

## АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ

*В. И. МОЩЕНОК*

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

Предложен единый подход к определению твердости материалов, который заключается в ее оценке по отношению нагрузки к размеру (площади, проекции или объему) отпечатка, а также разработаны формулы для нахождения поверхностной, проекционной и объемной твердости. Проанализирован характер изменения твердости с ростом нагрузки при использовании инденторов разной формы, проиллюстрированы преимущества (эффективность, универсальность) разработанных расчетных методов.

**Ключевые слова:** *твердость, индентор, нагрузка.*

Определение твердости материалов – один из наиболее распространенных методов неразрушающего контроля в современном производстве. Это свойство широко используют как для оценки качества материалов после различных способов их получения и обработки, так и для массового контроля готовых изделий. Наиболее актуально измерение твердости в условиях стремительного развития технологий модификации поверхности, нанотехнологий и появления новых материалов, без чего невозможна градация наноматериалов по свойствам и экспресс-оценка их эксплуатационных характеристик. Однако до настоящего времени нет обобщающей теории твердости, описывающей процессы индентирования материалов как в макро-, так в микро- и нанодиапазонах.

Твердость – это способность материала сопротивляться внедрению более твердого тела (индентора) [1–3], а существующие методы ее оценки не полностью соответствуют этому определению. Еще в 1940 г. профессор О'Нейль предложил следующую классификацию основных методов определения твердости [4]: твердость по Бринеллю (отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка); твердость по Мейеру (отношение нагрузки к площади проекции поверхности отпечатка); твердость по Русселю (отношение нагрузки к объему отпечатка). В этих методах в числителе расчетных формул применяют максимальную нагрузку, прикладываемую к образцу через индентор. Однако логичнее использовать силу сопротивления его внедрению в конкретный момент времени. После выдержки под максимальной нагрузкой (обычно 10...20 s) индентор отводят от образца и измеряют геометрические параметры получившегося в металле отпечатка, которые и используют в знаменателе этих формул. Следовательно, измеряем параметры отпечатка, когда материал уже оказал сопротивление внедрению индентора и произошло упругое восстановление отпечатка. Здесь также целесообразнее использовать в знаменателе формул не параметры отпечатка, а, например, характеристики внедренной в материал части индентора в конкретный момент времени, что больше соответствовало бы классическому подходу.

С развитием науки о твердости материалов появились не только новые методы ее определения, но и неточности в их названиях. В частности, методы Бринелля, Виккерса, Берковича (согласно немецкому стандарту DIN 50359) оперируют

термином универсальная твердость [5]. С 2002 г. в международном стандарте ISO 14577 Виккерс и Беркович дают определение “твердость по Мартенсу” [6], т. е. твердость индентирования, хотя в СССР в 1960 г. этот же термин получил название кинетическая твердость [7]. Для измерения твердости в нанодиапазоне (глубина внедрения индентора не превышает 200 nm) используют метод Оливера и Фарра [8]. В этом случае максимальную нагрузку делят на площадь проекции контакта индентора с материалом. В настоящее время отсутствует единый подход к расчету твердости разными методами и существуют разночтения в самой формулировке термина.

Цель настоящей работы – разработать обобщенный подход к определению твердости материалов независимо от размерного диапазона (макро-, микро-, нано-), который в полной мере соответствовал бы ее классическому определению, а также систематизировать известные методы и сформулировать их обобщенные названия; разработать формулы для практической реализации этих методов; экспериментально исследовать образцовые меры твердости, чтобы подтвердить целесообразность и практическую эффективность предложенных методов.

**Методика исследования.** Для создания единого подхода к определению твердости материалов существующие методы условно объединили в три основные группы, в расчетных формулах которых использовали: 1 – площадь поверхности отпечатка или внедренной части индентора; 2 – площадь проекции поверхности отпечатка или внедренной части индентора; 3 – объем отпечатка или внедренной части индентора. Первую группу можно обобщить термином поверхностная твердость, под которой следует понимать отношение нагрузки на индентор к площади поверхности внедренной в материал его части. Поверхностную твердость рекомендуем рассчитывать по таким формулам.

Для сферического индентора:  $HB_{\text{surf}}^{\text{ind}} = F / (2\pi R h_{\text{ind}})$ , где  $F$  – нагрузка, N;  $R$  – радиус индентора, mm;  $h_{\text{ind}}$  – глубина его внедрения в материал, mm; для пирамиды Виккерса:  $HV_{\text{surf}}^{\text{ind}} = F / (26,429 h_{\text{ind}}^2)$ ; для модифицированной пирамиды Берковича:  $HB_{\text{surf}}^{\text{ind}} = F \cos \alpha / (3 h_{\text{ind}}^2 \cdot \text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta)$ , где  $\alpha$  – угол между высотой и апофемой пирамиды;  $\beta$  – угол между сторонами основания пирамиды; для сфероконического индентора с углом при вершине  $120^\circ$  и радиусом закругления вершины 0,2 mm:  $HR_{\text{surf}}^{\text{ind } 120-0,2} = F / (2\pi R_{\text{con}} h_{\text{ind}} + (10,88 h_{\text{ind}}^2 + 0,668 h_{\text{ind}} - 0,026))$ , где  $R_{\text{con}}$  – радиус закругления вершины индентора, mm.

Вторую группу логичнее объединить под термином проекционная твердость, т. е. отношение нагрузки к площади проекции внедренной в материал части индентора на поверхность образца. Здесь можно использовать такие формулы.

Для сферического индентора:  $HB_{\text{pr}} = F / (\pi h (2R - h))$ ; для пирамиды Виккерса:  $HV_{\text{pr}} = F / (24,5 h^2)$ ; для модифицированной пирамиды Берковича:

$$HB_{\text{pr}}^{65,27} = F / (24,494 h^2); \quad \text{для сфероконического индентора: } H_{\text{pr}}^{\text{sph-con}} = F / \left( \pi \left( \sqrt{h_{\text{sph.max}} (2R - h_{\text{sph.max}}) + \frac{h_{\text{con}}}{\text{tg} \alpha}} \right)^2 \right),$$

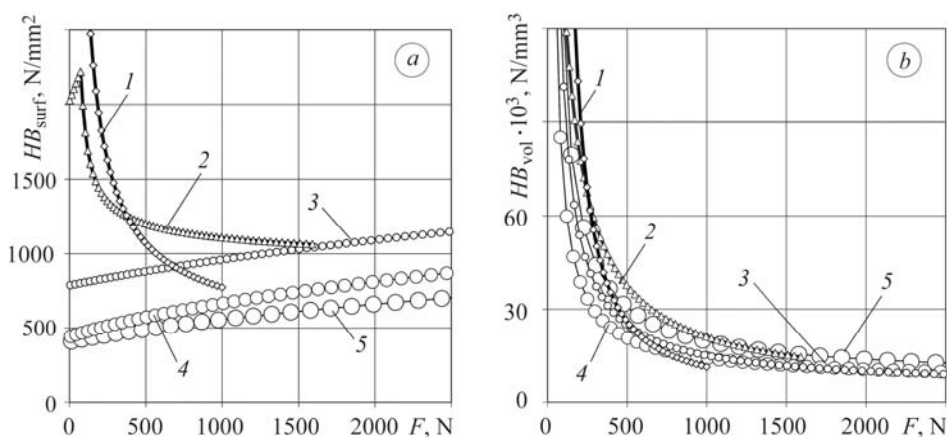
где  $h_{\text{sph.max}}$  – максимальная глубина внедрения сферической части индентора;  $h_{\text{con}}$  – глубина внедрения конической части индентора;  $\alpha$  – половина угла между образующими усеченного конуса.

Третью группу объединяет термин объемная твердость, под которой следует понимать отношение нагрузки к объему внедренной в материал части индентора. Для ее расчета разработаны следующие формулы.

Для сферического индентора:  $HB_{vol}^{ind} = F / (1,047 \cdot h_{ind}^2 (3R - h_{ind}))$ ; для пирамиды Виккерса:  $HV_{vol}^{ind} = F / (8,168 h_{ind}^3)$ ; для модифицированной пирамиды Берковича:  $HB_{vol}^{ind} = F / (8,165 h_{ind}^3)$ ; для сфероконического индентора с углом при вершине  $120^\circ$  и радиусом закругления вершины  $0,2 \text{ mm}$ :  $HR_{vol}^{ind 120-0,2} = F / (3,1414 h_{ind}^3 + 0,2906 h_{ind}^2 + 0,0089 h_{ind} - 0,00006)$ .

В методе восстановленного отпечатка поверхностную, проекционную и объемную твердость также можно определять по вышеуказанным формулам, подставляя вместо  $F$  максимальную нагрузку на индентор, а вместо размеров внедренной в материал части индентора – параметры восстановленного отпечатка. Если получить размеры отпечатка сложно или нельзя в микро- и нанодиапазонах, то можно воспользоваться разработанным [9] новым методом определения твердости в последней точке контакта индентора с материалом.

**Результаты и обсуждение.** Апробировали предложенные методы оценки поверхностной и объемной твердости, вдавливая инденторы различной формы (шарики  $\varnothing 2,5; 5$  и  $10 \text{ mm}$ , пирамида Виккерса; сфероконический индентор с углом при вершине  $120^\circ$  и радиусом закругления вершины  $0,2 \text{ mm}$ ) в образцовую меру твердости  $103 \text{ HBW } 10/3000$  (см. рисунок). Выявили, что характер изменения поверхностной твердости в этом случае одинаков: с возрастанием глубины внедрения индентора она увеличивается (см. рисунок, график *a*).



Зависимость поверхностной (*a*) и объемной (*b*) твердости от нагрузки при использовании разных инденторов на примере образцовой меры твердости  $103 \text{ HBW } 10/3000$ : 1 – пирамида Виккерса; 2 – сфероконический индентор; 3–5 – шарики  $\varnothing 2,5; 5$  и  $10 \text{ mm}$ .

Surface (*a*) and volume (*b*) hardness depending on load using operating indenters with different shapes on the example of standard block of hardness  $103 \text{ HBW } 10/3000$ : 1 – Vickers pyramid; 2 – spherical-conical indenter; 3–5 – balls  $\varnothing 2,5; 5$  and  $10 \text{ mm}$ .

При использовании пирамиды Виккерса и сфероконического индентора характер изменения твердости принципиально иной: с увеличением глубины внедрения индентора она уменьшается, что названо обратным (для сферических инденторов) и прямым (для сфероконических и пирамидальных) размерными эффектами [10, 11]. Следует обратить внимание, что при внедрении в образец сфероконического индентора поверхностная твердость вначале увеличивается (работает сферическая часть индентора), а затем начинает уменьшаться (задействована как сферическая, так и коническая части индентора). Уменьшение объемной

твердости зафиксировано с увеличением глубины внедрения вне зависимости от формы индентора (см. рисунок, график *b*). Аналогичный характер изменения поверхностной и объемной твердости выявлен в микро- и нанодиапазонах при использовании сферических, сфероконических и пирамидальных инденторов.

## ВЫВОДЫ

Предложен единый подход к определению твердости материалов в макро-, микро- и нанодиапазонах, заключающийся в ее расчете по отношению нагрузки к площади боковой поверхности (поверхностная твердость), площади проекции (проекционная твердость) и объему (объемная твердость) внедренной в материал части индентора. Для наиболее распространенных инденторов разработаны формулы расчета поверхностной, проекционной и объемной твердости. Предложенные методы апробированы на стандартных образцовых мерах твердости. Обнаружены прямой и обратный размерные эффекты.

*РЕЗЮМЕ.* Запропоновано єдиний підхід до визначення твердості матеріалів, який полягає в її оцінюванні за відношенням рівня навантаження до розміру (площі, проекції та об'єму) відбитка, а також виведені формули для визначення поверхневої, проекційної та об'ємної твердості. Проаналізовано характер зміни твердості зі зростанням навантаження за використання інденторів різної форми, показані переваги (ефективність, універсальність) розроблених розрахункових методів.

*SUMMARY.* The common approach to determining the materials hardness is proposed. The main idea is to estimate hardness by the ratio of the load to the indenter size (surface, projection and volume). The formulae for calculation of the surface, projection and volume hardness are developed. The character of hardness change depending on the load increase for different form indenters are analyzed. The advantages (efficiency, universality) of the developed calculation methods for hardness determination are shown.

1. *Материаловедение: Уч. для вузов* / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 648 с.
2. *Большаков В. И., Береза О. Ю., Харченко В. И.* Прикладне матеріалознавство: Підр. для вузів. – Дніпропетровськ: РВА “Дніпро-VAL”, 2000. – 290 с.
3. *Технология* конструкционных материалов: Уч. для студентов машиностроит. специальностей вузов / А. М. Дальский, Т. М. Барсукова, Л. Н. Бухаркин и др. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
4. *О'Нейл Г.* Твердость металлов и ее измерение / Пер. с англ. – М.; Л.: Металлургиздат, 1940. – 376 с.
5. *Testing of metallic materials – Universal hardness test. Part 1: Test method: DIN 50359-1.* – 1997. – 15 p.
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. *Бульчев С. И., Алехин В. П.* Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
8. *Oliver W. C. and 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.
9. *Патент 53640*, Україна, МПК G01N 3/00, G01N 3/40. Спосіб визначення твердості матеріалів / В. І. Мощенко, І. Є. Кухарева, А. В. Мощенко. – Опубл. 11.10.2010; Бюл. № 19.
10. *Sangwal K.* Review: Indentation size effect, indentation cracks and microhardness measurement of brittle crystalline solids – some basic concepts and trends // *Cryst. Res. Technol.* – 2009. – 44, № 10. – P. 1019–1037.
11. *Indentation Size Effect and Microhardness Study of  $\beta$ -Sn Single Crystals* / O. Sahin, O. Uzun, U. Kolemen et al. // *Chin. Phys. Lett.* – 2005. – 22, № 12. – P. 3138–3140.

Получено 25.12.2012