



ЄДИНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ

В.І. Моценок, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри Харківського національного автомобільно-дорожнього університету



Запропоновано єдиний підхід і формули для визначення поверхневої, проекційної та об'ємної твердості матеріалів у макро-, мікро- і нанодіапазонах. Показано переваги розроблених розрахункових методів оцінки твердості.

A unified principle and corresponding formulas for determining surface, projection and volume hardness of materials in macro-, micro-, and nanoscale are offered. The advantages of developed calculation methods for hardness determination are pointed out.

Стрімкий розвиток науки і технологій за останнє десятиліття, особливо використання наноматеріалів, тонких плівок та покриттів, привели до гострої необхідності оцінки їх фізико-механічних властивостей. Існуючі ж методи визначення експлуатаційних характеристик не можна застосовувати до матеріалів, що отримані за сучасними технологіями. З іншого боку, майже 300-річна історія розвитку такого методу оцінки механічних властивостей, як вимірювання твердості, привела до того, що з'явилися десятки різновидів методів і приладів, що дозволяють досліджувати дуже малі об'єми матеріалів і тонкі поверхневі шари.

Вимірювання твердості – самий простий і розповсюджений метод механічних випробувань і дозволяє проводити стопроцентний контроль багатьох видів продукції в промисловості.

У зв'язку з цим необхідно, щоб твердість була якомога більш конкретною і точною характеристикою матеріалу, що особливо важливо, коли це єдина механічна характеристика матеріалу. Важко або практично неможливо зіставити значення твердості, отримані різними способами, інденторами і при різних навантаженнях.

Класичне визначення твердості – це *здатність матеріалу чинити опір втискуванню більш твердого тіла (індентора)* [1–3]. Існуючі ж методи оцінки твердості не зовсім відповідають вищевказаному визначенню. Ще в 1940 р. професор О'Нейлль запропонував таку класифікацію основних методів випробування твердості [4]:

- твердість за Брінеллем (відношення навантаження до площі поверхні відбитка);
- твердість за Мейером (відношення навантаження до площі проекції поверхні відбитка);
- твердість за Русселем (відношення навантаження до об'єму відбитка).

У даний час відсутній єдиний підхід до розрахунку твердості різними методами та існують різночитання у формулюванні терміна “твердість” і, найголовніше, всі відомі методи не відповідають його класичному визначенню. Тому актуальною проблемою є пошук універсального методу вимірювання твердості всіх без виключення матеріалів, коли ця властивість буде мати визначену і ясну фізичну суть, коли результати вимірювань будуть співвідноситися при використанні різних інденторів і за результатами вимірювань твердості можна буде оцінювати інші механічні властивості.

В останні роки для визначення твердості все ширше використовують метод безперервного індентування, який відомий як “метод кінетичної твердості” [5]. У досліджуваний матеріал безперервно втискують індентор і реєструють два основних параметри: прикладене навантаження і глибину втискування.

На кафедрі технології металів і матеріалознавства ім. О.М. Петриченка в ХНАДУ, м. Харків, метод вимірювання твердості з урахуванням вимог міжнародного стандарту ISO 14577 отримав подальший розвиток: запропоновано єдиний підхід до оцінки твердості та її нові показники, які відповідають класичному визначенню терміна “твердість”, розроблено формули для їх розрахунку, розглянуто вплив умов досліджень на результати вимірювань, переваги і недоліки в порівнянні з традиційними методами, області використання, створено узагальнюючу теорію твердості, яка описує процеси індентування матеріалів у різних розмірних діапазонах [6].

Існуючі методи визначення твердості можна поділити на твердість за відновленням (метод Брінелля, Віккерса та ін.) та невідновленням відбитками (твердість, отримана за методом безперервного індентування).

Усі основні методи оцінки твердості матеріалів, згідно з єдиним підходом, умовно розбито на три основні групи:

- 1) методи, в розрахункових формулах яких використовується площа поверхні відбитка або втиснутої частини індентора (рис. 1);

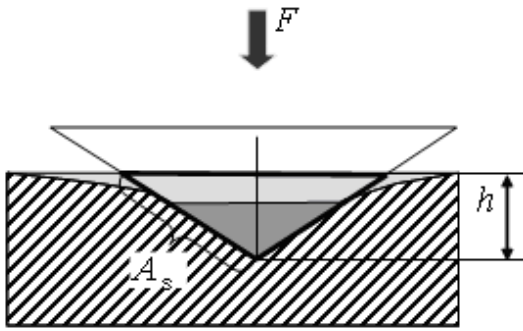


Рис. 1. Схема визначення поверхневої твердості: F – навантаження, Н; A_s – площа поверхні втиснутої в матеріал частини індентора, мм^2 ; h – глибина втискування індентора від поверхні матеріалу до його вершини, мм

2) методи, в розрахункових формулах яких використовується площа проекції поверхні відбитка або втиснутої частини індентора (рис. 2);

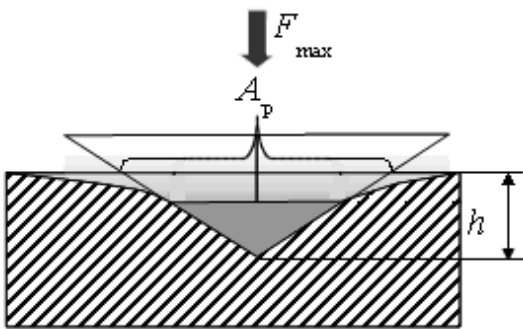


Рис. 2. Схема визначення проекційної твердості: A_p – площа проекції втиснутої в матеріал частини індентора, мм^2

3) методи, в розрахункових формулах яких використовується об'єм відбитка або втиснутої частини індентора.

Перша група методів названа узагальнюючим терміном *поверхнева твердість*, яка визначається як відношення сили опору втискуванню індентора до площі поверхні втиснутої в матеріал його частини [7]. Наприклад, для індентора сферичної форми поверхнева твердість визначається за формулою

$$HB_{\text{пов}}^{\text{інд}} = \frac{F}{2\pi R h_{\text{інд}}},$$

де F – сила опору втискуванню індентора, Н; R – радіус сферичного індентора, мм; $h_{\text{інд}}$ – глибина втискування індентора в досліджуваний матеріал, мм.

Друга група методів названа узагальнюючим терміном *проекційна твердість*, яка визначається як відношення сили опору втискуванню індентора до площі проекції втиснутої в матеріал частини індентора. Розраховувати проекційну твердість, наприклад, для індентора сферичної форми, можна за формулою

$$HB_{\text{пр}} = \frac{F}{\pi h(2R - h)}.$$

Третя група методів названа узагальнюючим терміном *об'ємна твердість*, під якою розуміють відношення сили опору втискуванню індентора до об'єму втиснутої в матеріал його частини. Розраховувати об'ємну твердість, наприклад, для індентора сферичної форми, можна за формулою

$$HB_{\text{об}}^{\text{інд}} = \frac{F}{1,047 \cdot h_{\text{інд}}^2 (3R - h_{\text{інд}})}.$$

Апробацію запропонованих методів оцінки поверхневої і об'ємної твердості за розробленими формулами було проведено шляхом втискування інденторів різної форми (кульок, піраміди Віккерса, сфероконічного індентора) у зразкові міри твердості. Як видно з наведених залежностей, характер

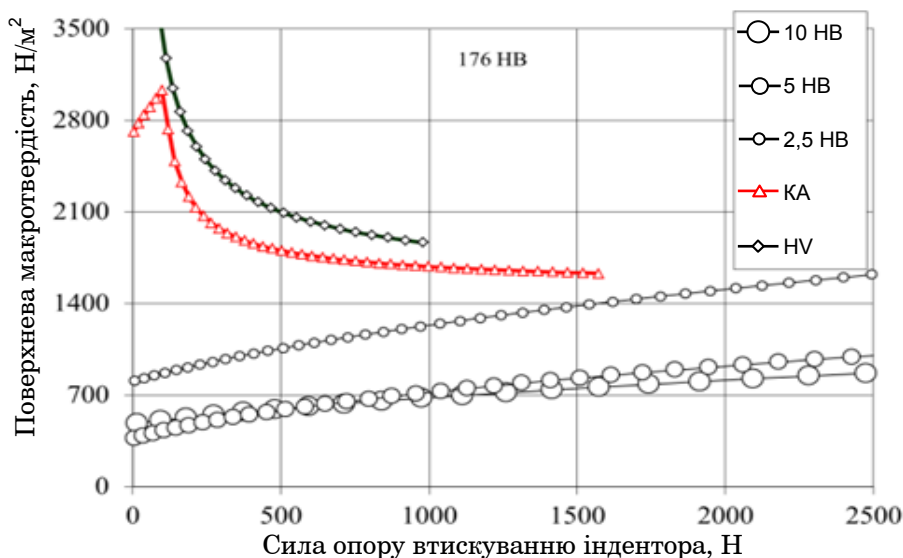


Рис. 3. Залежність поверхневої твердості в макродіапазоні від сили опору втискуванню різних за формою інденторів (○ – 10 HB – кулька \varnothing 10 мм; ○ – 5 HB – кулька \varnothing 5 мм; ○ – 2,5 HB – кулька \varnothing 2,5 мм; ▲ – KA – сфероконічний індентор; ◇ – HV – піраміда Віккерса) у зразкову міру твердості 176 HB

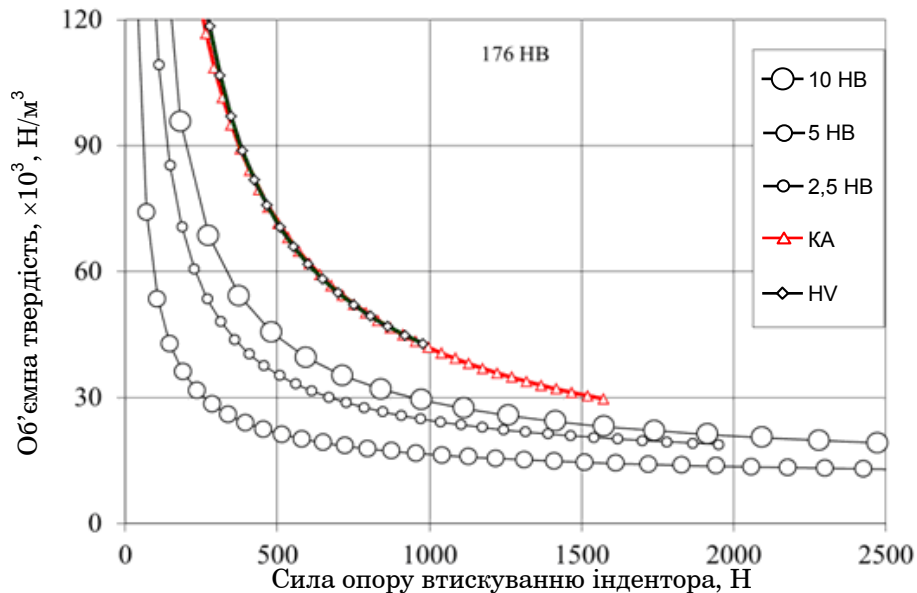


Рис. 4. Залежність об'ємної твердості в макродіпазоні від сили опору втискуванню різних за формою інденторів (○ – 10 HB – кулька $\varnothing 10 \text{ мм}$; ○ – 5 HB – кулька $\varnothing 5 \text{ мм}$; ○ – 2,5 HB – кулька $\varnothing 2,5 \text{ мм}$; ▲ – KA – сфероконічний індентор; ◇ – HV – піраміда Віккерса) у зразкову міру твердості 176 HB

зміни поверхневої твердості при індентуванні кульками однаковий, тобто зі збільшенням глибини втискування індентора твердість збільшується (рис. 3). Такий характер зміни твердості отримав назву зворотного розмірного ефекту.

При використанні піраміди Віккерса і сфероконічного індентора спостерігається принципово інший характер зміни твердості: зі збільшенням глибини втискування індентора вона зменшується, тобто має місце прямий розмірний ефект.

Об'ємна твердість зменшується зі збільшенням глибини втискування будь-якого за формою індентора (рис. 4).

Аналогічний характер зміни поверхневої та об'ємної твердості був виявлений також у мікро- і нанодіпазонах із використанням сферичних, сфероконічних і сферопірамідальних інденторів.

Вид індентора і навантаження при випробуваннях рекомендується вибирати на підставі аналізу характеру напруженого стану матеріалу при його експлуатації. Випробування можна проводити як на стандартному обладнанні, так і на спеціальному, конструкція якого визначається особливостями об'єктів, що досліджуються. Так, автори розробили універсальний твердомір на базі модифікованого приладу типу ТК і гідравлічної станції фірми "Фесто". Зовнішній вигляд універсального твердоміра наведено на рис. 5.

Конструкція даного твердоміра дозволяє використовувати при випробуваннях різні види інденторів, плавно навантажувати матеріал у межах від 0 до 2500 Н і безперервно реєструвати результати випробувань у комп'ютері.

Методи визначення твердості, що розроблені на кафедрі, розміщено в Інтернет-енциклопедії "Вікіпедія", де з ними можуть ознайомитися всі бажаючі.

На цей час на кафедрі технології металів і матеріалознавства ХНАДУ створено робочу групу з розробки та впровадження нових стандартів твердості (поверхневої, проєкційної та об'ємної з викори-

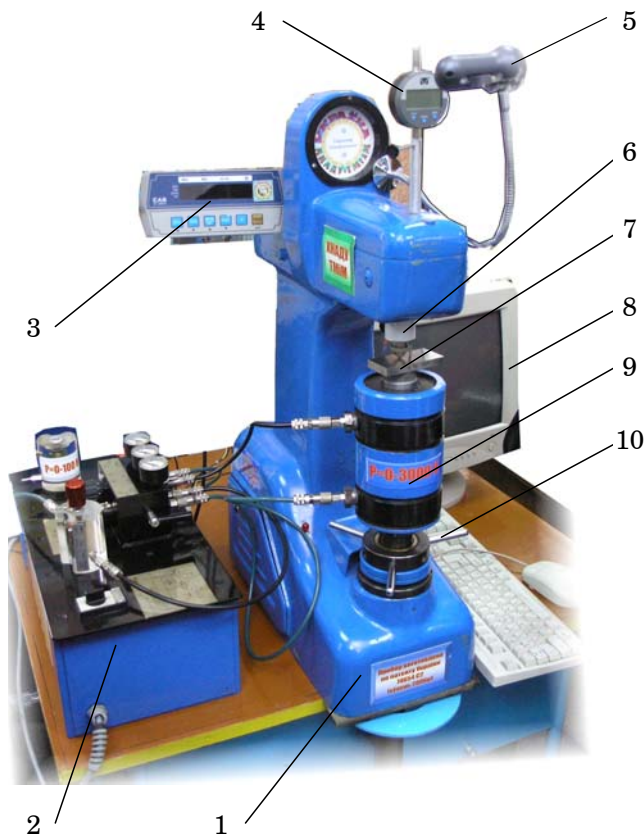


Рис. 5. Твердомір нового покоління: 1 – станина; 2 – гідростанція; 3 – АЦП; 4 – цифровий індикатор глибини втискування індентора; 5 – відеокамера; 6 – шпиндель з індентором; 7 – зразок; 8 – комп'ютер; 9 – гідроциліндр; 10 – рукоятка

станням інденторів різної форми в різних розмірних діапазонах), які є результатом багаторічних досліджень та єдиного підходу до визначення твердості.

Висновки

1. Запропоновано єдиний підхід до визначення твердості матеріалів в макро-, мікро- і нанодіапазонах, коли силу опору ділять на площу поверхні (поверхнева твердість), площу проекції (проекційна твердість) або об'єм (об'ємна твердість) втиснутої в матеріал частини індентора.

2. Для найбільш поширених форм інденторів отримано формули для розрахунку поверхневої, проекційної та об'ємної твердості.

3. Запропоновано нові методи визначення твердості, апробовані на стандартних зразкових мірах твердості. Виявлено явище прямого і зворотного розмірних ефектів при вимірюванні твердості.

Список літератури

1. Материаловедение : учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 648 с.
2. *Большаков В.И.* Прикладное материаловедение: учебник для вузов / В.И. Большаков, О.Ю. Береза, В.И. Харченко. – Днепропетровськ: РВА “Дніпро-VAL”, 2000. – 290 с.
3. Технология конструкционных материалов: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухаркин [и др.]; под ред. А.М. Дальского. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
4. *О'Нейль Г.* Твердость металлов и ее измерение: пер. с англ. / Г. О'Нейль.– М-Л.: Металлургиздат. – 1940. – 376 с.
5. *Бульчев С.И.* Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С.И. Бульчев, В.П. Алехин. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
6. Metallic Materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method : ISO 14577. – Switzerland : ISO Central Secretariat, 2002. – 31 p.
7. Патент 53640 Україна, МПК G01N 3/00, G01N 3/40. Спосіб визначення твердості матеріалів / В.І. Моценюк, І.С. Кухарева, А.В. Моценюк. – № u201005035; заявл. 26.04.2010; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19. – 4 с.