

UDC 53.081; 53.082.1

HARDNESS – VOLUMETRIC CHARACTERISTIC OF MATERIAL

O. Ye. Semenovskiy, L. L. Titova, O. V. Mykhniian

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine.

Speciality of article: 131 – applied mechanics.

Corresponding authors: l_titova@nubip.edu.ua.

Article History: Received – June 2021, Accepted – November 2021, Published – 17 December 2021.

Bibl. 13, fig. 1, tabl. 5.

Abstract. Producing details for different purposes is guided by the conditions of their work and, therefore, attention is paid to such characteristics as strength, viscosity and hardness. Only the method of determining the hardness of the material allows you to conduct research without destroying the detail in addition to physical methods. This takes into account the fact that the other properties are indirectly related to the hardness parameter. The main disadvantage of all modern methods of the material hardness measurement is the inconsistency of the practical content of the units of measurement of the studied parameter to the theoretical essence of hardness - as a physical quantity that characterizes the properties of a rigid body. The units of all hardness measurement methods, depending on the scale factor, are usually compared by converting their values to such generally accepted methods as Brinell, Rockwell, or Vickers. The conversion of the hardness values obtained by different methods should be used very carefully and preferably for a preliminary assessment of the relative changes in material properties. When applying these methods, the units of measurement are the ratio between the load on the indenter, a given standardized shape and the area or depth of the imprint. However, based on the physical content of a property such as hardness, it is necessary to determine the relationship between the load on the indenter and the volume of the displaced material. This work aims to establish a theoretical basis for the digital characteristics of units of hardness obtained by different measurement methods. To provide the physical meaning of the determining of hardness, the dependence of the volume of the displaced material on the applied load was determined. The comparison of these values made it possible to really determine the relationship between the units of different methods not based on practical comparisons, but by summing up the theoretical basis. The obtained results indicate a sufficiently high correlation between the results obtained with different hardness measurement methods.

Key words: performance, mechanical properties, hardness, micro-hardness, volumetric hardness, indenter, penetration depth, displaced metal volume.

Introduction

In modern mechanical engineering, the main parameters that determine the use of materials are their performance characteristics determined by mechanical properties. Depending on the type of loads and working conditions of the details, their material must meet certain strength, viscosity and hardness parameters.

It is often accepted to control the listed detail properties after their manufacturing and strengthening by application of certain technological processes in modern mechanical engineering through determining of detail hardness, both volume wise as well as surface wise. Only the latter method, in addition to physical methods, allows you to conduct research without making special samples and destroying the detail. This considers the fact that the other properties are indirectly related to the hardness parameter.

Formulation of problem

The main disadvantage of all modern methods of the material hardness measurement is the lack, or rather inconsistency, of the practical content of the measurement units of the studied parameter to the theoretical essence of the hardness as a physical quantity that characterizes the properties of a rigid body [1].

Modern portable hardness measurement devices often determine hardness-related properties that vary significantly depending on the range of values being tested.

Analysis of recent researches results

The method of elastic rebound (also known as the method of determining the hardness through the dynamic load) is based on the definition of such property as elasticity which is usually determined by studying the material strength. This characteristic is closely related to the hardness. Although the relationship is different depending on the value ranges. I.e., there are 12 measurement scales for plastics.

The hardness is also determined by the damping time of the pendulum oscillations after contact (rebound) with the test material. In addition, there are devices that work on the principle of measuring electrical resistance and ultrasonic methods.

In modern metallurgy, the units of all the hardness measurement methods are commonly compared by converting their values to the broadly accepted methods such as Brinell, Rockwell, or Vickers (depending on the scale factor) [2].

But even the units of these fundamental methods do not correspond to the very physical meaning of the hardness as a physical quantity. This definition should be considered specifically in a three-dimensional space. To confirm this, we give the classic definition of hardness for a solid body - "Hardness is the ability of a body to resist the penetration of another more rigid body." That is, the penetration of the indenter through the surface area, as in the case of the Brinell method, or to a certain depth when following the Rockwell or Vickers methods.

When applying these methods, we have units of measurement lacking physical basis. That is, the units of measurement are the ratio between the load on the indenter given standardized shape and the area or depth of the imprint. However, based on the physical content of such property as hardness, it is necessary to determine the relationship between the load on the indenter, and the volume of the displaced material.

Purpose of research

The work aims to establish a theoretical basis for the digital characteristics of hardness units obtained by different measurement methods.

Research results

In our work, we compared the units of measurement of the main methods of determining hardness by giving them a real physical meaning. For this matter, the dependence of the volume of displaced material on the applied load was determined. The comparison of these values makes it possible to realistically determine the relationship between units of different methods not based on practical comparisons but by summarizing the theoretical basis.

Given the different shape of the indents as well as the wide range of load changes it is necessary to introduce certain coefficients that will take into account the scale factors.

To ensure the accuracy of the obtained results the research used a fairly wide range of measurements of the properties of the studied materials. The lower hardness limit was taken to be 15 units on the HRC scale which corresponds to the hardness of unhardened steel. And the upper limit was taken at 60 HRC respectively. This hardness characterizes the properties of the device materials. The reference data of hardness units using different scales is presented in the table 1 [3-6].

Table 1. The relationship of the hardness values determined by different hardness measurement devices

Hardness Value			
HB	HRC	HRB	HV
192	15	92	190
217	20	97	217
248	25	101	240
286	30	107	285
375	40	-	390
601	60	-	746
Load. kg			
300	150	100	0.1

Since our research assumes that the real physical quantity that corresponds to the theoretical definition of a rigid body is the ability of the volume of the body to penetrate the indenter, we derived formulas for the basic hardness measurement.

Under the Brinell method, the basic values are the radius of the ball and the depth of its penetration during indentation. The depth of penetration h is determined from the equation:

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = R - \sqrt{R^2 - r^2}, \text{ mm} \quad (1)$$

where: D is the ball diameter, mm; R is the ball radius, mm; d and r are diameter and radius of the imprint, mm.

Then the volume of the displaced metal is determined as follows:

$$V = \pi h^2 \cdot \left(R - \frac{1}{3}h\right), \text{ mm}^3 \quad (2)$$

$$R = 5 \text{ mm.}$$

To convert the units obtained using the Rockwell method indenter diamond cone with an angle at the apex of 120° is obtained from the following:

$$h = (100 - \text{HRC}) \cdot 0,002, \text{ mm} \quad (3)$$

The formula for determining the volume of displaced metal by the Rockwell method is derived based on the volume of the cone:

$$V = \pi h^3, \text{ mm}^3 \quad (4)$$

Similarly, the formula for research by the method of Rockwell is derived. When a steel ball with a diameter of 1,588 mm is used as an indenter, the depth of the penetration is determined by the formula:

$$h = (130 - \text{HRC}) \cdot 0,002, \text{ mm} \quad (5)$$

And the volume of the displaced metal is respectively:

$$V = \pi h^2 \left(R \cdot \frac{1}{3}h\right), \text{ mm}^3 \quad (6)$$

In the study of microhardness where a diamond pyramid with an angle at the apex of 136° is used as an indenter, the following equations hold:

$$h = \frac{d}{2} \cdot \tan 68^\circ = \frac{d}{2} \cdot 2,48, \text{ mm} \quad (7)$$

where: d is the imprint diameter (average value), mm;

$$V = \frac{1}{3} S \cdot h = \frac{1}{6} \cdot d^2 \cdot h, \text{ mm}^3 \quad (8)$$

The formula to determine the volumetric hardness of the material given the value of the volume of the displaced metal under load takes the form:

$$P_V = \frac{P}{V}, \text{ kH/mm}^3 \quad (9)$$

where P is the load acting on the metal, kH; V is the displaced metal volume, mm^3 . The calculation results are shown in the tables 2-5.

Table 2. The calculated values of hardness derived under the Brinell method on the HB scale.

Hardness HRC (Reference data)	15	20	25	30	40	60
Imprint diameter, mm (Reference data)	4.3	4.1	3.85	3.6	3.15	2.5
Depth of penetration h, mm	0.49	0.44	0.39	0.34	0.25	0.16
Volume of the displaced metal, mm ³	3.65	2.95	2.32	1.77	0.97	0.40
Volumetric hardness, κH/mm ³	8.22	10.17	12.93	16.94	30.93	75

Table 3. The results of calculations for hardness values under the Rockwell method on the HRC scale.

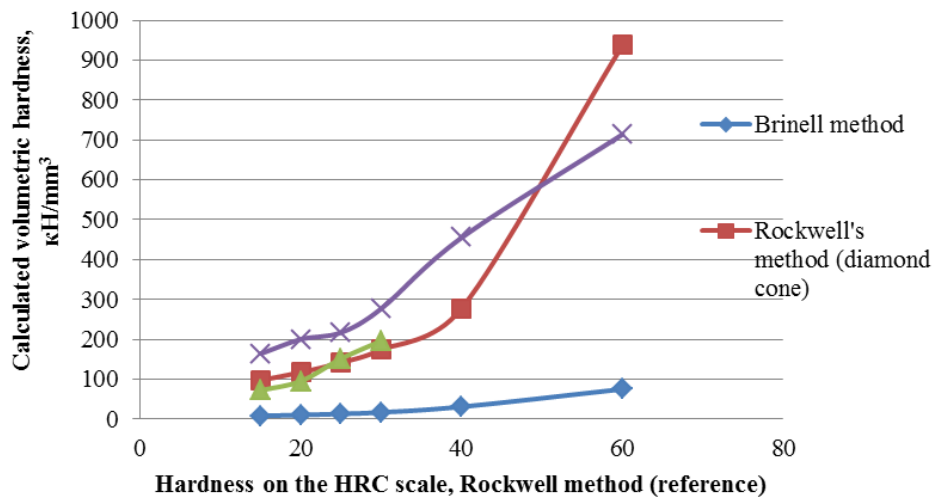
Hardness HRC (Reference data)	15	20	25	30	40	60
Depth of penetration h, mm	0.17	0.16	0.15	0.14	0.12	0.08
Volume of the displaced metal, mm ³	0.154	0.128	0.0106	0.0086	0.0054	0.0016
Volumetric hardness, κH/mm ³	97.40	117.19	141.51	174.42	277.78	937.5

Table 4. The results of calculations for hardness values under the Rockwell method on the HRB scale.

Hardness HRC (Reference data)	15	20	25	30
Depth of penetration h, mm	0.076	0.066	0.052	0.046
Volume of the displaced metal, mm ³	0.0139	0.0105	0.0065	0.0051
Volumetric hardness, κH/mm ³	71.94	95.24	151.5	196

Table 5. The results of calculations for hardness values under the Vickers method on the HV scale.

Hardness HRC (Reference data)	15	20	25	30	40	60
Imprint diameter, mm (Reference data)	31	29	28	26	22	15
Depth of penetration h, mm	0.038	0.036	0.035	0.032	0.027	0.019
Volume of the displaced metal, mm ³	0.0000061	0.000005	0.0000046	0.0000036	0.0000022	0.0000014
Volumetric hardness, κH/mm ³	163.93	200	217	277	455	714

**Fig. 1.** The nature of the change in volumetric hardness of materials in the 15-60 HRC interval.

The relationship between the values of the hardness units of different measurement methods and the actual values of volumetric hardness is illustrated in the Figure 1.

Conclusions

1. An attempt is made to theoretically substantiate the reduction of empirical (numerical) values of units of different methods of hardness measurement to real values of volumetric hardness which has a real physical meaning.

2. The obtained results indicate a sufficiently high correlation between the results obtained under different hardness measurement methods.

3. The obtained conclusions are illustrated and confirmed graphically.

4. The data obtained in research under the Brinell method are somewhat different which is explained by the scale factor.

References

1. Vilys J., Ciuplys K, Terentjev K, Kolmakov A. et al. (2003). Particularities of Plastic Deformation of Metals Near Surface Layers. Kaunas. Technologija. 208.
2. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskiy M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. (2021). Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 4(7(112)). 41-49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>.
3. DSTU EN 6506-1: 2007 Metallic materials. Determination of Brinell hardness. Part 1. Test method.
4. DSTU EN 6506-4: 2008 Metallic materials. Determination of Brinell hardness. Part 4. Table of hardness values.
5. DSTU EN 6507-1: 2007 Metallic materials. Determination of Vickers hardness. Part 1. Test method.
6. DSTU EN 6508-1: 2013 Metallic materials. Determination of Rockwell hardness. Part 1. Test method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T).
7. Titova L. L. (2020). Criteria for evaluation of efficiency of using machines in agricultural complex. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 11(2). 151-156. ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica. DOI: 10.31548/machenergy.2020.02.151-156.
8. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 6 (7-108). 71-79. doi: 10.15587/1729-4061.2020.217747.
9. Student M., Gvozdesky V., Student O., Prentkovskis O., Maruschak P., Olenyuk O., Titova L. (2019). The Effect of Increasing the Air Flow Pressure on the Properties of Coatings during the Arc Spraying of

Cored Wires. Strojnický Casopis. 69(4). 1 December. 133-146.

10. Rogovskii I. L., Titova L. L., Remshev E. Yu., Solomka O. V., Voinash S. A., Malikov V. N., Olekhver A. I. (2021). Research of sliding bearings with reverse friction pair and inlaid liners made of thermoplastic composite materials. Journal of Physics: Conference Series. 1889. 042010. doi:10.1088/1742-6596/1889/4/042010.

11. Titova L. L. (2021). Modeling of transients of dynamic model of power plant of machines for forestry works. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 12(1). 147-154.

12. Titova L. L. (2021). Methods of finding the optimal parameters of production processes with variable composition of machines for forestry work. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 12(2). 97-104.

13. Titova L. L. (2021). Mathematical model of optimization of parameters of production processes of machines for forestry works. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 12(3). 77-85.

Список літератури

1. Vilys J., Ciuplys K, Terentjev K, Kolmakov A. et al., Particularities of Plastic Deformation of Metals Near Surface Layers. Kaunas. Technologija. 2003. 208 p.
2. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskiy M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 4. Issue 7(112). P. 41-49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>.
3. ДСТУ EN 6506-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінеллем. Частина 1. Метод випробування.
4. ДСТУ EN 6506-4:2008 Металеві матеріали. Визначення твердості за Брінеллем. Частина 4. Таблиця значень твердості.
5. ДСТУ EN 6507-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом. Частина 1. Метод випробування.
6. ДСТУ EN 6508-1:2013 Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T).
7. Titova L. L. Criteria for evaluation of efficiency of using machines in agricultural complex. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11. No 2. P. 151-156. ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica. DOI: 10.31548/machenergy.2020.02.151-156.
8. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of

Enterprise Technologies. 2020. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi: 10.15587/1729-4061.2020.217747.

9. Student M., Gvozdetzky V., Student O., Prentkovskis O., Maruschak P., Olenyuk O., Titova L. The Effect of Increasing the Air Flow Pressure on the Properties of Coatings during the Arc Spraying of Cored Wires. *Strojnicky Casopis*. 2019. Vol. 69. Issue 4. 1 December 2019. P. 133-146.

10. Rogovskii I. L., Titova L. L., Remshev E. Yu., Solomka O. V., Voinash S. A., Malikov V. N., Olekhver A. I. Research of sliding bearings with reverse friction pair and inlaid liners made of thermoplastic composite materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1889. 042010. doi:10.1088/1742-6596/1889/4/042010.

11. Тітова Л. Л. Моделювання перехідних процесів динамічної моделі силової енергетичної установки машин для лісотехнічних робіт. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 1. P. 147-154.

12. Тітова Л. Л. Способи пошуку оптимальних параметрів виробничих процесів зі змінним складом машин для лісотехнічних робіт. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 2. P. 97-104.

13. Тітова Л. Л. Математична модель оптимізації параметрів виробничих процесів машин для лісотехнічних робіт. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 3. P. 77-85.

ТВЕРДІСТЬ – ОБ'ЄМНА ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛУ

О. Є. Семеновський, Л. Л. Тітова, О. В. Михнян

Анотація. При виготовленні деталей різного призначення керуються умовами їх роботи і, відповідно, звертають увагу на такі характеристики, як міцність, в'язкість та твердість. Тільки методика визначення твердості матеріалу, окрім фізичних методів, дозволяє проводити дослідження не руйнуючи деталь. При цьому враховується той фактор, що решта властивостей побічно пов'язана з параметром твердості. Основний недолік всіх сучасних методів вимірювання твердості матеріалів полягає в невідповідності практичного змісту одиниць вимірювання досліджуваного параметру теоретичній суті твердості - як фізичної величини, що характеризує властивості твердого тіла. Одиниці всіх методів вимірювання твердості для їх практичного співставлення, залежно від масштабного фактору, прийнято порівнювати, через переведення їх величин до таких загальноновизнаних методів, як Брінелля, Роквелла, або Віккерса. Користуватися переведенням величин твердості, отриманих різними методами, слід дуже обережно і переважно для попередньої оцінки відносної зміни властивостей матеріалу. При застосуванні цих методів ми маємо одиниці вимірювання, являють собою співвідношення між навантаженням на індентор, заданої стандартизованої форми та площею, або глибиною відбитка. Хоча виходячи з фізичного змісту такої властивості, як твердість необхідно визначати співвідношення між

навантаженням на індентор та об'ємом витісненого матеріалу. Дана робота має на меті встановити теоретичне підґрунтя до цифрових характеристик одиниць твердості, отриманими при різних методиках вимірювання. Для надання фізичного змісту визначення твердості в роботі проводилось визначення залежності об'єму витісненого матеріалу від прикладеного навантаження. Співставлення саме цих величин дало можливість реально визначати співвідношення між одиницями різних методів не базуючись на практичних порівняннях, а шляхом підведення теоретичної бази. Отримані результати вказують на достатньо високу кореляцію між результатами отриманих при різних методиках вимірювання твердості.

Ключові слова: експлуатаційні характеристики, механічні властивості, твердість, мікротвердість, об'ємна твердість, індентор, глибина

ТВЕРДОСТЬ – ОБЪЕМНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛА

А. Е. Семеновский, Л. Л. Титова, Е. В. Михнян

Аннотация. При изготовлении деталей различного назначения руководствуются условиями их работы и соответственно обращают внимание на такие характеристики, как прочность, вязкость и твердость. Только методика определения твердости материала, кроме физических методов, позволяет проводить исследования не разрушая деталь. При этом учитывается тот фактор, что остальные свойства косвенно связаны с параметром твердости. Основной недостаток всех современных методов измерения твердости материалов заключается в несоответствии практического содержания единиц измерения изучаемого параметра теоретической сущности твердости – как физической величины, характеризующей свойства твердого тела. Единицы всех методов измерения твердости для их практического сопоставления, в зависимости от масштабного фактора, принято сравнивать через перевод их величин к таким общепризнанным методам, как Бринелля, Роквелла, или Виккерса. Пользоваться переводом величин твердости, полученных разными методами, следует очень осторожно и предпочтительно для предварительной оценки относительной

изменения свойств материала. При применении этих методов мы имеем единицы измерения, представляющие собой соотношение между нагрузкой на индентор, заданной стандартизированной формы и площадью или глубиной отпечатка. Хотя исходя из физического содержания такого свойства, как твердость, необходимо определять соотношение между нагрузкой на индентор и объемом вытесненного материала. Данная работа имеет целью установить теоретическую основу к цифровым характеристикам единиц твердости, полученным при различных методиках измерения. Для придания физического содержания определение жесткости в работе проводилось определение зависимости объема вытесненного материала от приложенной нагрузки.

Сопоставление этих величин дало возможность реально определять соотношение между единицами различных методов, не основываясь на практических сравнениях, а путем подведения теоретической базы. Полученные результаты указывают на достаточно высокую корреляцию между результатами, полученными при различных методиках измерения твердости.

Ключевые слова: эксплуатационные характеристики, механические свойства, твердость, микротвердость, объемная твердость, индентор, глубина проникновения, объем вытесненного металла.

О. Є. Семеновський ORCID 0000-0003-3358-1297.

Л. Л. Тітова ORCID 0000-0001-7313-1253.

О. В. Михнян ORCID 0000-0003-3210-4173.