УДК 621.9

А.Г. Найденко[1], А.С. Манохін[1],
І.М. Закієв[2], В.І. Закієв[2],
С.А. Клименко[1] , Ю.О. Мельнійчук[1],
С.А. Клименко[1]

Порівняльна оцінка механічних характеристик поверхневого шару надтвердих композиційних інструментальних матеріалів

[1]*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Україна*
[2]*Національний авіаційний університет, Україна*

Представлені результати досліджень механічних характеристик матеріалу поверхневого шару нових типів надтвердих інструментальних композитів на основі кубічного нітриду бору групи BL. Для комплексної оцінки механічних властивостей поверхневого шару використовувалися методи склерометрування та мікросколювання кромок полікристалів (FR-метод). Дослідження проводилися за допомогою приладу «Мікрон-гамма», який дозволяє реалізувати різноманітні схеми навантаження зразків. Встановлено, що серед випробуваних зразків найкращим за сукупністю механічних властивостей є композит, що містить 55% cBN (КМ 3/2) та 45% TaN.

Ключеві слова: інструментальний композит, кубічний нітрид бору, поверхневий шар, точіння, склерометрування, FR-метод.

Вступ

При розробці нових типів надтвердих композитних матеріалів, інструментального призначених, для характеристики їх фізико-механічних властивостей найбільш широко використовується твердість, тріщиностійкість та густина. В той же час вказаних параметрів не достатньо для прогнозування поведінки композиту в умовах контактної взаємодії в зоні різання. Зокрема, з метою оцінки зносостійкості інструменту при абразивному зношуванні необхідно використовувати методи, які дозволяють надати оцінку міцності поверхневих шарів матеріалу.

В даній роботі для оцінки механічних характеристик матеріалу поверхневого шару нових типів надтвердих інструментальних композитів на основі кубічного нітриду бору (*cBN*) групи *BL* (*low-CBN* grades, 45–65 об.% *cBN* з матрицею на основі сполук елементів *Ta, Ti, C, Al*), використовувався метод склерометрування (*Scratch Test*), при якому досліджувана поверхня сканується навантаженим індентором. Шляхом вибору нормального навантаження *P* на індентор та розміру області, що деформується на поверхні досліджуваного зразка, можуть бути відтворені умови контактного навантаження на інструмент в зоні різання.

Другим методом, що використаний при оцінці властивостей зразків був *FR*-метод, який забезпечував визначення опору крихких матеріалів руйнуванню шляхом сколюванні гострої прямокутної кромки зразка за допомогою конічного стандартного індентора Роквелла. За допомогою цього методу визначали значення нормального навантаження на індентор F_R яке, можна вважати комплексним показником, що доповнює таку характеристику матеріалу, як критичний коефіцієнт концентрації напружень K_{1c} та характеристики міцності матеріалу. Перевагою таких механічних випробувань є простота їх виконання і обмежені витрати матеріалу, а також можливість використання прямокутних кромок виробів при їх виконанні [1-4].

Викладення основного матеріалу

Для вимірювань використовувався прилад «Мікрон-гамма», розроблений в Національному авіаційному університеті (рис.1). Даний мікроіндентометр має широкі діапазони заданих зусиль (від 0,01 до 10 Н) і реєстрованої глибини інденту-вання (від 10 нм до 200 мкм) [5].

Рис. 1. Зовнішній вигляд приладу «Мікрон-гамма»

Сканування чотирьох зразків композиційних матеріалів (21, 22, 24 та 27), склад яких наведено в табл.1, проводилося по передній поверхні інструменту в радіальному напрямі від центру різальних пластин в напрямі різальної кромки. Нормальне навантаження на індентор *P* складало 30, 50 та 100 сН, довжина траси сканування складала 270 мкм, швидкість сканування 22 мкм/с. На прикладі зразка №21 наведено зображення траси сканування (рис. 2).

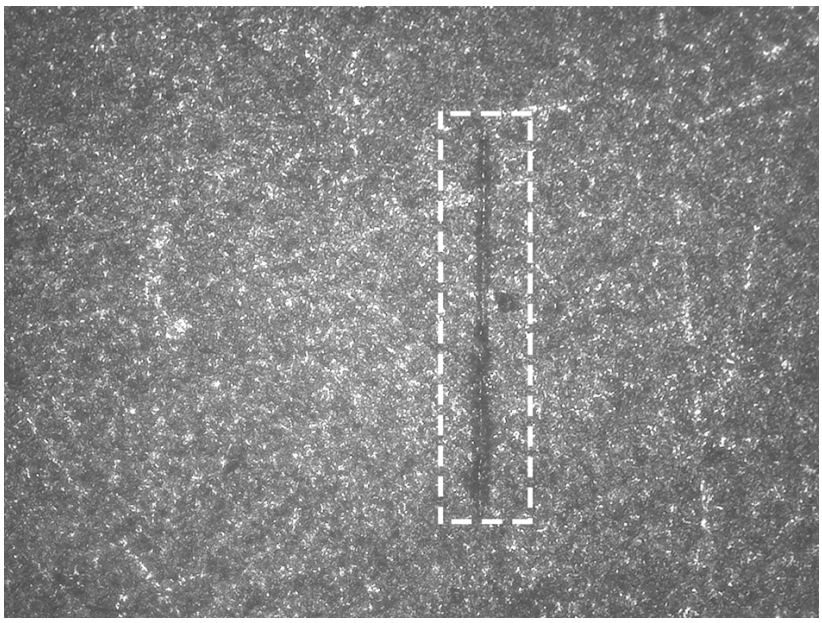

Рис. 2. Траса сканування зразка

Таблиця 1

Склад досліджуваних зразків композитів

Номер композиту	Склад суміші для спікання, об.%	Щільність після стиснення тиском 7,7 ГПа при 25 °С, г/см^3
21	cBN(КМ 3/2)-TaN (1–30 мкм), 55–45	6,25
22	cBN(КМ 3/2)-TiN (1–2 мкм), 55–45	3,92
24	cBN(КМ 3/2)-TiC (≤ 4,5–7 мкм), 55–45	3,52
27	cBN(КМ 3/2)-TiC (≤ 4,5–7 мкм), 75–25	3,10

Були отримані залежності величини тангенційної складової спротиву матеріалу зразків руйнуванню – сили тертя-мікрорізання ($F_т$, сН) від глибини занурення при повздовжньому переміщенні індентора (X, мкм). Ділянки входу та виходу індентора відсікали та враховували тренд нахилу діаграм. Статистичні характеристики механічних властивостей композитів зведено в табл. 2.

Аналіз даних табл. 2 та діаграм на рисунках 3, 4 дозволяє оцінити характер залежності між параметрами, що характеризують процес мікроруйнування поверхневих шарів композитів – глибиною занурення індентора склерометра та тангенціальним зусиллям на інденторі (силою тертя-мікрорізання). Сила тертя-мікрорізання практично не залежить від типу експериментального композиту за виключенням зразка 21. Величина даного параметру для цього зразка значно нижча, що свідчить про те, що за сукупністю механічних властивостей зразок 21 значно (на 14%) поступається іншим типам композитів. В цілому, значення маточікування $M[F_т]$ та середньоквадратичного відхилення $\sigma[F_т]$ сили тертя-мікрорізання не дозволяє визначити найбільш ефективний тип композиту при вимірюванні сили тертя-мікрорізання та вказуючи лише на принципову працездатність нових матеріалів.

Таблиця 2

Статистичні характеристики механічних властивостей композитів

Номер композиту	P, сН	$M[h]$, мкм	$\sigma[h]$, мкм	$M[F_т]$, сН	$\sigma[F_т]$, сН
21	30	-1,00	0,18	17,02	3,21
	50	-1,91	0,16	27,66	3,61
	100	-4,07	0,22	47,92	4,45
22	30	-1,36	0,13	17,69	2,30
	50	-2,20	0,18	30,78	3,00
	100	-4,53	0,30	56,59	4,21

Продовження таблиці 2

Статистичні характеристики механічних властивостей композитів

24	30	-1,58	0,22	17,53	2,06
	50	-2,17	0,16	30,61	2,96
	100	-4,19	0,13	56,45	4,41
27	30	-1,08	0,11	15,45	1,81
	50	-1,75	0,14	27,95	2,58
	100	-3,85	0,16	55,13	4,76

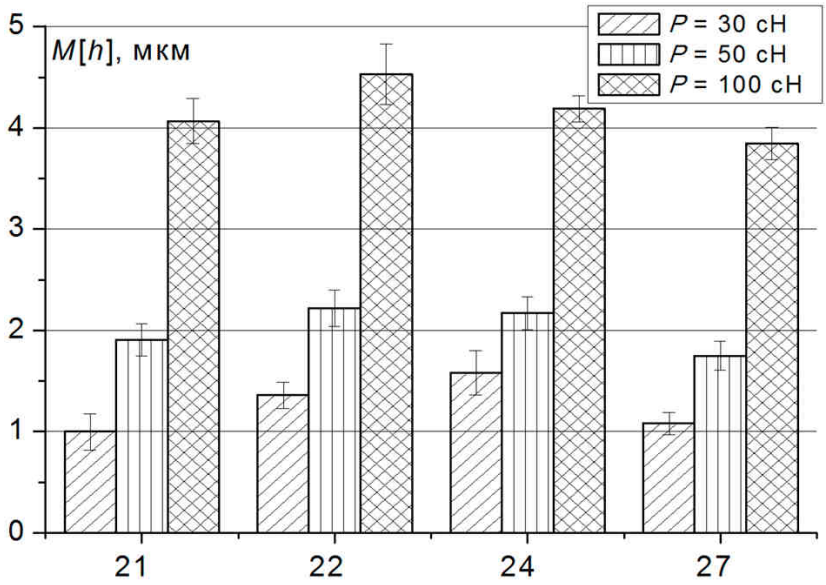

Рис. 3. Залежність математичного очікування глибини занурення індентора при скануванні від нормального навантаження на індентор для композитів 21, 22, 24 та 27

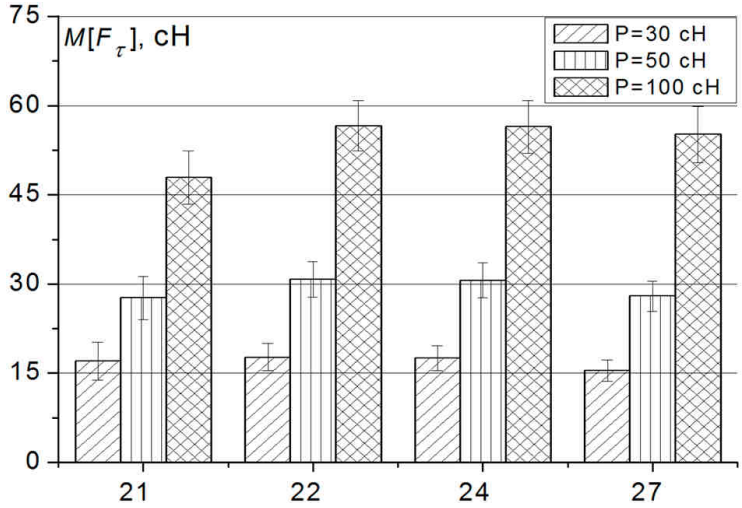

Рис. 4. Залежність математичного очікування сили тертя-мікрорізання від нормального навантаження на індентор для композитів 21, 22, 24 та 27

В роботі при дослідженні нових модифікацій надтвердих полікристалічних композиційних матеріалів було застосовано модифікований *FR*-метод при якому визначали величину сили сколювання та глибину занурення індентора при якому відбувалось сколювання на різних відстанях від кромки композитів 21, 22, 24 та 27. При визначенні відношення нормального навантаження на індентор до глибини занурення індентора при сколюванні F_R (рис. 5) необхідно відзначити, що максимальне значення параметру притаманне зразку 24, а мінімальне – 21.

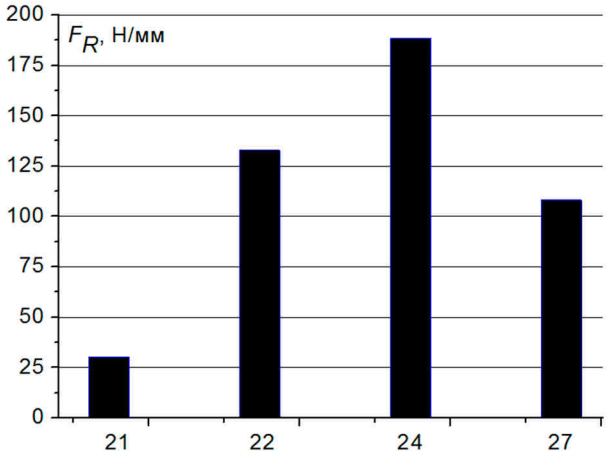

Рис. 5. Відношення нормального навантаження на індентор до глибини занурення індентора при сколюванні для композитів 21, 22, 24 та 27

Для лінійно-пружних матеріалів спостерігається прямо пропорційна залежність F_R від K_{1c}. На відміну від них, для керамічних матеріалів, в руйнуванні яких значну роль відіграють процеси пластичної деформації, що визначається параметром χ згідно [6], K_{1c} в загальному випадку залежить від F_R не лінійно, хоча кореляція між вказаними параметрами зберігається. Таким чином можна вважати F_R комплексним показником, який доповнює таку характеристику матеріалу, як критичний коефіцієнт концентрації напружень K_{1c} [3] та, вочевидь, характеристики міцності матеріалу. Отже, згідно даних діаграми (рис. 5) зразок №24 повинен характеризуватися максимальною міцністю та тріщиностійкістю.

Залежності сили тертя та глибини занурення індентора від координати при скануванні зразків 21, 22, 24, 27 при навантаженні 30 сН представлені діаграмах рис. 6 та 7.

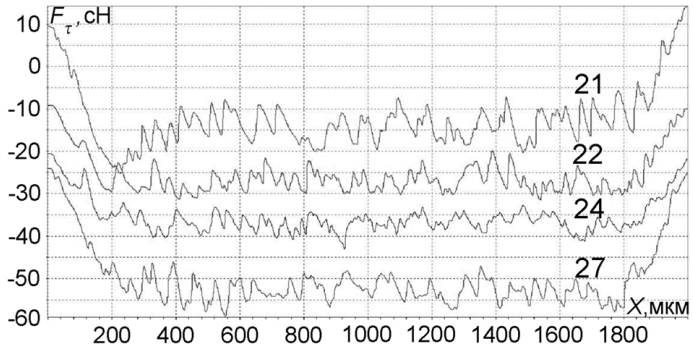

Рис. 6. Залежність сили тертя $F_т$ від координати *X* при скануванні композитів 21, 22, 24 та 27

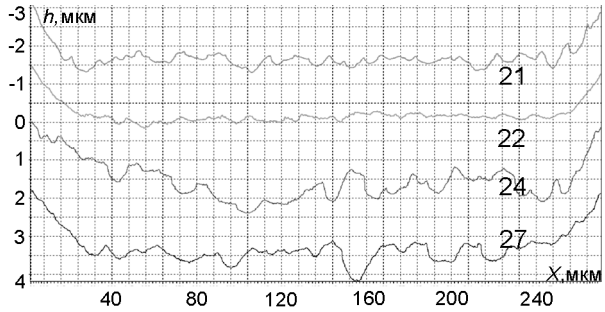

Рис. 7. Залежність глибини занурення індентора *h* від координати *X* при скануванні композитів 21, 22, 24 та 27

Графіки на рис. 6 та рис. 7 рознесено відносно нуля для зручності аналізу. Якщо діаграма, яка характеризує глибини занурення індентора при скануванні (рис. 7) не дозволяє охарактеризувати однорідність механічних властивостей випробуваних матеріалів, то характеристики сили тертя-мікрорізання (рис. 6) надають можливість визначити, що найбільшою однорідністю характеризуються зразок №27.

За допомогою розрахунків, які наведені в табл. 2 побудовано діаграму ранжування зразків за параметром середньоквадратичного відхилення сили тертя-мікрорізання при скануванні зразків з нормальним навантаженням 30 сН (рис. 8). Спостерігається зворотня кореляція між величинами $\sigma[F_\tau]$ та F_R і $M[F_\tau]$ – зразки з максимальними величинами спротиву сколюванню та зануренню індентора при скануванні демонструють мінімальне відхилення сили тертя-мікрорізання.

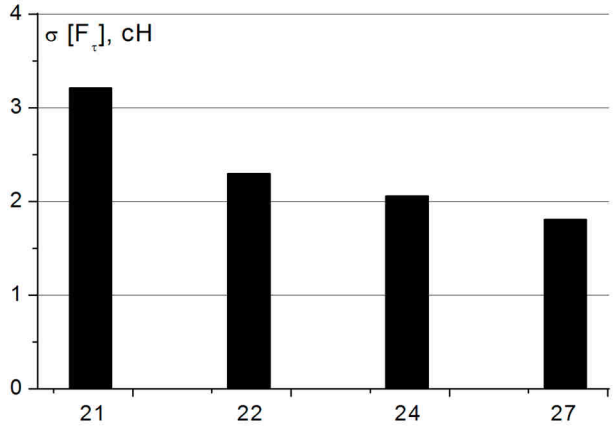

Рис. 8. Величина середньоквадратичного відхилення значень сили тертя при скануванні композитів 21, 22, 24 та 27

Висновки

Продемонстровано, що склерометрування є ефективним методом отримання характеристик сукупності фізико-механічних властивостей поверхневих шарів надтвердих композитів інструментального призначення, який дозволяє надати попередню оцінку їх працездатності.

Методом склерометрування встановлено, що за сукупністю механічних властивостей найкращим є матеріал, який відповідає композиту 24 (55% *cBN*, 45% *TiC*). Однорідність механічних властивостей даного матеріалу, визначена за вели-

чиною середньо-квадратичного відхилення сили тертя-мікрорізання, незначним чином поступається композиту 27 і значно перевищую властивості матеріалу композита 21, що містить 55% *cBN* (КМ 3/2) та 45% *TaN*.

Література

1. McCormick N., Almond E. Edge flaking of brittle materials [Text] / N. McCormick, E. Almond // J. Hard Mater. – 1990. – vol. 51. – pp. 25– 51.

2. Гогоци Г. А. Сопротивление керамики разрушению: базовая диаграмма и R-линия [Текст] // Проблемы прочности. – 2006. – № 3. – С. 60 – 74.

3. Gogotsi G. A. Fracture resistance of ceramics: Base diagram and R-line [Text] // Strength of Materials. – 2006. – vol. 38, no. 3. – pp. 261–270.

4. Gogotsi G. A. Edge chipping resistance of ceramics: Problems of test method [Text] // Journal of Advanced ceramics. – 2013. – vol. 2, no. 6. – pp. 370–377.

5. Игнатович С. Р., Закиев И. М. Универсальный микро-наноиндентометр «Микрон-гамма» [Текст] / С. Р. Игнатович, И. М. Закиев // Зав. лаб. – 2011, Т. 77, №1. – С. 61 – 67.

6. Gogotsi G. A. The use of brittleness measure (c) to represent mechanical behavior of ceramics [Text] // Ceram. Int. – 1989. – vol. 15. – pp. 127 – 129.

Надійшла до редакції 15.06.2017

Сравнительная оценка механических характеристик поверхностного слоя сверхтвердых композиционных инструментальных материалов

Представлены результаты исследований механических характеристик материала поверхностного слоя новых типов сверхтвердых инструментальных композитов на основе кубического нитрида бора группы BL. Для комплексной оценки механических свойств поверхностного слоя использовались методы склерометрирования и микроскалывния кромок поликристаллов (*FR*-метод). Исследования проводились с помощью прибора «Микрон-гамма», который позволяет реализовать различные схемы нагрузки образцов. Установлено, что среди испытуемых образцов лучшим по совокупности механических свойств является композит, содержащий 55% *cBN* (КМ 3/2) и 45% TaN.

Ключевые слова: инструментальный композит, кубический нитрид бора, поверхностный слой, точение, склерометрування, FR-метод.

The Comparative Assessment of Mechanical Characteristics of the Surface Layer of Superhard Composite Tool Materials

The results of research of the surface layer material of mechanical characteristics of the new types of super hard tools composites based on cBN's BL groups was presented. For complex assessment of mechanical properties of the surface layer the scratch test and microchiping of polycrystalline edges (*FR*-method) were used. Studies were conducted using the "Micron-gamma" device, which allows implementation of various schemes of the samples loading. It was found that by the complex of mechanical properties the best composite among the tested samples is the one containing 55% *cBN* (KM 3/2) and 45% *TaN*.

Key words: tool composite, cubic boron nitride, surface layer, turning, scratch test, FR-method.

Сведения об авторах:

Найденко Артем Григорович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академії наук України, Київ, Україна, e-mail: atmu@meta.ua.

Naydenko Artem Grigorovich – candidate of sciences, senior researcher associate, V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: atmu@meta.ua.

Манохін Андрій Сергійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академії наук України, Київ, Україна, e-mail: atmu@meta.ua.

Manokhin Andrey Sergeevich – candidate of sciences, senior researcher associate, V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: atmu@meta.ua.

Закієв Ислам Мусаевич – науковий співробітник, кафедра конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, e-mail: zakiev@ukr.net.

Zakiev Islam Musaevich – researcher associated, department of aircraft structure, National Aviation University, Kiev, Ukraine, e-mail: zakiev20@ukr.net.

Закієв Вадім Ісламовіч – науковий співробітник, кафедра конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, e-mail: zakiev@ukr.net.

Zakiev Vadim Islamovich – researcher associated, department of aircraft structure, National Aviation University, Kiev, Ukraine, e-mail: zakiev20@ukr.net.

Клименко Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академії наук України, Київ, Україна, e-mail: atmu@meta.ua.

Klymenko Serhii Anatoliiovych – doctor of sciences, professor, deputy director for science, V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: atmu@meta.ua.

Мельнійчук Юрій Олексійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академії наук України, Київ, Україна, e-mail: atmu@meta.ua.

Melnijchuk Yuriy Oleksiyovych – candidate of sciences, senior researcher associate, V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: atmu@meta.ua.

Клименко Сергій Анатолійович – кандидат технічних наук, науковий співробітник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академії наук України, Київ, Україна, e-mail: atmu@meta.ua.

Klymenko Serhii Anatoliiovych – candidate of sciences, researcher associate, V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: atmu@meta.ua.