

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

УДК 620.17

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2018.82.0.114

## НАНОТВЕРДІСТЬ – СУЧАСНИЙ МЕТОД ДІАГНОСТУВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ВИРОБІВ

Мощенко В.І., Лалазарова Н.О., Кухарєва І.Є., Понікаровська С.В., ХНАДУ

**Анотація.** Проведені дослідження поверхневої та об'ємної нанотвердості матеріалів безперервним індентуванням показали, що ці методики можуть використовуватися як для пружних, так і пластичних матеріалів, відрізняються значною простотою, так як для розрахунку використовують глибину втискування індентора, яка вимірюється приладом. При визначенні нанотвердості спостерігається розмірний ефект – із збільшення навантаження (глибини втискування індентора) величина нанотвердості спочатку зменшується, а потім – стабілізується.

**Ключові слова:** поверхнева та об'ємна нанотвердість, глибина втискування індентора, розмірний ефект.

## Вступ

Для сучасного машинобудування в наступний час характерним є ускладнення конструкцій і умов експлуатації, що обумовлює більш високі вимоги до рівня фізико-механічних властивостей матеріалів виробів. Згідно сучасним уявленням значну роль в деформаційній поведінці виробу і формуванні його властивостей в цілому грає стан поверхні. Нові інноваційні технології дозволяють отримувати робочий шар мікро- або навіть нанорозмірної товщини з унікальними функціональними властивостями. Найбільш точним, а іноді і єдиним, способом діагностування якості поверхневих шарів, оцінки властивостей матеріалів в нанооб'ємах, плівок є вимірювання нанотвердості методом кінетичного індентування, що дозволяє вивчати процеси пружної і пластичної деформації в дуже малих об'ємах, визначати нанотвердість, ряд механічних, трибологічних та інших службових характеристик.

## Аналіз публікацій

Метод кінетичного індентування використовують для вивчення властивостей як пластичних, так і крихких матеріалів (кераміка, скло, карбіди, нітриди, борида та ін.) [1, 2]. Використання нанотвердості все більше поширюється в різних галузях науки і техніки, запропоновані різноманітні прилади і методики для її вимірювання і розрахунку, що викликає певні труднощі її визначення та інтерпретації результатів. Нанотвердість для даного матеріалу не є константою, її значення залежать від умов випробувань. При ви-

значенні нанотвердості має місце розмірний ефект. Тобто існує проблема визначення нанотвердості матеріалів, яка потребує вирішення.

## Мета і постановка завдання

Метою дослідження є вдосконалення методики визначення нанотвердості, розмірного ефекту, що дозволяє з високою точністю і більш ефективно оцінювати якість матеріалів у нанооб'ємах. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання: 1) провести аналіз методик визначення нанотвердості матеріалів; 2) вдосконалити методику визначення нанотвердості; 3) дослідити розмірний ефект при вимірюванні нанотвердості.

## Визначення нанотвердості матеріалів

В роботі в якості матеріалу була використана сталева зразкова міра твердості, яка має твердість 439 HBW. Нанотвердість вимірювали на приладі Nano Test (Micro Materials Ltd., Англія) (рис. 1).

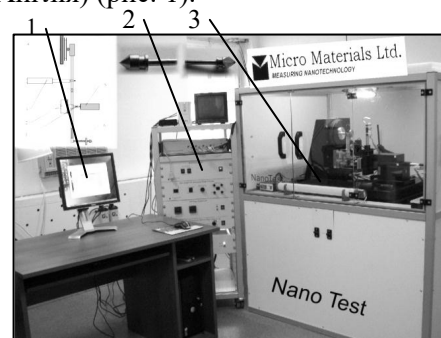


Рис. 1. Зовнішній вигляд приладу Nano Test з горизонтальним розташуванням шпинделя та індентора: 1 – монітор; 2 – блок управління; 3 – нанотестер

За результатами вимірювань на нанотвердомірі виконуються розрахунки за програмою «Nano Test Materials Testing Platform» – нанотвердість визначається за методикою Олівера і Фарра (ОіФ) (вона відповідає твердості інденування згідно ISO 14577-4:2007) [3].

В рамках методики ОіФ [4] твердість  $H$  зразка визначається за формулою

$$H = \frac{F_{\max}}{A_c}, \quad (1)$$

де  $A_c$  – площа проекції поверхні контакту індентору з матеріалом;  $F_{\max}$  – максимальне навантаження, Н.

$A_c$  визначається із задалегідь заданої функції форми індентора  $A(h)$  при підстановці розрахованого значення контактної глибини  $h_c$

$$A_c = A(h_c). \quad (2)$$

Функція форми наконечника – це залежність площі перетину індентора  $A$  од відстані уздовж осі індентора  $h$ . В рамках даного методу функція  $A(h)$  передбачається відомою задалегідь.

Описана методика на сьогоднішній день є найбільш поширеною для визначення нанотвердості і модуля пружності [3]. Однак при використанні методики ОіФ не враховується пружна складова деформації і складним є розрахунок контактної глибини, тому що прилад вимірює повну глибину втискування індентора  $h_{\max}$ , а для розрахунку необхідно знати величину прогину на краю відбитка.

Для абсолютно пружних матеріалів визначення нанотвердості за даною методикою досить складне або пов'язане з великими похибками.

Для розрахунку нанотвердості в роботі нами була використана крива інденування, яку отримали за програмою «Nano Test Materials Testing Platform» (рис. 2). За допомогою цієї програми була також надана крива інденування та ряд інших характеристик в числових значеннях у вигляді таблиці.

В якості індентора використовували трикутну піраміду Берковича з  $\alpha=65,03^\circ$  (рис. 3).

Для усунення недоліків та ускладнень методики ОіФ в роботі виконані розрахунки поверхневої нанотвердості, яка за своєю суттю відповідає твердості за Мартенсом [3]

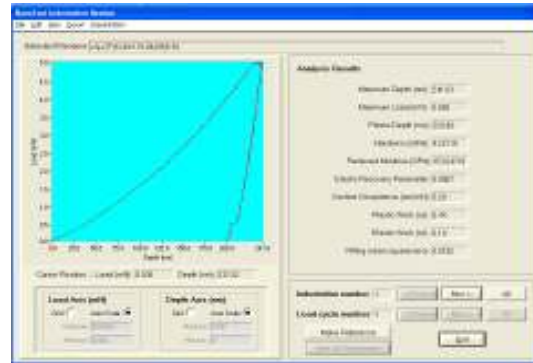


Рис. 2. Діаграма інденування

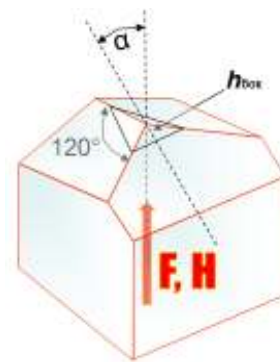


Рис. 3. Схема піраміди Берковича

$$HB_{\text{пов}}^{\text{інд}} = \frac{F}{S_{\text{пов}}}, \quad (3)$$

де  $S_{\text{пов}}$  – площа бічної поверхні втиснутої в матеріал частини індентора,  $\text{мм}^2$ .

Для трикутної піраміди Берковича ( $\alpha=65,03^\circ$ ) формула має вигляд

$$HB_{\text{пов}}^{65,03} = \frac{F}{S_{\text{бок}}} = \frac{F}{26,4342 \cdot h^2}, \text{ Н/мм}^2 \quad (4)$$

Для розрахунку нанотвердості використовували глибину втискування індентора, яку вимірює прилад: глибина прогину на краю відбитка і глибина контакту індентора із поверхнею відбитка.

Значення навантаження та глибини втискування індентора, отримані в програмі «Nano Test Materials Testing Platform», використовували для розрахунку поверхневої нанотвердості в програмі Excel. За результатами розрахунків отримали залежність твердості від навантаження при інденуванні поверхневого шару сталеві міри твердості в інтервалі навантаження-глибина 5,050 мН-241,03 нм (рис. 4).

Із збільшенням навантаження поверхнева твердість зменшується (для індентора у ви-

гляді піраміди), для індентора у вигляді кульки – буде збільшуватися [1].

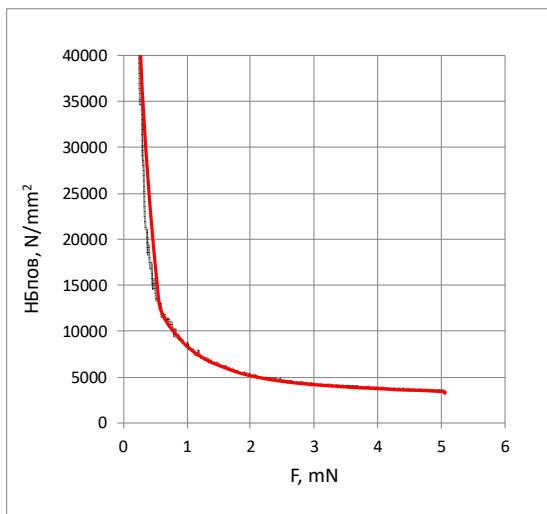


Рис. 4. Залежність поверхневої нанотвердості від навантаження для піраміди Берковича

Тобто має місце розмірний ефект. Тому порівнювати результати вимірювань поверхневої нанотвердості неможливо. Щоб отримати аналогічний характер залежності нанотвердості від величини навантаження для інденторів різної форми рекомендується використовувати метод об'ємної нанотвердості.

Об'ємну нанотвердість визначали за формулою

$$HB_{об}^{65,03} = \frac{P}{V} = \frac{P}{7,987 \cdot h^3}. \quad (5)$$

Залежність об'ємної нанотвердості від навантаження має вигляд (рис. 5).

У зв'язку з прагненням сучасної техніки до мініатюризації об'єктів, підвищення експлуатаційних характеристик виробів, що пов'язано з розробкою нових субмікронних та нанорозмірних матеріалів, використанням тонких покриттів та плівок, метод вимірювання нанотвердості шляхом безперервного індентування набуває все більшої популярності.

В багатьох випадках нанотвердість є практично єдиним показником механічних властивостей матеріалів, який використовують для оцінки якості поверхневих шарів відповідальних виробів, що потребує високої точності її розрахунку. Запропонована методика визначення нанотвердості враховує як пружну, так і пластичну складову частину деформації, має не дуже трудомісткі математичні і графо-аналітичні розрахунки, що під-

вищує точність та ефективність її визначення.

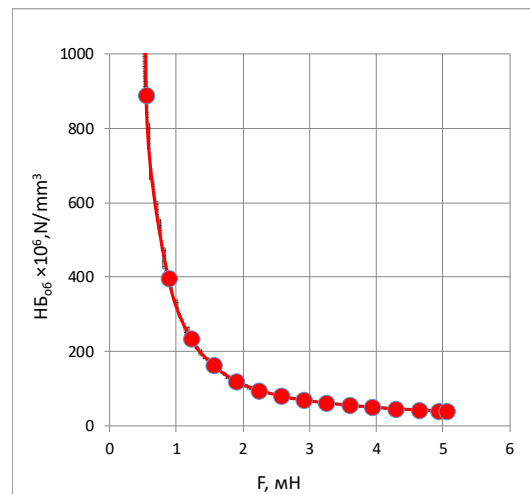


Рис. 5. Залежність об'ємної нанотвердості від навантаження для піраміди Берковича

Сучасні дослідження підтвердили, що число твердості для даного матеріалу в різних діапазонах індентування не є константою [1].

Показано, що значення твердості залежать від глибини втискування індентора (або навантаження). В залежності від навантаження твердість може збільшуватися (зворотній розмірний ефект), або зменшуватися (прямий розмірний ефект). Однак характер зміни цієї залежності при використанні різних інденторів вивчений не достатньо повно. При визначенні поверхневої та об'ємної нанотвердості шляхом індентування тригранною пірамідою Берковича спостерігається прямий розмірний ефект, тобто із збільшенням навантаження нанотвердість зменшується до якогось значення, а потім стабілізується. Причина такого характеру зміни властивостей точніше всього пояснюється формулою, за якою розраховують значення твердості [1].

### Висновки

Галузь використання методики Олівера і Фарра обмежена пружно-пластичною схемою контакту індентора з матеріалом.

Поверхнева та об'ємна нанотвердість може використовуватися для різних за своєю природою матеріалів, для оцінки якості тонких поверхневих шарів.

Методика визначення поверхневої та об'ємної нанотвердості за кривими індентування відрізняється значною простотою, точністю і продуктивністю, так як виключається необхідність розрахунку пружного проги-

ну, тому що використовують глибину втискування індентора, яка вимірюється приладом. При вимірюванні поверхневої та об'ємної нанотвердості спостерігається розмірний ефект – із збільшення навантаження (глибини втискування індентора) величина нанотвердості спочатку зменшується, а потім – стабілізується.

#### Література

1. Мощенок В.И. Новые методы пределения твёрдости материалов : монография / В.И. Мощенок. – 2-е изд. доп. и перераб. – Х. : ХНАДУ, 2013. – 324 с.
2. Колмаков А.Г. Методы измерения твердости [Metodyi izmereniya tverdosti ] / А.Г. Колмаков, В.Ф. Терентьев, М.Б. Бакиров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 150 с.
3. ISO 14577-4:2007 Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. – Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings.
4. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – 7.№6. – P. 1564-1583.
5. Определение нанотвердости материалов с использованием различных методов анализа кривой индентирования / В.И. Мощенок, Н.А. Лалазарова, Е.Г. Попова и др. // Вопросы проектирования летательных аппаратов: сб. науч. тр. – Харьков, национальн. аэрокосмич. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2011. – Вып. 1(65). – С. 102-107.

#### References

1. Moschenok V.I. (2013) New methods to determine material hardness [Novyie metodyi predeleniya tvordosti materialov], Kharkiv [in Russian].
2. Kolmakov A.G., Terentyev V.F., Bakirov M.B. (2005) Methods to determine hardness, Moscow [in Russian].
3. ISO 14577-4:2007 Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. - Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings.
4. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res.-1992.-7.№6.-P. 1564-1583.
5. Moschenok V.I., Lalazarova N.A., Popova E.G., Kuhareva I.E. (2011) Determination of material nanohardness using various methods of analyzing indentation curve [Opredelenie nanotverdosti materialov s ispolzovaniem razlichnyih metodov analiza krivoy indentirovaniya] // Design issues

of aircraft: collection of scientific papers, 1 (65), 102-107. [in Russian].

**Мощенок Василь Іванович – к.т.н., професор, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел. +38 096-359-79-46, [mvi@khadi.kharkov.ua](mailto:mvi@khadi.kharkov.ua)**

**Лалазарова Наталія Олексіївна – к.т.н., доцент, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел. +38 095-390-38-16, [lalaz1932@gmail.com](mailto:lalaz1932@gmail.com),**

**Понікаровська Світлана Володимирівна, старший викладач кафедри іноземних мов, тел. +38 067-782-52-50 [ponikarovska@gmail.com](mailto:ponikarovska@gmail.com)**

**Кухарєва Ірина Євгеніївна, інженер, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел. +38 096 -102-78-86, [Agats@ukr.net](mailto:Agats@ukr.net)**

**Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25**

#### NANOHARDNESS AS A MODERN METHOD OF DIAGNOSTICS OF PRODUCTS SURFACE LAYER QUALITY

**Moschenok V.I., Lalazarova N.O., Kuhareva I.E., Ponikarovska S.V., KhNAHU**

***Abstract. Problem.** Given the creation of new materials of thin coatings, there is a problem of determining the properties in nanoscale by measuring nanohardness. **Goal.** The aim of the study is to improve the method of determining nanohardness by continuous indentation, to study the dimensional effect, which allows evaluating the mechanical properties of materials in nanoscale more accurately and efficiently. **Method.** A steel exemplary measure of hardness was used as a material. Nano-hardness was measured on the Nano Test device (Micro Materials Ltd., England). According to the results of the measurements on the nanohardness measuring device, the calculations were performed by the "Nano Test Materials Testing Platform" program according to Oliver and Farr Method (which corresponds to the hardness of indentation according to ISO 14577-4: 2007), which is rather complicated and has a limited area of use. The Berkovich Pyramid was used as an indenter. **Results.** Indenting curve obtained by the "Nano Test Materials Testing Platform" was used to determine nanohardness. The calculations of surface nanohardness as the ratio of the load to the plane of the lateral surface of the indenter part squeezed in*

the material were made in the work, and the dependence of the hardness on the load was obtained. The volumetric nanohardness was also determined as a ratio of load to the volume of the indenter part squeezed into the material, and its dependence on the load was obtained. **Scientific novelty.** The surface and volumetric nanohardness can be used for materials different in nature, for evaluation of physical and mechanical properties of thin surface-layers. The method of determining the surface and volumetric nanohardness according to the indenting curves possesses great simplicity, accuracy and productivity, because the depth of indenter indentation, which is measured by the device, is used for its calculation. When measuring surface and volumetric nanohardness, a dimensional effect is observed – with increasing load the magnitude of nanohardness initially decreases, and then it stabilizes. **Practical significance.** The methods of determining the surface and volumetric nanohardness allow evaluating the properties of different materials in nanoscale with high precision and productivity.

**Key words:** surface and volumetric nanohardness, depth of indenter indentation, dimensional effect.

## НАНОТВЁРДОСТЬ – СОВРЕМЕННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ

Мощенко В.И., Лалазарова Н.А.,  
Кухарева И.Е., Поникаровская С.В., ХНАДУ

**Аннотация.** Проведенные исследования поверхностной и объёмной нанотвёрдости материалов непрерывным индентированием, показали, что эти методики могут использоваться как для упругих, так и пластичных материалов, отличаются значительной простотой, так как для расчёта используют глубину вдавливания индентора, которая измеряется прибором. При определении нанотвёрдости наблюдается размерный эффект – с увеличением нагрузки (глубины вдавливания индентора) величина нанотвёрдости сначала уменьшается, а затем – стабилизируется.

**Ключевые слова:** поверхностная и объёмная твердость, глубина внедрения индентора, размерный эффект.