

УДК 620.178.152

## ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ В НАУЧНОЙ ПЕРИОДИКЕ

©Ляпунов А. М.

*Українська інженерно-педагогічна академія*

### Інформація про автора:

**Ляпунов Олександр Михайлович:** ORCID: 0000-0001-9241-0338; aleksander\_lyapunov@rambler.ru; кандидат технічних наук; старший викладач кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Твердость есть мера сопротивления тела проникновению в него другого тела. Так определяет самый доступный и распространенный вид механических испытаний материалов стандарт ASTM. Описание методов и результатов замеров твердости, приведенные в учебной литературе и научных статьях, часто не соответствуют требованиям соответствующих стандартов.

Цель статьи обратить внимание авторов на выполнение требований государственных стандартов в области измерения твердости металлов и сплавов при описании методов и указании результатов испытаний. Обеспечить сравнимость результатов измерений, приведенных разными авторами в своих статьях и правильность выбора условий испытания при измерении твердости металлов, особенно их тонких слоёв и покрытий.

В статье приведены формулы, по которым определяют твердость, и указаны правила оформления результатов испытаний по Бринеллю, Виккерсу, а также новому методу измерения твердости по Котречко.

Приведены рекомендации по внедрению метода измерения твердости по Котречко для получения результатов аналогичных твердости по Виккерсу

Показан метод вывода единицы измерения твердости и указана причина неточностей в обозначениях результатов измерений. Условия проведения испытания (нагрузка, параметры индентора и время приложения нагрузки) необходимы при измерении микротвердости тонких слоев и покрытий.

**Ключевые слова:** измерение; индентор; микротвердость; нагрузка; твердость.

**Ляпунов О. М.** «Вимірювання твердості в науковій періодиці».

Твердість є міра опору тіла проникненню в нього іншого тіла. Так визначає найдоступніший і поширеніший вид механічних випробувань матеріалів стандарт ASTM. Опис методів і результатів вимірів твердості, приведені в учбовій літературі і наукових статтях, часто не відповідають вимогам відповідних стандартів.

Мета статті звернути увагу авторів на виконання вимог державних стандартів в області виміру твердості металів і сплавів при описі методів і вказівці результатів випробувань. Забезпечити порівнянність результатів вимірів, приведених різними авторами у своїх статтях і правильність вибору умов випробування при вимірі твердості металів, особливо їх тонких шарів і покриттів.

У статті приведені формули, по яких визначають твердість, і вказані правила оформлення результатів випробувань за Брінеллем, Віккерсом, а також новому методу виміру твердості за Котречком.

Приведені рекомендації по впровадженню методу виміру твердості за Котречком для отримання результатів аналогічних твердості по Віккерсу.

Показаний метод виведення одиниці виміру твердості та вказана причина неточностей в позначеннях результатів вимірів. Умови проведення випробування (навантаження, параметри індентора та час додатка навантаження) потрібні при вимірі мікротвердості тонких шарів і покриттів.

**Ключові слова:** вимір; індентор; мікротвердість; навантаження; твердість.

*Ляпунов А.* “Hardness measuring in the scientific periodicals”.

Hardness is measure of resistance of body to penetration in him other body. So a standard determines the most accessible and widespread type of mechanical tests of materials ASTM. Description of methods and results of measuring of hardness, driven to educational literature and scientific articles, often fall short of to the requirements of corresponding standards.

Aim of the article to pay attention to authors implementation of requirements of state standards in area of measuring of hardness of metals and alloys at description of methods and pointing of results of tests. To provide comparableness of results of measuring resulted by different authors in the articles and rightness of choice of terms of test at measuring of hardness of metals, especially their skims and coverages.

To the article formulas on that determine hardness are driven, and the rules of registration of results of tests are indicated on Brinell, Vickers, and also new method of measuring of hardness on Kotrechko.

Resulted to recommendation on introduction of method of measuring of hardness on Kotrechko or the receipt of results analogical to hardness on Vickers.

The method of conclusion of unit of hardness is shown and reason is indicated inaccuracies in denotations of results of measuring. Testing (loading, parameters of indenter and time of appendix of loading) terms are needed at measuring of microhardness of skims and coverages.

**Key words:** measuring; indenter; microhardness; loading; hardness.

## **1. Постановка проблемы**

Испытания на твердость самый доступный и распространенный вид механических испытаний материалов. Время, затрачиваемый на этот вид испытания, незначительное, а испытанное изделие почти не повреждается

Твёрдость весьма чувствительна к изменению структуры металла. При изменении температуры или после термической обработки величина твердости металлов и сплавов меняется в том же направлении, что и предел текучести; поэтому часто при контроле изменения механических свойств после различных обработок металл характеризуют твёрдостью, которая измеряется проще и быстрее. Измерения микротвёрдости используют при изучении свойств отдельных зёрен, а также структурных составляющих сплавов.

Допускаемые неточности описания результатов замеров твердости, приведенные в научных статьях в определенной мере обусловлены различным освещением этих вопросов в учебной и справочной литературе. Особенно часто это касается единиц измерения твердости по Бринеллю и Виккерсу. В ряде учебников [1-3] в качестве размерности единицы измерения твердости по Бринеллю указана размерность напряжения – МПа. В научной литературе

встречаются записи типа «твердость 2410 МПа» и «микротвердость, МПа или ГПа» без указания метода или условий испытания на твердость [4-7]. Авторы учебников и пособий [8-10], которые ссылаются на государственные стандарты, предлагают проводить измерения в единицах твердости по Бринеллю (НВ) и единицах твердости по Виккерсу (НV). Однако они не обращают внимание читателей на различие в условиях проведения испытаний (действующее усилие и продолжительность выдержки), от которых зависит значения твердости. Ведь сравнение значений твердости возможно только при идентичных усилиях испытания.

Твердость – производная размерная механическая физическая величина, а единицей физической величины твердость – это физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице [11]. Таким образом, единицей измерения твердости при замере её по Бринеллю является 1 НВ, а при замере твердости по Виккерсу и микротвердости наконечником в форме правильной четырехгранной пирамиды является 1 НV. Размерность физической величины твердость –  $L^{-1}MT^{-2}$ . Одна и та же размерность может быть присуща величинам, имеющим разную качественную природу и различающимся по форме определяющего уравнения. Например, работа силы  $F$  на расстоянии  $L$  описывается уравнением  $A_1=F \cdot L$ . Кинетическая энергия тела массой  $m$ , движущегося со скоростью  $v$  равна  $A_2=mv^2/2$ . Размерности этих качественно различных величин одинаковы. То, что размерность твердости совпадает с размерностью физических величин давление и механическое напряжение, единицей измерения которых в системе СИ является паскаль (Па), и послужило причиной использования единицы мегапаскаль (МПа) для измерения твердости по Бринеллю и Виккерсу, а для измерения микротвердости – единиц мегапаскаль (МПа) и гигапаскаль (ГПа).

## **2. Цель статьи**

Обратить внимание на выполнение требований государственных стандартов в области измерения твердости металлов и сплавов при обозначении результатов испытаний. Обеспечить возможность сравнения результатов измерений, приведенных разными авторами в своих статьях и правильность выбора условий испытания при проведении измерения твердости.

## **3. Основной материал**

Обозначения результатов испытаний и единицы измерения при проведении замера твердости должны соответствовать требованиям государственных стандартов. В стандартах по измерению твердости металлов и сплавов приведены формулы, по которым производят расчеты твердости. Они показывают, что единицы измерения твердости получают делением нагрузки в кгс или 0,102 Н, приложенной к индентору, к площади отпечатка в мм<sup>2</sup>.

**ТВЕРДОСТЬ ПО БРИНЕЛЛЮ.** Измерение твердости черных и цветных металлов и сплавов по Бринеллю проводится в соответствии с новым стандартом Украины ДСТУ ISO 6506-1:2007 [12]. Сущность метода состоит во вдавливании шарика (стального или из твердого сплава) в образец (изделие) под действием нагрузки, приложенной перпендикулярно

поверхности образца, в течение определенного времени, и измерения диаметра сферического сегмента (отпечатка) на поверхности образца или изделия после снятия нагрузки.

Твердость по Бринеллю *HBW* численно равна отношению приложенного усилия *F* к площади сферического отпечатка *A* и рассчитывается по формуле:

$$HBW = 0,102 \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - d^2 / D^2}\right)}, \quad (1)$$

где *F* – приложенное усилие, Н;

*D* – диаметр шарика, мм;

*d* – диаметр отпечатка, мм.

На практике при измерении твердости по Бринеллю расчет по указанной выше формуле не производят, а используют заранее составленные таблицы, указывающие значение *HBW* в зависимости от приложенной нагрузки и диаметра отпечатка, которые приведены в новом стандарте Украины.

Твердость по Бринеллю обозначают символом *HBW*, которому предшествует числовое значение твердости из трех значащих цифр, а после символа указывают диаметр шарика, значение приложенного усилия (в кгс) и продолжительность действия усилия, если она отличается от 10 — 15 с. В предыдущем стандарте при применении стального шарика твердость по Бринеллю обозначали символом *HB*.

Обозначение твердости по Бринеллю 229 *HBW* 5 / 750 / 20 – числовое значение твердости по Бринеллю 229, определенная при применении шарика диаметром 5 мм, при усилии 7355 Н (750 кгс) и продолжительности действия усилия выдержки 20 с.

**ТВЕРДОСТЬ ПО ВИККЕРСУ.** Измерение твердости черных и цветных металлов и сплавов по Виккерсу проводятся в соответствии с новым стандартом Украины ДСТУ ISO 6507-1:2007 [13]. Сущность метода состоит во вдавливании алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом при вершине 136° в образец (изделие) под действием нагрузки от 49,03 Н до 980,7 Н, приложенной в течение определенного времени, и измерении диагоналей отпечатка, оставшихся на поверхности образца (изделия) после снятия нагрузки. Твердость по Виккерсу можно определять и при малых значениях усилия от 1,961 Н до 29,03 Н. Также можно применять и другие значения усилия, например *HV* 2,5 (24, 52 Н).

Твердость по Виккерсу (*HV*) вычисляют по формуле:

$$HV = 0,102 \frac{2F \sin(136^\circ / 2)}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2}, \quad (2)$$

где *F* – приложенное усилие, Н;

*α* – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136°;

*d* – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

На практике твердость по Виккерсу определяют по таблицам, которые приведены в новом стандарте Украины, в зависимости от длины диагонали отпечатка при выбранных нагрузках.

**Технологія машинобудування**

---

Твердость по Виккерсу при значении времени выдержки под нагрузкой 10...15 с – обозначается цифрами, которые характеризуют величину твердости, символом твердости HV и значением приложенного усилия в кгс, где 1 кгс = 9,807 Н. При других условиях испытания после букв HV указывается и усилие и время выдержки. Например: твердость 348 HV 30 – значение твердости по Виккерсу 348, которое получено при усилнии  $F = 294,2$  Н (30 кгс), времени выдержки 10 – 15 с.; а 297 HV 10 / 40 – значение твердости по Виккерсу 297, которое получено при усилнии  $F = 98,07$  Н (10 кгс) и времени выдержки 40 с.

**ТВЕРДОСТЬ ПО КОТРЕЧКО.** Новый способ измерения твердости черных и цветных металлов и сплавов, был предложен Котречко А. А. [14]. Сущность метода состоит во вдавливании алмазного наконечника в форме правильной трехгранной пирамиды с углом при вершине  $90^\circ$  в образец под действием статической нагрузки  $P$ , а значения твердости по Котречко вычисляют по формуле:

$$HK_m = P / 4,5h^2, \text{ Н / мм}^2; \quad (3)$$

где  $P$  – величина статической нагрузки приложенной к индентору, Н;

$h$  – глубина проникновения индентора в образец, мм.

Этот способ подобен методу замера твердости по Виккерсу, поэтому при его внедрении необходимо создать таблицы значений твердости для разных значений нагрузки, приложенной к индентору, в зависимости от глубины проникновения индентора в образец. Для получения результатов аналогичных твердости по Виккерсу необходимо в формулу твердости по Котречко добавить коэффициент 0,102 для перевода значений нагрузки в ньютонах (Н) в нагрузку в килограмм силы (кгс) как это сделано в формуле (2).

**МИКРОТВЕРДОСТЬ.** Измерение микротвердости черных и цветных металлов и сплавов по Виккерсу проводится в соответствии с новым стандартом Украины ДСТУ ISO 6507-1:2007 [13]. Для испытания материалов с твердостью более 1000 HV применяют алмазный наконечник с формой рабочей части в виде трехгранной пирамиды с основанием равностороннего треугольника. Для испытания на микротвердость материалов с малой толщиной испытуемого слоя (фольга, покрытия и др.) и небольшой твердостью (алюминий, медь и др.) применяют алмазный наконечник с формой рабочей части в виде четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием. Для испытания на микротвердость субтонких слоев или пленок толщиной менее 3 мкм применяют алмазный наконечник с формой рабочей части в виде бицилиндра – бицилиндрический наконечник. Измерение микротвердости с использованием трех вышеуказанных наконечников проводятся в соответствии с ГОСТом [15]. Сущность метода измерения микротвердости по Виккерсу состоит во вдавливании алмазного наконечника в образец под действием нагрузки от 0,09807 Н, до 0,9807 Н, приложенной в течение определенного времени, и измерении диагоналей отпечатка, оставшихся на поверхности образца после снятия нагрузки. Для измерения микротвердости металлов и сплавов по Виккерсу применяют алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом при вершине  $136^\circ$ .

Число микротвердости определяется делением приложенной к алмазному наконечнику нормальной нагрузки на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка и вычисляется по формуле:

$$HV = 0,102 \frac{2F \sin(136^\circ / 2)}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2}, \quad (4)$$

где  $F$  – нормальная нагрузка, которая приложена к алмазному наконечнику, Н;  
 $d$  – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм;  
 $\alpha = 136^\circ$  – угол при вершине алмазного наконечника, градусы.

На практике микротвердость определяют по таблицам, приведенным в стандарте Украины, в зависимости от длины диагонали отпечатка и нагрузки.

Микротвердость по Виккерсу обозначают HV с указанием усилия в кгс и продолжительности её приложения. Продолжительность приложения нагрузки не указывают, если она в пределах 10 – 15 с. Обозначение микротвердости, определенной четырехгранной пирамидой с квадратным основанием при нагрузке 0,098 Н, которая была приложена в течение 15 с: HV 0,01, а при нагрузке 0,98 Н, приложенной в течение 30 с: HV 0,1 / 30.

### **Выводы**

Приведены формулы и требования к обозначениям результатов измерения твердости по Бринеллю, твердости и микротвердости по Виккерсу в соответствии с требованиями новых стандартов Украины, а также новому методу измерения твердости по Котречко. Показано, что единицы измерения твердости по Бринеллю, Виккерсу и микротвердости получают делением нагрузки в кгс или 0,102 Н, приложенной к индентору, к площади отпечатка в мм<sup>2</sup>. Поэтому единицей измерения твердости по Бринеллю является 1 НВ, а по Виккерсу и микротвердости, определенной четырехгранной пирамидой с квадратным основанием, 1 HV. При этом необходимо указывать и условия приведения испытания (нагрузка, параметры индентора и время приложения нагрузки). Это особенно важно при измерении микротвердости тонких слоев и покрытий, а также для сравнения полученных разными авторами результатов измерения твердости.

Соблюдение требований к обозначениям результатов измерения твердости позволяют повысить информативность и научную ценность данных о механических свойствах металлов и их сварных соединений.

### **Список использованных источников:**

1. *Материаловедение. Технология конструкционных материалов* : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / под ред. В. С. Чередниченко. – 2-е изд., перераб. – М. : Омега-Л, 2006. 752 с. : ил.
2. Єфіменко М. Г. *Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань* : підручник для студ. вищ. навч. закл. зварювальних спец. / М. Г. Єфіменко, Н. О. Радзівілова. – Харків, 2003. – 488 с. : іл.
3. Гешелин В. Г. *Сертификация и качество металлопродукции. Методы, средства и метрологическое обеспечение механических испытаний* : справ.-метод. пособие / В. Г. Гешелин. – Харьков : Факт, 2004. – 480 с. : ил.
4. Большаков О. Є. *Структура та механічні властивості високоентропійних сплавів, отриманих механічним легуванням та спіканням під тиском* / О. Є. Большаков, В. В. Чернявський // *Металознавство та обробка металів*. – 2016. – № 2. – С. 57-58.
5. Хижняк В. Г. *Азототитаноалітування сталей та твердих сплавів* / В. Г. Хижняк, Г. Ю. Калашніков, Н. С. Лазарев // *Металознавство та обробка металів*. – 2016. – № 2. – С. 17-29.
6. Упрочняющие фазы, структура и свойства модифицированных швов низколегированных сталей / В. В. Головки, П. И. Максимова, О. С. Кушнарева, В. В. Жуков // *Автоматическая сварка*. – 2016. – № 7. – С. 3-8.
7. Особенности структуры соединения материалов Cu-Cu, Ni-Cu, сталь-Cu полученных внахлест способом сварки трением с перемешиванием / Г. М. Григоренко и др. // *Автоматическая сварка*. – 2016. – № 5. – С. 82-87.

**Технологія машинобудування**

8. *Матеріалознавство* : підручник / С. С. Дяченко, І. В. Дощечкіна, А. О. Мовлян, Е. І. Плешаков. – Харків : Видавництво ХНАДУ, 2007. – 440 с.
9. *Материаловедение* : учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин и др. ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – 6-е изд., стереотип. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 648 с. : ил.
10. *Материаловедение и технология металлов* : учебник для студ. машиностроит. спец. вузов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин и др. ; под ред. Г. П. Фетисова. – М. : Высш. шк., 2002. – 638 с. : ил.
11. Сергеев А. Г. *Метрология, стандартизация, сертификация* : учеб. пособие / А. Г. Сергеев, М. В. Латышев, В. В. Терегеря. – М. : Логос, 2003. – 536 с. : ил.
12. ДСТУ ISO 6506-1:2007. *Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінеллем. Ч. 1. Метод випробування (ISO 6506-1:2005, IDT)*. – Київ : Держстандарт України, 2007.
13. ДСТУ ISO 6507-1:2007. *Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом. Ч. 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2005, IDT)*. – Київ : Держстандарт України, 2007.
14. Пат. 95237 Україна, МПК G01N 3/42 (2006.01). *Спосіб визначення статичної твердості металів за Котречком* / О. О. Котречко. – № u201408002 ; заявл. 15.07.2014 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23. – 3 с.
15. ГОСТ 9450-76, СТ СЭВ 1175-78. *Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Measurements microhardness by diamond instruments indentation*. – М. : Изд-во стандартов, 1978.

**References**

1. Cherednichenko, V 2006, *Materialovedeniye. Tekhnologiya konstruktsionnykh materialov*, 2nd edn, Omega, Moskva.
2. Yefimenko, M & Radzivilova, N 2003, *Metaloznnavstvo i termichna obrobka zvarnykh ziednan*, Kharkiv.
3. Geshelin, V 2004, *Sertifikatsiya i kachestvo metalloproduktii. Metody, sredstva i metrologiseskoye obespecheniye mekhanicheskikh ispytany*, Fakt, Kharkiv.
4. Bolshakov, O & Cherniavskiy, V 2016, 'Struktura ta mekhanichni vlastyosti vysokoentropiinykh splaviv, otrymanykh mekhanichnym lehuванням та спиканням під тиском', *Metaloznnavstvo ta obrobka metaliv*, no. 2, pp. 57-58.
5. Khyzhniak, V, Kalashnikov, H & Lazarev, N 2016, 'Azototyanoalitivannia stalei ta tverdyykh splaviv', *Metaloznnavstvo ta obrobka metaliv*, no. 2, pp. 17-29.
6. Golovko, V, Maksimova, P, Kushnareva O & Zhukov, V 2016 'Uprochnyayushchiye fazy, struktura i svoystva modifitsirovannykh shvov nizkolegirovannykh staley', *Avtomaticheskaya svarka*, no. 7, pp. 3-8.
7. Grigorenko, G 2016, 'Osobennosti struktury soyedineniya materialov Cu – Cu, Ni – Cu, stal – Cu poluchennykh vnaKhlest sposobom svarki treniyem s peremeshivaniem', *Avtomaticheskaya svarka*, no. 5, pp. 82-87.
8. Diachenko, S, Doshchechkina, I, Movlian, A & Pleshakov, E 2007, *Materialoznavstvo*, Vydavnytstvo KhNADU, Kharkiv.
9. Arzamasov, B, Makarova, V & Mukhin, G 2004, *Materialovedeniye*, 6nd edn, Izdatelstvo MGTU im. N. E. Bauman, Moskva.
10. Fetisov, G, Karpman, M & Matyunin, V 2002, *Materialovedeniye i tekhnologiya metallov*, Vysshaya Shkola, Moskva.
11. Sergeev, A, Latshev, M & Teregerya, V 2003, *Metrologiya, standartizatsiya, sertifikatsiya*, Logos, Moskva.
12. Derzhstandart Ukrainy 2007, *Materialy metalevi. Vyznachennia tverdosti za Brinelleм. Chastyna 1. Metod vyprobuvannia (ISO 6506-1:2005, IDT)*, DSTU ISO 6506-1:2007, Derzhstandart Ukrainy, Kyiv.
13. Derzhstandart Ukrainy 2007, *Materialy metalevi. Vyznachennia tverdosti za Vickersom. Chastyna 1. Metod vyprobuvannia (ISO 6507-1:2005, IDT)*, DSTU ISO 6507-1:2007, Derzhstandart Ukrainy, Kyiv.
14. Kotrechko, O 2014, *Sposib vyznachennia statychnoi tverdosti metaliv za Kotrechkom*, UA Patent 95237.
15. Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam 1978, *Measurements microhardness by diamond instruments indentation*, GOST 9450-76, ST SEV 1175-78, Izdatelstvo standartov, Moskva.

Стаття надійшла до редакції 1 грудня 2016 р.