

ТВЕРДОМЕТРИЯ

УДК 620.178.15

**ЕДИНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОВЕРХНОСТНОЙ,
ПРОЕКЦИОННОЙ И ОБЪЕМНОЙ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ
В МАКРО-, МИКРО- И НАНОДИАПАЗОНАХ**

**В.И. Мощенок, профессор, к.т.н., ХНАДУ, Л.А. Тимофеева, профессор, д.т.н.,
Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г. Харьков**

Аннотация. Предложен единый подход и формулы для определения поверхностной, проекционной и объемной твердости материалов в макро-, микро- и нанодиапазонах. Показаны достоинства разработанных расчетных методов оценки твердости.

Ключевые слова: поверхностная, проекционная, объемная твердость, твердость по Бринеллю, Берковичу, Виккерсу, Мейеру, Мартенсу, метод Оливера и Фарра.

**ЄДИНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ,
ПРОЕКЦІЙНОЇ ТА ОБ'ЄМНОЇ ТВЕРДОСТІ МАТЕРІАЛІВ
В МАКРО-, МІКРО- І НАНОДІАПАЗОНАХ**

**В.І. Мощенок, професор, к.т.н., ХНАДУ, Л.А. Тимофеева, професор, д.т.н.,
Українська державна академія залізничного транспорту, м. Харків**

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

Ключові слова: поверхнева, проекційна, об'ємна твердість, твердість за Брінеллем, Берковичем, Віккерсом, Мейером, Мартенсом, метод Олівера і Фарра.

**COMMON METHOD FOR DETERMINING THE SURFACE,
PROJECTION AND VOLUME MATERIAL HARDNESS
IN THE MACRO-, MICRO- AND NANOSCALE**

**V. Moshchenok, Professor, Candidate of Technical Science, KhNAHU,
L. Timofeeva, Professor, Doctor of Technical Science, Ukrainian State Academy
of Railroad Transport, Kharkiv**

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

Key words: surface, projection, volume, Brinell, Berkovich, Vickers, Meyer, Martens hardness, the method of Oliver and Farr.

Введение

Современное производство тесно связано с определением твердости материалов на всех этапах своего развития. Это свойство широко используют как для оценки качества материалов после различных способов их получения и обработки, так и для массового кон-

троля готовых изделий. Наиболее актуально определение твердости в условиях стремительного развития технологий модификации поверхности, нанотехнологий и появления новых наноматериалов. Без оценки твердости не возможна 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.

Анализ публикаций

Классическое определение гласит: твердость – это способность материала сопротивляться внедрению более твердого тела (индентора) [1–3]. Существующие же методы оценки твердости не совсем соответствуют вышеприведенному определению. Еще в 1940 г. профессор О'Нейл 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).

Во всех этих методах в числителе расчетных формул применяется максимальная нагрузка, прикладываемая к образцу через индентор. Однако логичнее было бы в расчетах использовать не нагрузку при внедрении индентора на максимальную глубину, а силу сопротивления его внедрению в конкретный момент времени. После выдержки под максимальной нагрузкой в определенном периоде времени (обычно 10–20 с) индентор отводят от образца и измеряют геометрические параметры получившегося в металле отпечатка, которые и используют в знаменателе расчетных формул для определения твердости. Т.е. получается, что материал уже оказал сопротивление внедрению индентора, произошло упругое восстановление отпечатка, и только после этого мы приступаем к измерению его параметров. В этом случае также логичнее было бы использовать в знаменателе формул не параметры отпечатка, а, например, параметры внедренной в материал части индентора в конкретный момент времени. Этот подход в большей мере соответствовал бы классическому определению твердости.

Дальнейшее развитие науки о твердости материалов породило не только появление новых методов ее определения, но и неточности в их названиях. Так, например, методы определения твердости по Бринеллю, Виккерсу, Берковичу получили (согласно немецкому стандарту DIN 50359) общее название –

универсальная твердость [5]. Затем с 2002 г. методы Виккерса и Берковича по международному стандарту ISO 14577 были названы твердостью по Мартенсу [6]. Твердость по Мейеру, согласно этого же стандарта, получила название – твердость индентирования, хотя разработанный в СССР в 1960-е годы этот же метод был назван кинетической твердостью [7]. Измерение твердости по вышеуказанному методу, но в нанодиапазоне (глубина внедрения индентора не превышает 200 нм), известен как метод Оливера и Фарра [8]. Изменилась и сущность этого метода, заключающаяся в том, что величину максимальной нагрузки делят на площадь проекции контакта индентора с материалом.

На основе вышесказанного можно утверждать, что в настоящее время отсутствует единый подход расчета твердости разными методами и существуют разночтения в формулировке термина «твёрдость», и, самое главное, все известные методы не соответствуют классическому определению этого термина.

Цель и постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка обобщенного подхода к определению твердости материалов независимо от размерного диапазона (макро-, микро-, нано-), которые в полной мере соответствовали бы классическому определению твердости. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- объединить в группы известные методы определения твердости и сформулировать их обобщенные названия и сущность каждого метода;
- разработать расчетные формулы для практической реализации этих методов;
- провести экспериментальные исследования на образцовых мерах твердости, подтверждающие целесообразность предложенных методов.

Современные методы определения твердости материалов

Все основные методы определения твердости материалов условно можно разбить на три основные группы:

- 1 – методы, в расчетных формулах, которых используется площадь поверхности отпечатка или внедренной части индентора;

2 – методы, в расчетных формулах которых используется площадь проекции поверхности отпечатка или внедренной части индентора;

3 – методы, в расчетных формулах которых используется объем отпечатка или внедренной части индентора.

Первую группу методов можно назвать обобщающим термином – поверхностная твердость. Под поверхностной твердостью следует понимать отношение силы сопротивления внедрению индентора к площади поверхности внедренной в материал его части. Расчет поверхностной твердости рекомендуется осуществлять по следующим формулам:

а) для индентора сферической формы

$$HB_{\text{пов}}^{\text{инд}} = \frac{F}{2\pi R h_{\text{инд}}}, \quad (1)$$

где F – сила сопротивления внедрению индентора, Н; R – радиус сферического индентора, мм; $h_{\text{инд}}$ – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, мм;

б) для пирамиды Виккерса

$$HV_{\text{пов}}^{\text{инд}} = \frac{F}{26,429 h_{\text{инд}}^2}; \quad (2)$$

в) для модифицированной пирамиды Берковича

$$HB_{\text{пов}}^{\text{инд}} = \frac{F \cos \alpha}{3 h_{\text{инд}}^2 \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}, \quad (3)$$

где α – угол между высотой и апофемой пирамиды; β – угол между сторонами основания пирамиды;

г) для сфероконического индентора с углом при вершине 120° и радиусом закругления вершины 0,2 мм

$$HR_{\text{пов}}^{\text{инд}120-0,2} = F / (2\pi R h_{\text{инд}} + (10,88 h_{\text{инд}}^2 + 0,668 h_{\text{инд}} - 0,026)), \quad (4)$$

где R – радиус закругления вершины индентора, мм;

д) для сфероконического наноиндентора с углом при вершине 60° и радиусом закругления вершины 8,6 мкм

$$HR_{\text{пов}}^{\text{н.инд}60-8600} = F / (2\pi R h_{\text{инд}} + (2,09 h_{\text{инд}}^2 + 22805,45 h_{\text{инд}} - 10577173,84)), \quad (5)$$

где $h_{\text{инд}}$ – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, нм;

е) для индентора Шора (шкала А)

$$HSA_{\text{пов}}^{\text{инд}} = \frac{F}{7,839 h_{\text{инд}} - 1,292}. \quad (6)$$

Вторую группу методов логично назвать обобщающим термином – проекционная твердость. Под проекционной твердостью следует понимать отношение силы сопротивления внедрению индентора к площади проекции внедренной в материал части индентора на поверхность образца. Рассчитывать проекционную твердость можно по следующим формулам:

а) для индентора сферической формы

$$HB_{\text{пр}} = \frac{F}{\pi h(2R - h)}; \quad (7)$$

б) для пирамиды Виккерса

$$HV_{\text{пр}} = \frac{F}{24,5 h^2}; \quad (8)$$

в) для модифицированной пирамиды Берковича

$$HB_{\text{пр}}^{65,27} = \frac{F}{24,494 h^2}; \quad (9)$$

г) для сфероконического индентора

$$H_{\text{пр}}^{\text{сф-кон}} = F / (\pi (\sqrt{h_{\text{сф.мах}}(2R - h_{\text{сф.мах}} + \frac{h_{\text{ус.кон}}}{\operatorname{tg} \alpha})^2}), \quad (10)$$

где $h_{\text{сф.мах}}$ – максимальная глубина внедрения сферической части индентора; $h_{\text{ус.кон}}$ – глубина внедрения конической части индентора;

α – половина угла между образующими усеченного конуса.

Третью группу методов можно назвать обобщающим термином – объемная твердость. Под объемной твердостью следует понимать отношение силы сопротивления внедрению индентора к объему внедренной в материал его части. Расчет объемной твердости рекомендуется производить по следующим формулам:

а) для индентора сферической формы

$$HB_{об}^{инд} = \frac{F}{1,047 \cdot h_{инд}^2 (3R - h_{инд})}; \quad (11)$$

б) для индентора – пирамиды Виккерса

$$HV_{об}^{инд} = \frac{F}{8,168h_{инд}^3}; \quad (12)$$

в) для индентора – модифицированной пирамиды Берковича

$$HB_{об}^{инд} = \frac{F}{8,165h_{инд}^3}; \quad (13)$$

г) для сфероконического индентора с углом при вершине 120° и радиусом закругления вершины 0,2 мм

$$HR_{об}^{инд120-0,2} = F / (3,1414h_{инд}^3 + 0,2906h_{инд}^2 + 0,0089h_{инд} - 0,00006); \quad (14)$$

д) для сфероконического наноиндентора с углом при вершине 60° и радиусом закругления вершины 8,6 мкм

$$HR_{об}^{н.инд60-8600} = F / (0,349h_{инд}^3 + 9000h_{инд}^2 + 77465070h_{инд} - 52779489468), \quad (15)$$

где $h_{инд}$ – глубина внедрения индентора в исследуемый материал, нм;

е) для индентора Шора (шкала А)

$$HSA_{об}^{инд} = \frac{F}{0,831 \cdot h_{инд}}. \quad (16)$$

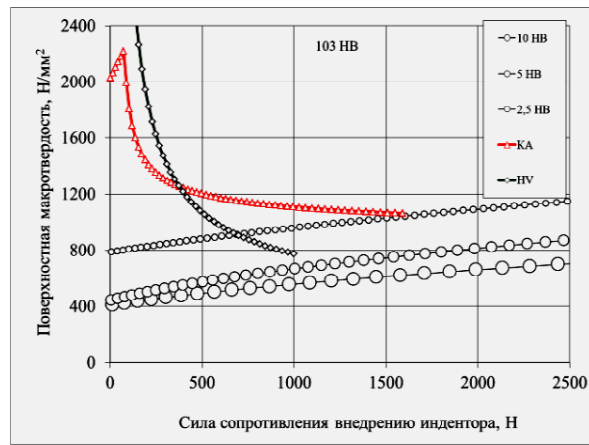
Для метода невозстановленного отпечатка можно также определять поверхностную, проекционную и объемную твердость по вышеуказанным формулам, подставляя вместо F – максимальную нагрузку на индентор, а вместо размеров внедренной в материал части индентора – параметры отпечатка. Если размеры отпечатка получить проблематично, особенно в микро- и нанодиапазонах, то мы рекомендуем воспользоваться разработанным нами новым методом определения твердости по последней точке контакта индентора с материалом [9].

Апробация предложенных методов оценки поверхностной и объемной твердости по вышеуказанным формулам была проведена путем вдавливания инденторов различной формы (шарики $\varnothing 2,5$; $\varnothing 5$ и $\varnothing 10$ мм, пирамида Виккерса; сфероконический индентор с углом при вершине 120° и радиусом закругления вершины 0,2 мм) в образцовые меры твердости 103 НВ, 176 НВ и 411 НВ (рис. 1, рис. 2). Как следует из полученных зависимостей, характер изменения поверхностной твердости при индентировании шариками одинаков, т.е. с увеличением глубины внедрения индентора твердость увеличивается (рис. 1).

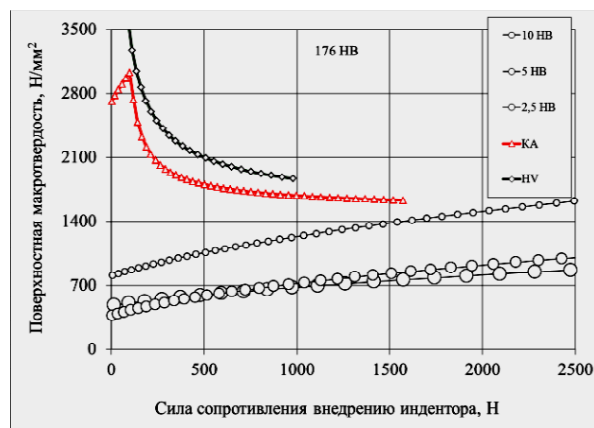
При использовании пирамиды Виккерса и сфероконического индентора наблюдается принципиально иной характер изменения твердости – с увеличением глубины внедрения индентора она уменьшается. Такой характер изменения твердости получил название обратного (для инденторов – шариков) и прямого (для сфероконических и пирамидальных инденторов) размерного эффекта [10, 11]. Следует обратить внимание, что при внедрении в образец сфероконического индентора поверхностная твердость вначале увеличивается (работает сферическая часть индентора), а затем начинает уменьшаться (работают как сферическая, так и коническая части индентора).

А вот объемная твердость уменьшается с увеличением глубины внедрения любого по форме индентора (рис. 2).

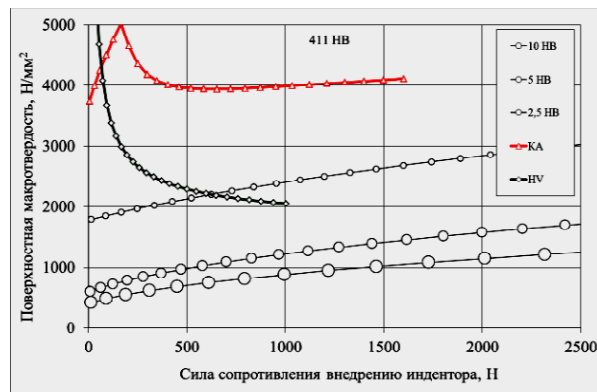
И такой характер ее изменения соблюдается для различных мер твердости (рис. 2, а, б, в).



а



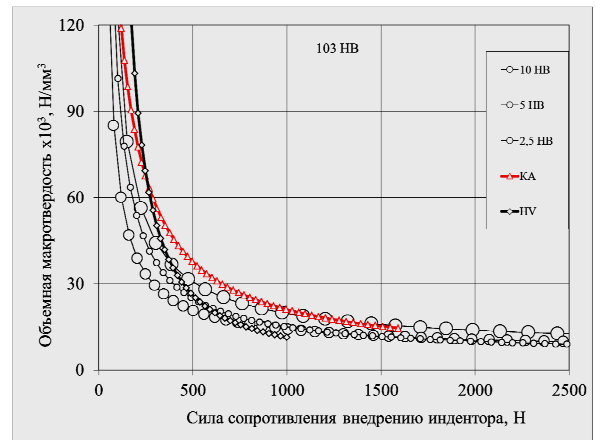
б



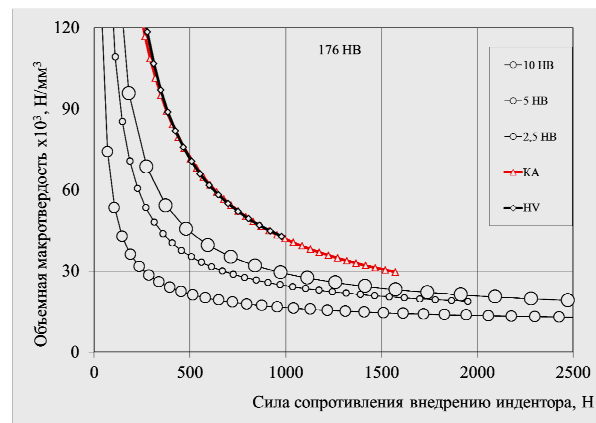
в

Рис. 1. Зависимость поверхностной твердости в макродиапазоне от силы сопротивления внедрению разных по форме инденторов (○10НВ – шарик Ø 10 мм; ○5НВ – шарик Ø 5 мм; ○2,5 НВ – шарик Ø 2,5 мм; ΔКА – сфероконический индентор; ◇НВ– пирамида Виккерса) в образцовые меры твердости: а – 103 НВ; б – 176 НВ; в – 411 НВ

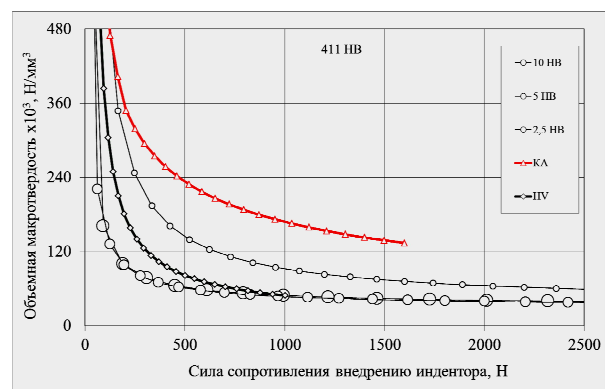
Аналогичный характер изменения поверхностной и объемной твердости был выявлен нами также в микро- и нанодиапазонах с использованием сферических, сфероконических и сферопирамидальных инденторов.



а



б



в

Рис. 2. Зависимость объемной твердости в макродиапазоне от силы сопротивления внедрению разных по форме инденторов в образцовые меры твердости: а – 103 НВ; б – 176 НВ; в – 411 НВ

Выводы

1. Предложен единый подход к определению твердости материалов в макро-, микро- и нанодиапазонах, заключающийся в делении силы сопротивления на площадь поверхности (поверхностная твердость), площадь проекции (проекционная твердость) и объем (объемная твердость) внедренной в материал части индентора.
2. Для наиболее широко распространенных форм инденторов получены формулы для расчета поверхностной, проекционной и объемной твердости.
3. Предложенные новые методы определения твердости апробированы на стандартных образцах – мерах твердости. Обнаружены явления прямого и обратного размерных эффектов при измерениях твердости.

Литература

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.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 648 с.
2. Большаков В.І. Прикладне матеріалознавство : підручник для вузів / В.І. Большаков, О.Ю. Береза, В.І. Харченко. – Дніпропетровськ : 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., исправленное – 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. 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. Булычев С.И. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С.И. Булычев, В.П. Алехин. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
8. Oliver W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 1992. – Vol. 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 ; заявник та патентовласник: Харк. нац. авт.-дор. ун. – № u201005035 ; заявл. 26.04.2010 ; опубл. 11.10.2010. Бюл. №19 – 4 с.
10. Sangwal K. Review: Indentation size effect, indentation cracks and microhardness measurement of brittle crystalline solids – some basic concepts and trends / K. Sangwal // Cryst. Res. Technol. – 2009. – Vol. 44, № 10. – P. 1019–1037.
11. Indentation Size Effect and Microhardness Study of β -Sn Single Crystals / O. Sahin, O.Uzun, U. Kolemen et al. // CHIN. PHYS. LETT. – 2005. – Vol. 22, №12. – P. 3138–3140.

Рецензент: И.П. Гладкий, профессор, к.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 20 мая 2011 г.