

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.С., 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, оскільки для розрахунку використовують глибину втискування індентора, яка вимірюється приладом. При визначенні нанотвердості спостерігається розмірний ефект – зі збільшенням 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 наш час характерним є ускладнення конструкцій і умов експлуатації, що зумовлює більш високі вимоги до рівня фізико-механічних властивостей матеріалів виробів. Згідно із сучасними уявленнями значну роль у деформаційній поведінці виробу і формуванні його властивостей в цілому відіграє 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 у наноб'ємах, плівок є вимірювання нанотвердості методом кінетичного індентування, що дозволяє вивчати процеси пружної та 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, бориди та ін.) [1, 2]. Використання нанотвердості все більше поширюється в різних галузях науки та 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 наноб'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

У роботі в якості матеріалу було використано сталеву зразкову міру твердості, яка має твердість 439 HBW. Нанотвердість вимірювали на приладі Nano Test (Micro Materials Ltd., Англія) (рис. 1).

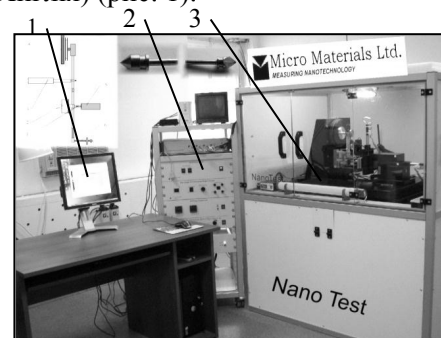


Рис. 1. Зовнішній вигляд приладу Nano Test з горизонтальним розташуванням шпинделя та індентора: 1 – монітор; 2 – блок управління; 3 – нанотестер

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 інденатора з матеріалом; F_{\max} – максимальне навантаження, Н.

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

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

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

Описана методика на сьогоднішній день є найбільш поширеною для визначення нанотвердості й 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 інденатора 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 було використано криву інденування, яку отримали за програмою «Nano Test Materials Testing Platform» (рис. 2). За допомогою цієї програми було також надано криву інденування та ряд інших характеристик в числових значеннях у вигляді таблиці.

В якості інденатора 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]

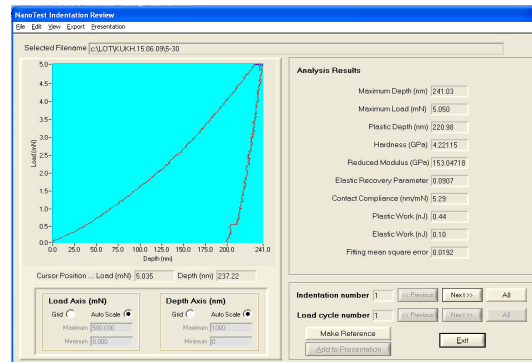


Рис. 2. Діаграма інденування

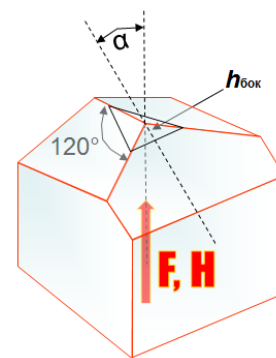


Рис. 3. Схема піраміди Берковича

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

де $S_{\text{пов}}$ – площа бічної поверхні втиснутої в матеріал частини інденатора, мм².

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 інденатора, яку вимірює прилад: глибину прогину на краю відбитка і глибину контакту інденатора із поверхнею відбитка.

Значення навантаження та глибини втискування інденатора, отримані у 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).

Зі збільшенням навантаження поверхнева твердість зменшується (для інденатора у ви-

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

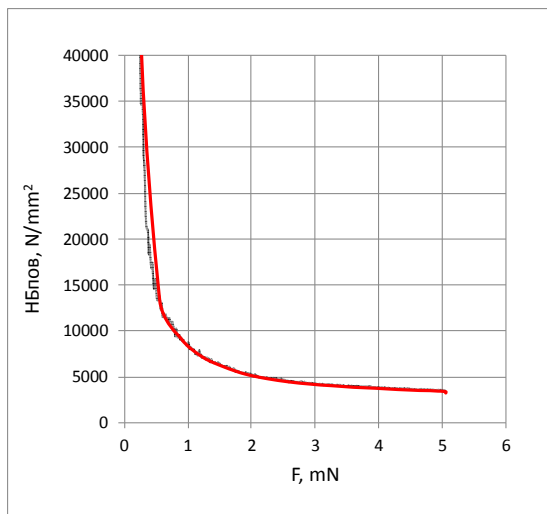


Рис. 4. Залежність поверхневої нанотвердості від навантаження для піраміди Берковича

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

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

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.

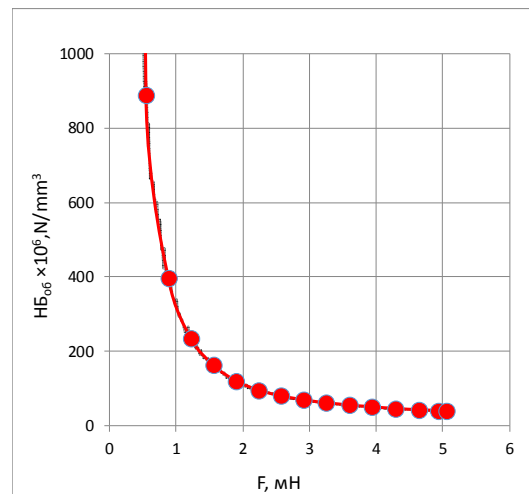


Рис. 5. Залежність об'ємної нанотвердості від навантаження для піраміди Берковича

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). Залежно від навантаження твердість може збільшуватися (зворотний 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 зі 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, оскільки виключається необхідність розрахунку пружного

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

Література

1. Мощенок В.И. Новые методы определения твердости материалов : монография / В.И. Мощенок. – 2-е изд. доп. и перераб. – Х. : ХНАДУ, 2013. – 324 с.
2. Колмаков А.Г. Методы измерения твердости / А.Г. Колмаков, В.Ф. Терентьев, М.Б. Бакиров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Интернет 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 [Novyye 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 razlichnykh 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

Лалазарова Наталія Олексіївна – к.т.н., доцент, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел. +38 095-390-38-16, lalaz1932@gmail.com,

Понікаровська Світлана Володимирівна, старший викладач кафедри іноземних мов, тел. +38 067-782-52-50 ponikarovska@gmail.com

Кухарєва Ірина Євгеніївна, інженер, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел. +38 096 -102-78-86, 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

Мощенок 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 для пластичных материалов, отличаются значительной простотой, так как для расчета 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.
