При виборі найбільш зносостійкого матеріалу для таких інструментів необхідно враховувати сукупність деформаційних і міцнісних властивостей їх поверхневого шару.

Проблема зносу технологічного інструменту не повинна розглядатися ізольовано від загальної проблеми тертя і зношування. Тому при виборі інструментального матеріалу можуть бути використані методи і методики, що застосовуються при вивченні процесів тертя і зношування.

Дослідження механічних властивостей матеріалів є ключовим елементом для розуміння їх поведінки під навантаженням та прогнозування експлуатаційної надійності. Розроблено широкий спектр методів, що дозволяють визначати твердість, модуль пружності, залишкові напруження, а також характеристики пластичної деформації та пошкодження. Сучасні підходи до досліджень поверхневої міцності матеріалів можна умовно поділити на інструментальні методи: наноіндентування, мікроіндентування, скретч-тестування (склерометрія), методи вимірювання залишкових напружень, експериментально-розрахункові підходи та чисельне моделювання.

Загалом, поєднання методів наноіндентування та склерометрії дозволяє комплексно оцінювати механічні характеристики поверхневих шарів, включаючи мікротвердість, залишкові напруження, енергію пластичної деформації та контактну адгезію. Це робить такі методи особливо корисними для дослідження механічних властивостей поверхневого шару композитів, що відповідає сучасним тенденціям у машинобудуванні та матеріалознавстві.

Методи визначення механічних властивостей суттєво відрізняються за



масштабом досліджуваного матеріалу, точністю та типом інформації, яку вони надають.

Наноіндентування сьогодні є одним із найпоширеніших методів для визначення твердості та модуля Юнга в поверхневих шарах і тонких покриттях. Воно особливо корисне для дослідження мікрооб'єктів, де традиційні випробування (наприклад, розтяг чи вигин) неможливі [1, 2]. Основною перевагою є висока локальна роздільна здатність та можливість дослідження дуже тонких шарів. Проте метод має і недоліки: результати значною мірою залежать від правильного калібрування обладнання, впливу тертя між індентором і досліджуванним матеріалом, а також ефектів pile-up або sink-in, що можуть викривляти дані про площу відбитка й, відповідно, про твердість.

Мікроіндентування та класичні методи визначення твердості (Віккерса, Кнупа) дозволяють отримати середні значення твердості на більшому об'ємі матеріалу [3-5]. Вони менш чутливі до похибок глибини індентування, але не підходять для дослідження дуже тонких покриттів. До того ж, мікроіндентування не завжди дає можливість точно визначати модуль пружності – переважно вона використовується саме для оцінки твердості.

Скретч-тестування застосовують для визначення адгезійної міцності покриттів, їх стійкості до відшарування та механічного пошкодження [6-8]. Його обмеженням є складність точної кількісної інтерпретації результатів – момент руйнування може залежати від шорсткості зразка, умов навантаження та геометрії індентора. Крім того, метод чутливий до неоднорідностей у матеріалі та вимагає серії випробувань для отримання статистично достовірних результатів.

Методи визначення залишкових напружень (рентгенівська дифракція, метод зняття шару, інструментальні підходи) дозволяють оцінити стан напружень, який суттєво впливає на довговічність деталі [9, 10]. Інструментальні методи на базі наноіндентування забезпечують локальне зондування, але дають лише непрямі оцінки залишкових напружень і вимагають складної інтерпретації. Рентгенівські методи, навпаки, досить точні, але потребують дорогого



обладнання і не завжди застосовні до деталей складної форми.

Експериментально-розрахункові та чисельні методи (FEM, crystal plasticity) поєднують результати вимірювань із моделюванням, дозволяючи оцінювати розподіли напружень і деформацій в об'ємах, недоступних для прямого експерименту. Перевагою є можливість прогнозування поведінки матеріалу в різних умовах навантаження, проте точність залежить від коректності моделей і параметрів, що в них закладені.

Методи визначення опору деформації при механічній обробці є незамінними для дослідження технологічних процесів обробки матеріалів, адже дозволяють оцінювати вплив режимів різання на формування залишкових напружень і якість поверхні [11, 12]. Недоліком є складність прямих вимірювань параметрів різання в умовах промислового процесу, необхідність створення достовірних математичних моделей та врахування впливу температури й зносу інструменту.

Таким чином, кожен із розглянутих методів має свою сферу оптимального застосування.

Дослідження механічних властивостей надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору (cBN) є складним завданням через їхню надзвичайно високу твердість, крихкість та неоднорідну мікроструктуру. Традиційні методи випробувань – такі як розтяг, вигин чи навіть наноіндентування – часто не дозволяють отримати достатньо репрезентативні результати.

Скретч-тестування є доцільним вибором для таких матеріалів з кількох причин: комплексна характеристика механічної поведінки матеріалу. Скретч-тест не лише вимірює опір пластичній деформації, а й дозволяє оцінити тріщиностійкість, адгезійну міцність та схильність матеріалу до руйнування. Для композитів на основі cBN важливо враховувати не лише твердість матеріалу, а й якість з'єднання між зернами cBN та з матрицею. Скретч-тестування надає інтегральну оцінку цих властивостей та дозволяє провести аналіз механізмів руйнування – під час випробування можна спостерігати зародження і розвиток тріщин, відшарування, відколювання зерен, що надає інформацію про домінуючі



механізми деградації композиту. Такі дані складно отримати за допомогою звичайного індентування.

Недоліки методу також слід враховувати: результати можуть залежати від шорсткості поверхні, геометрії індентора та режиму навантаження, що вимагає ретельної стандартизації умов випробувань. Проте при правильному підході скретч-тестування дає цінну кількісну й якісну інформацію, яку складно отримати іншими методами.

Таким чином, використання скретч-тестування для визначення механічних властивостей надтвердих cBN-композитів є науково й технологічно обґрунтованим: воно дозволяє оцінити комплекс характеристик матеріалу, наближених до умов реальної експлуатації, з мінімальними вимогами до кількості зразків та без необхідності руйнування всього виробу.

Основний текст.

Для вирішення зазначеного завдання перспективним методом є варіанти склерометрії, засновані на скануванні поверхневого шару досліджуваного матеріалу нормально навантаженим індентором (P) і фіксації сили опору його переміщенню. Це мікромеханічний неруйнівний метод дослідження, призначений для оцінки механічних параметрів поверхневого шару при статистичній обробці великої кількості отриманих даних і може бути використаний для прогнозування експлуатаційних властивостей, зокрема зносостійкості досліджуваних об'єктів.

Деякі з варіантів методу склерометрії: – трибо-спектральний аналіз [13], деформаційно-спектральний аналіз [14], багатопрхідне тестування на подряпини [7].

Результати подаються у вигляді діаграм навантаження, обробка яких дозволяє визначати мікротвердість, вивчати особливості кінетики мікродеформацій від застосування індентора, реєструвати мікроповзучість, вимірювати пружність матеріалів, проводити ранжування гами матеріалів за визначеною ознакою.

В основі першого варіанту лежить явище структурної чутливості



трибометричних характеристик, пов'язане з неоднорідністю напружено-деформованого стану гетерогенного поверхневого шару, що визначає спектральний характер формування сил тертя у зв'язку з немонотонним поширенням пружно-пластичних деформацій через структурні перешкоди при контактній взаємодії.

При трибо-спектральних дослідженнях поверхневий шар досліджуваного об'єкта сканується алмазним індентором в режимі пружно-пластичного деформування і вимірюються статистичні характеристики опору його переміщенню. Під час руху індентор коливається в режимі вимушених коливань, характер яких визначається структурним станом матеріалу. Для обробки та представлення результатів оцінки властивостей поверхневих шарів матеріалів використовується апарат кореляційного та спектрального аналізів випадкових процесів. Контролювалися наступні характеристики структури і міцності поверхневого шару: m – математичне очікування тангенціальної складової сили контактної взаємодії індентора з поверхневим шаром, що є аналогом оцінки мікротвердості матеріалу; D – дисперсія сили контактної взаємодії, що характеризує розкид середньої потужності, що витрачається на деформування поверхневого шару; S – енергетична спектральна щільність розподілу сили контактної взаємодії, що характеризує особливості деформованого поверхневого шару у зв'язку з розміром областей рівної міцності або однакового рівня напруженого стану, а також зміни деформаційних і міцнісних властивостей поверхневого шару вздовж траси сканування; f_{50} – середня частотна гармоніка, що відповідає 50%-ному рівню енергії процесу контактної взаємодії, тобто ділить спектр процесу на дві рівні за площею частини, що відповідає рівності енергій низько- і високочастотних складових спектра; f – сумарна частота, що відповідає всьому спектру процесу.

Представивши модель поверхневого шару як систему випадково розподілених структурно-енергетичних бар'єрів різної потужності, що перешкоджають поширенню пружно-пластичних деформацій, можна оцінити зміни однорідності міцнісних і деформаційних властивостей поверхневого шару



комплексом чисельних характеристик.

Показники, отримані при деформаційно-спектральному аналізі, мають термодинамічну інтерпретацію: A – величина активаційного бар'єру, перевищення якого запускає процес виробництва ентропії в деформованому обсязі поверхневого шару (максимальна амплітуда тангенціальної сили контактної взаємодії на структурному об'єкті); D – дисперсія сили контактної взаємодії для досліджуваної сукупності структурних об'єктів поверхневого шару.

З урахуванням величини активаційного бар'єру, перевищення якого запускає механізм виробництва ентропії, визначається ентропійне рівняння ресурсу досліджуваного поверхневого шару виробу.

Тривалість проміжку часу до досягнення поверхневим шаром стану точки біфуркації визначається співвідношенням її початкової дефектності та швидкістю збільшення дефектності структури в процесі експлуатації. Ранжування матеріалів виробів за їх довговічністю може бути проведено на основі порівняння дисперсій сили контактної взаємодії їхнього поверхневого шару з індентором, отриманої при склерометрії.

Процедура багатопрохідного тестування на подряпини на відміну від однопрохідного сканування досліджуваного поверхневого шару при трибо-спектральному та деформаційно-спектральному аналізах дозволяє отримати більш достовірні результати досліджень – усувається вплив шорсткості поверхні досліджуваного зразка та отримані показники дозволяють аналізувати зміну властивостей досліджуваного поверхневого шару від кількості актів деформування. В якості характеристик для оцінки механічних властивостей поверхневого шару зразків на отриманих вздовж траси сканування трибограмах (сукупність значень сили контактної взаємодії), склерограмах (сукупність значень глибини втілення індентора) і профілограмах (сукупність ординат профілю по центру подряпини) можна використовувати такі значення: різниця між кривими, частка їх ділення одна на одну, інтеграл кривої по довжині траєкторії подряпини, автокореляція, спектральна щільність кривих, тіснота



кореляції між кривими.

Багатопрхідне тестування може бути поєднано із методом безперервного вдавлювання індентора, який ґрунтується на автоматичній реєстрації навантаження (P) на індентор та глибини його занурення (h). Результати подаються у вигляді діаграми навантаження, обробка якої дозволяє проводити випробування на мікротвердість, вивчати особливості мікродеформації з кінетики застосування індентора, реєструвати мікроповзучість, вимірювати пружність матеріалів. Методичні основи визначення твердості та модуля пружності за діаграмами впровадження базуються на методі Oliver W.C., Pharr G. та прийнятого як міжнародний стандарт (ISO/FDIS 14577-1: 2002).

Розглянемо результати, отримані для гама надтвердих композитних матеріалів на основі кубічного нітриду бору (сBN), з використання наведених методів дослідження. Ці композити знайшли широке використання в робочих елементах технологічних інструментів для обробки різанням та зварюванням тертям з перемішуванням та до яких висувуються високі вимоги щодо опору термобаричному навантаженню від процесів інтенсивного тертя у контактних зонах.

Отримані результати дозволяють пояснити підвищення стійкості інструменту в результаті доведення його поверхонь (таблиця 1). Хоча шліфовані та доведені поверхні мають комбіновану структуру з переважанням великофрагментних ділянок, графіки зміни енергетичної спектральної щільності показують, що доведені поверхні характеризуються великим опором контактній взаємодії. Математичне очікування сили контактної взаємодії m у доведених поверхнях також збільшується.

Дисперсія сили контактної взаємодії D для доведених поверхонь зростає, тобто в результаті доведення поверхні зразків гетерогенність їх поверхневого шару зростає, але його структурні елементи зміцнюються. Це пояснюється наявністю зв'язки на межі зерен сBN, вплив якої на міцнісні та деформаційні властивості поверхневого шару композитного зразка після доведення є більш значущим, ніж після шліфування. В результаті меншої міцності зв'язки в



порівнянні з зернами cBN, значення дисперсії сили опору контактній взаємодії D збільшується.

Таблиця 1 – Параметри* трибо-спектрального аналізу поверхневого шару композитів

Композит на основі cBN	m , Н	f , МГц	f_{cp} , МГц	$D \cdot 10^{-4}$, Н ²
Кіборит	0,86/2,95	9/40	41/21	2,1/12
Ниборит	0,81/2,9	13/26	41/48	30/60
BZN Comрах	0,89/2,85	19/13	80/70	4,4/27

*чисельник, знаменник – шліфувана і доведена поверхня відповідно; навантаження 0,2 Н, швидкість переміщення індентора 2,64 мкм/с.

Оскільки досліджувані матеріали мають різні механічні властивості, порівняти їх між собою необхідно за питомими параметрами, тобто за параметрами, віднесеними до одиниці площі контакту індентора з досліджуваним зразком композиту.

З огляду на те, що сканування поверхневого шару надтвердих композитів проводиться в умовах, коли переважає пружна взаємодія, площа контакту сферичного індентора з досліджуваним зразком (рисунок 1) визначається як:

$$F = 2,6 \left(\left\{ R \left[\left(1 - \mu^2 \right)^2 \frac{P}{E} \right] \right\}^{2/3} + h_y \right) \quad (1)$$

де P , R – навантаження і радіус індентора відповідно; E , μ – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона досліджуваного матеріалу відповідно; h_y – пружне відновлення матеріалу зразка.

Результати розрахунку питомих параметрів трибо-спектрального аналізу поверхневого шару зразків ряду композитів на основі наведені в таблиці 2.

При одному і тому ж нормальному навантаженні на індентор зі збільшенням твердості композиту зростає і питома сила опору переміщенню індентора. Таким чином твердість досліджуваних композитів можна оцінювати шляхом сканування їх поверхонь індентором в умовах пружно-пластичного

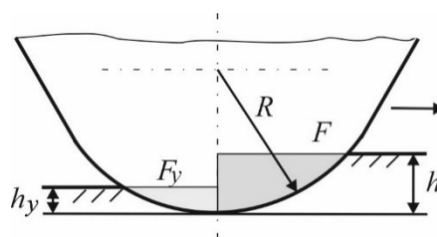


Рисунок 1 – Схема контактної ділянки індентора з досліджуваним поверхневим шаром зразка: R – радіус індентора; h , h_y – глибина втілення індентора і величина пружнього відновлення матеріалу після проходу індентора відповідно; F , F_y – площі контакту індентора з досліджуваним поверхневим шаром у напрямку руху і контакту індентора з ділянкою пружнього відновлення матеріалу відповідно

Таблиця 2 – Механічні властивості та питомі параметри трибо-спектрального аналізу поверхневого шару композитів

Композит на основі cBN	E , ГПа	μ	НК, ГПа	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}	$F_i/F_{киб}$	m' , Н	$D_i \cdot 10^4$, Н ²	$f_{cp} \cdot 10^4$, мГц
Amborite	680	0,22	28,5	6,32	1,17	1,75	0,93	3,8
Кіборит	880	0,16	32,4	8,16	1,0	2,23	0,1	2,8
Композит 02	720	0,16	35,0	–	1,14	1,86	0,16	2,6
Композит 05	620	0,15	18,5	4,58	1,26	1,72	0,35	2,6
Композит 10	715	0,16	36,2	5,83	1,15	2,36	0,03	6,0

контактування. Зв'язок між математичним очікуванням сили контактної взаємодії m' ($m' = mF_{киб}/F_i$, де $F_{киб}$ – площа контакту індентора з композитом «Кіборит»; F_i – площа контакту індентора з i -м матеріалом) і твердістю за Кнупом НК з похибкою біля 7% описується виразом:

$$m' = 4,1 \cdot 10^{-7} НК^4 - 1,28 \cdot 10^{-4} НК^3 - 9,95 \cdot 10^{-3} НК^2 - 0,23 \cdot НК \quad (2)$$

Аналіз результатів трибо-спектрального дослідження показує, що найбільшою зносостійкістю володіють композит 10 та Кіборит, які мають високі значення параметру m' при найменшому розкиді властивостей міцності (D).

Для оцінки працездатності інструментів, оснащених різними композитами,



в умовах ударних навантажень в аналіз потрібно включити параметри, що характеризують руйнування матеріалу, наприклад, коефіцієнт тріщиностійкості K_{1c} .

Поряд з вищевикладеним, дані деформаційно-спектрального аналізу можуть бути використані для оцінки відносної зносостійкості інструментальних матеріалів на основі ентропійного підходу, заснованого на аналізі термодинамічних характеристик матеріалу – величин активаційного бар'єру і здатності до виробництва ентропії.

З урахуванням навантаження, перевищення якого запускає механізм виробництва ентропії, отримуємо ентропійне рівняння ресурсу:

$$N = \left[([E] - E_o) / E_{cp} \right] / \int_{P_2}^{P_1} g(P) dP \quad (3)$$

де $[E]$ – критичне значення ентропії; E_o – величина ентропії у поверхневому шарі, що обумовлена історією виробу; E_{cp} – середня величина виробленої ентропії N – число актів навантаження; $g(P)$ – ймовірність розподілу величини навантаження; P_i – значення навантаження.

Скориставшись зв'язком між термодинамічною ентропією та інформаційною ентропією за Шенноном, отримуємо:

$$E_o = \sum_{i=1}^6 K_i E_i \quad (4)$$

де E_i – інформаційна ентропія, зумовлена ймовірнісним характером теплових коливань атомів, хімічного складу, деформацій поверхневого шару, шорсткості контактної поверхні; K_i – термодинамічна вага одного біта інформації,

З врахуванням того, співвідношення між окремими складовими ентропії в процесі функціонування виробу підпорядковується принципу мінімуму вільної енергії, з використанням даних склерометрії маємо:

$$[E] = \sum_{i=1}^6 K_i E_i + \frac{K}{TDt} \quad (5)$$

де t – проміжок часу; T – температура; D – дисперсія сили контактної взаємодії



поверхневого шару з індентором; K – постійна, яка враховує зв'язок між навантаженням індентора та його переміщенням.

З отриманого слідує, що тривалість проміжку часу до досягнення поверхневим шаром стану точки біфуркації визначається співвідношенням її початкової дефектності та швидкістю збільшення дефектності структури в процесі експлуатації.

Для забезпечення працездатності інструменту його поверхневий шар має володіти високим рівнем активаційного бар'єру, малою здатністю до утворення ентропії та дисперсією сили контактної взаємодії поверхневої кулі з індентором при склерометруванні.

На рис. 2 наведено результати, отримані при багатопрхідному тестуванні на подряпини зразків з композитів (сBN 97%+Si₃N₄ 3%), (сBN 90%+AlN, AlB₁₂ 10%), (сBN 55%+TiCN42%-Al3%), (сBN 50%+TiCN47%-Al3%). Як видно, ширина подряпини корелює з величиною мікротвердості досліджуваних зразків.

Якщо прийняти, що профіль діаметрального перетину контактної ділянки індентора з досліджуваним поверхневим шаром зразку у напрямку, перпендикулярному трасі сканування, співпадає із профілем доріжки тертя на поверхні зразку, можна зробити висновок, що у мовах, коли профіль індентора ще не змінюється за рахунок зносу, ширина доріжки тертя збільшується з часом навантаження за рахунок руйнування матеріалу досліджуваного поверхневого шару, пов'язаного із його деградацією. Останнє може проявитися, наприклад, в зменшенні модуля пружності матеріалу.

Аналіз величини математичного очікування тангенціальної складової сили контактної взаємодії з індентором дозволяє ранжувати композити на основі КНБ за механічними властивостями поверхневого шару. Наприклад, композити з близьким хімічним складом (сBN 55%+TiCN42%-Al3%) – 61,4% (ϵ); (сBN 50%+TiCN47%-Al3%) – 72,1% (ζ) різняться за цим показником – 3,65 і 4,35 Н відповідно. Це є підґрунтям для прогнозування більшої зносостійкості зразків з композиту з більшою кількістю сBN.

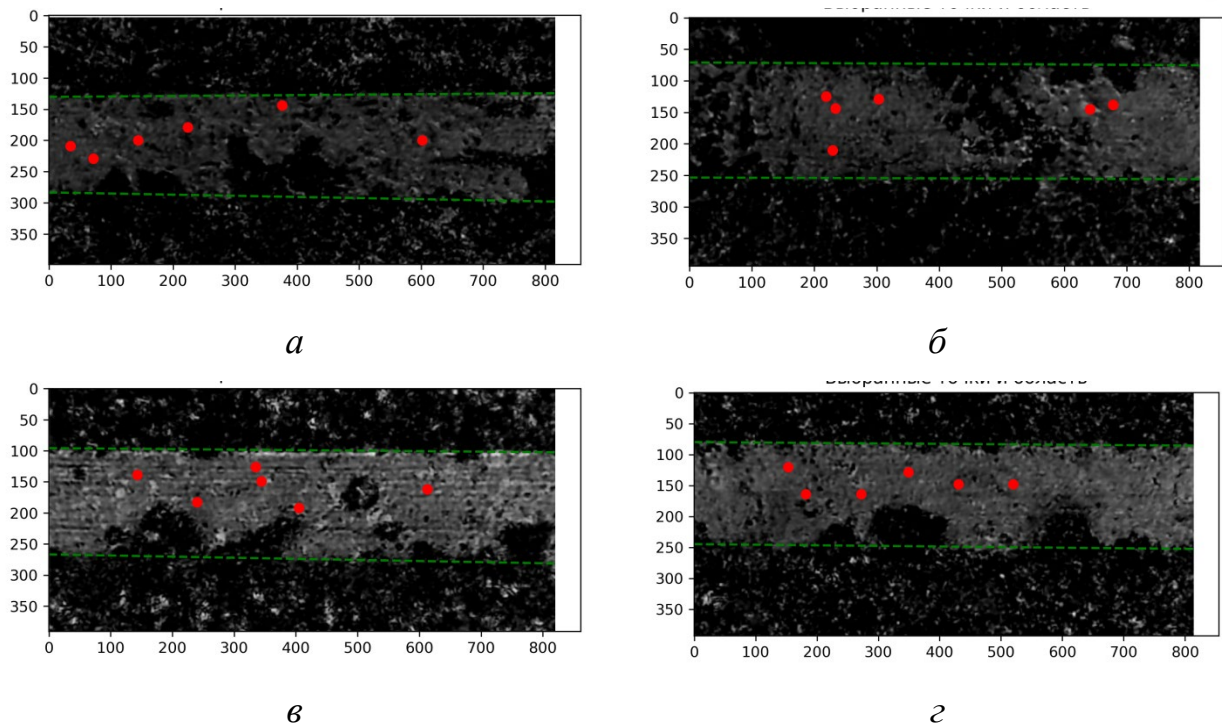


Рисунок 2 – Відносна площа доріжки тертя (час тертя – 30 с) в

поверхневому шарі зразку з композиту: $cBN\ 97\%+Si_3N_4\ 3\%$ – 43,4% (а); $cBN\ 90\%+AlN, AlB_{12}\ 10\%$ – 56,4% (б); $cBN\ 55\%+TiCN42\%-Al3\%$ – 61,4% (в); $cBN\ 50\%+TiCN47\%-Al3\%$ – 72,1% (г)

На рис. 3 наведено результати визначення кореляції між величинами сил тертя індентора із досліджуваним поверхневим шаром зразків композитів при багатопрохідному тестуванні на подряпини при першому та наступному проходах. Аналіз даних рисунку показує, що кореляція величин сили тертя зменшується при збільшенні кількості проходів індентора. Це свідчить про зміни у структурному стані досліджуваного поверхневого шару зразку композиту під дією деформаційного впливу від індентора. З врахуванням того, що поверхневий шар зразків композитів на основі cBN під дією індентора деформується переважно пружно, відмічене зменшення коефіцієнту кореляції пов'язано із пружним руйнуванням навантаженої ділянки поверхневого шару зразків композитів за рахунок формування тріщин та викришування частинок матеріалу.

При зменшенні твердості композиту за рахунок меншого вмісту cBN , коефіцієнт кореляції між величинами сил тертя індентора із досліджуваним



поверхневим шаром зразків композитів зменшується, що пов'язане з впливом на зміни у структурному стані матеріалу пластичної деформації складової TiCN.

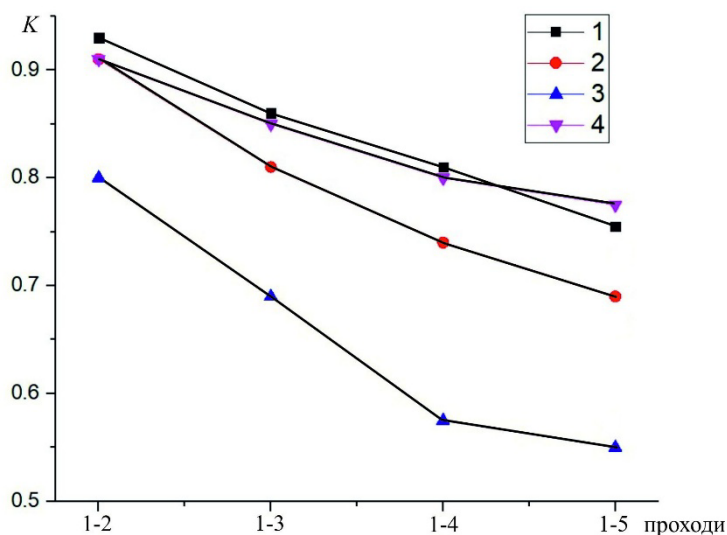


Рисунок 3 – Коефіцієнт кореляції K величин сил тертя між індентором та досліджуваним поверхневим шаром зразків композитів при багатопрохідному тестуванні на подряпини при першому та наступних 2, 3, 4, 5 проходах :

1 – cBN 97%+Si₃N₄ 3%; 2 – cBN 55%+TiCN42%-Al3%; 3 – cBN 50%+TiCN47%-Al3%; 4 – cBN 90%+AlN , AlB₁₂ 10%;

Потрібно врахувати експериментально підтверджений факт, який пов'язує зв'язок між величиною тангенціальної складової сили контактної взаємодії з індентором та структурою досліджуваного поверхневого шару [15]. Для цього на ділянці зразка композиту з заданим шагом зафіксовано декілька паралельних сканограм тангенціальної складової сили контактної взаємодії з індентором, які потрібно поєднати у єдину систему, отримав тим самим візуальну картину сукупності механічних властивостей ділянки досліджуваного поверхневого шару композиту. Фрактальний аналіз, виконаний для зображень візуальної картини сукупності механічних властивостей та структури металографічного шліфа поверхні тієї ж самої ділянки зразка показує, що їх фрактальні розмірності (розмірності Гаусдорфа-Безиковича) кореляційно пов'язані із коефіцієнтом



близьким до 0,99. Цій результат свідчить по те, що показники склерометрії обумовлені структурним станом досліджуваного поверхневого шару та можуть бути використані для його аналізу.

Наведені вище результати можуть бути використані для оптимізації складу та технології виготовлення різних композитів, у тому числі на основі cBN.

Висновки.

Розглянуто три, основані на методі склерометрії, підходи до визначення міцнісних та деформаційних властивостей поверхневого шару композитних матеріалів на приклади композитів на основі кубічного нітриду бору (cBN) – трибо-спектральний аналіз, деформаційно-спектральний аналіз, багатопрхідне тестування на подряпини.

Трибо-спектральний аналіз розглядає спектральний характер сил тертя у зв'язку з немонотонним поширенням пружно-пластичних деформацій через структурні перешкоди при контактній взаємодії індентора з досліджуваним поверхневим шаром зразка композиту. Деформаційно-спектральний аналіз базується на термодинамічної інтерпретації сканограм, отриманих при скануванні індентором досліджуваного поверхневого шару зразка композиту. При багатопрхідному тестуванні на подряпини усувається вплив шорсткості поверхні досліджуваного зразка та отримані показники дозволяють аналізувати зміну властивостей досліджуваного поверхневого шару від кількості актів деформування.

Розглянуто гама параметрів, які характеризують механічні властивості поверхневого шару зразків різних композитів на основі cBN и показана можливість ранжирування цих матеріалів як за механічними властивостями поверхневого шару та і за рівнем опору експлуатаційному навантаженню.

Отримані результати досліджень можуть бути використані для оптимізації складу та технології виготовлення різних композитів, у тому числі на основі cBN.

Література:

1. Shen Z. et al. Review of indentation size effect in crystalline materials:



Progress, challenges and opportunities. *J. of Mat. Res. and Technol.* 2024. Vol. 31. P. 117–132. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.06.071

2. Oliver W.C., Pharr G.M. Nanoindentation in materials research: Past, present, and future. *MRS Bull.* 2010. Vol. 35, no. 11. P. 897–907. DOI: 10.1557/mrs2010.717.

3. Harsono E., Swaddiwudhipong S., Liu Z.S. The effect of friction on indentation test results. *Model. and Simulat. in Mat. Sci. and Eng.* 2008. Vol. 16, no. 6. P. 065001. DOI: 10.1088/0965-0393/16/6/065001.

4. Mendas M. et al. Microhardness model based on geometrically necessary dislocations for heterogeneous material. *J. of Mat. Res. and Technol.* 2021. 15, 2792–2801. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.093.

5. Abu Al-Rub R.K. Prediction of micro and nanoindentation size effect from conical or pyramidal indentation. *Mech. of Mat.* 2007. Vol. 39, no. 8. P. 787–802. DOI: 10.1016/j.mechmat.2007.02.001.

6. Sun S. et al. Scratching force and material removal mechanism of 2.5D SiO₂f/SiO₂ composites under single-abrasive scratch test. *J. of Manufact. Proc.* 2025. Vol. 153. P. 16–28. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.08.058.

7. Storchak M., Zakiev I., Zakiev V., Manokhin A. Coatings strength evaluation of cutting inserts using advanced multi-pass scratch method. *Measurement.* – 2022. – Vol. 191. 110745. DOI: 10.1016 / j. measurement. 2022.110745.

8. Storchak M. Mechanical Characteristics Generation in the Workpiece Subsurface Layers through Cutting. *Crystals.* 2023. Vol. 13, no. 5. P. 761. DOI: 10.3390/cryst13050761.

9. Guo J. et al. Recent progress of residual stress measurement methods: A review / *Chin. J. of Aeronaut.* 2019. DOI: 10.1016/j.cja.2019.10.010.

10. Dean J., Aldrich-Smith G., Clyne T.W. Use of nanoindentation to measure residual stresses in surface layers. *Acta Mat.* 2011. Vol. 59, no. 7. P. 2749–2761. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.01.014.

11. Alaboodi A.S., Hussain Z. Finite element modeling of nano-indentation technique to characterize thin film coatings. *J. of King Saud University – Eng. Sci.* 2019. Vol. 31, no. 1. P. 61–69. DOI: 10.1016/j.jksues.2017.02.001.



12. Khan M.K. et al. A combined experimental and finite element approach for determining mechanical properties of aluminium alloys by nanoindentation. *Computat. Mat. Sci.* 2010. Vol. 49, no. 4. P. 751–760. DOI: 10.1016/j.commatsci.2010.06.018.

13. Zaporozhets V.V. Dynamic characteristics of the strength of surface layers and their evaluation. *Frict. and wear.* – 1980. – Vol. 1. – № 4. – P.602–609.

14. Lyashko V.A., Potemkin M.M., Klimenko S.A. Comparative durability of materials in wear. *Wear.* 1998. vol. 216. P. 239–243.

15. Клименко С.А., Мельничук Ю.О, Встовський Г.В. Фрактальна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту. Київ : ІНМ. 2009. 172 с.

References.

1. Shen Z. et al. (2024). Review of indentation size effect in crystalline materials: Progress, challenges and opportunities. *J. of Mat. Res. and Technol.* Vol. 31. P. 117–132. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.06.071

2. Oliver W.C. (2010). Pharr G.M. Nanoindentation in materials research: Past, present, and future. *MRS Bull.* Vol. 35, no. 11. P. 897–907. DOI: 10.1557/mrs2010.717.

3. Harsono E., Swaddiwudhipong S., Liu Z.S. (2008). The effect of friction on indentation test results. *Model. and Simulat. in Mat. Sci. and Eng.* Vol. 16, no. 6. P. 065001. DOI: 10.1088/0965-0393/16/6/065001.

4. Mendas M. et al. (2021). Microhardness model based on geometrically necessary dislocations for heterogeneous material. *J. of Mat. Res. and Technol.* 15, 2792–2801. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.093.

5. Abu Al-Rub R.K. (2007). Prediction of micro and nanoindentation size effect from conical or pyramidal indentation. *Mech. of Mat.* Vol. 39, no. 8. P. 787–802. DOI: 10.1016/j.mechmat.2007.02.001.

6. Sun S. et al. (2025). Scratching force and material removal mechanism of 2.5D SiO₂f/SiO₂ composites under single-abrasive scratch test. *J. of Manufact. Proc.* Vol. 153. P. 16–28. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.08.058.

7. Storchak M., Zakiev I., Zakiev V., Manokhin A. (2022). Coatings strength evaluation of cutting inserts using advanced multi-pass scratch method. *Measurement.* Vol. 191. 110745. DOI: 10.1016 / j. measurement. 2022.110745.

8. Storchak M. (2023). Mechanical Characteristics Generation in the Workpiece Subsurface Layers through Cutting. *Crystals.* Vol. 13, no. 5. P. 761. DOI: 10.3390/cryst13050761.

9. Guo J. et al. (2019). Recent progress of residual stress measurement methods: A review / *Chin. J. of Aeronaut.* DOI: 10.1016/j.cja.2019.10.010.

10. Dean J., Aldrich-Smith G., Clyne T.W. (2011). Use of nanoindentation to measure residual stresses in surface layers. *Acta Mat.* Vol. 59, no. 7. P. 2749–2761. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.01.014.

11. Alaboodi A.S., Hussain Z. (2019). Finite element modeling of nano-indentation technique to characterize thin film coatings. *J. of King Saud University – Eng. Sci.* Vol. 31, no. 1. P. 61–69. DOI: 10.1016/j.jksues.2017.02.001.

12. Khan M.K. et al. (2010). A combined experimental and finite element approach for determining mechanical properties of aluminium alloys by nanoindentation. *Computat. Mat. Sci.* Vol. 49, no. 4. P. 751–760. DOI: 10.1016/j.commatsci.2010.06.018.



13. Zaporozhets V.V. (1980). Dynamic characteristics of the strength of surface layers and their evaluation. *Frict. and wear*. Vol. 1, № 4. P.602–609.
14. Lyashko V.A., Potemkin M.M., Klimenko S.A. (1998). Comparative durability of materials in wear. *Wear*. Vol. 216. P. 239–243.
15. Klymenko S.A., Melniychuk Yu.O., Vstovsky G.V. *Fractal parameterization of material structures, their machinability, and cutting tool wear resistance*. Kyiv. INM, 2009. 172 p.

Abstract. *The article investigates the mechanical properties of the surface layer of superhard composites based on cubic boron nitride (cBN), which are widely used in cutting tools operating under extreme thermomechanical conditions. The purpose of the work is to justify the use of scratch testing (sclerometry) as a comprehensive method for determining the surface mechanical characteristics of these materials and to establish correlations between the test parameters and tool performance.*

In the introduction, the importance of surface layer properties for the wear resistance and reliability of cutting tools is emphasized. It is noted that bulk mechanical characteristics alone cannot adequately predict the service life of cBN-based tools due to the dominating role of friction and crack initiation in the near-surface zone.

The methodology section presents the use of a set of instrumental techniques, including nanoindentation, tribo-spectral analysis, deformation-spectral analysis, and multipass scratch testing. These methods allow the evaluation of microhardness, residual stresses, adhesion strength, and the energy parameters of plastic deformation. Special attention is paid to the statistical processing of large experimental datasets to obtain reliable and reproducible results. The scratch test is justified as the most informative method, since it enables simultaneous assessment of resistance to plastic deformation, crack propagation, and intergranular bonding strength in cBN composites.

Experimental results demonstrate that surface lapping increases both the contact resistance and heterogeneity of the surface layer, indicating strengthening of intergranular bonds. A strong correlation ($\approx 0,99$) was established between sclerometric indicators and the structural state of the surface layer confirmed by fractal analysis. Quantitative relationships were derived between scratch track parameters and Knopp hardness, enabling prediction of hardness with an accuracy of about 7%. Ranking of composites by mean tangential force and dispersion showed that “Composite 10” and “Kiborite” exhibit the highest wear resistance and lowest scatter of strength properties.

In the discussion, the entropic criterion of surface layer durability is introduced, taking into account the activation energy barrier and the rate of entropy production during cyclic loading. The combination of tribo-spectral and deformation-spectral parameters allows differentiation of materials not only by hardness but also by their ability to resist crack initiation, surface degradation, and entropy growth during service.

The conclusions scratch testing combined with spectral analyses is an effective integrated approach for evaluating the mechanical properties of cBN-based composites’ surface layer. The results can be used to optimize the composition, processing, and finishing of superhard tool materials to enhance their wear resistance and operational stability.

Keywords. *Composites, cubic boron nitride (cBN), surface layer, mechanical properties, scratch testing, sclerometry, tribospectral analysis, strain-spectral analysis, multipass scratch testing, hardness, wear resistance.*

Статья відправлена: 19.09.2025 г.

© Клименко С.А.