

Структура та об'ємна твердість матеріалів

Семеновський О. Є., кандидат технічних наук, доцент, semenovski@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0451-9566>

Михнян О. В.*, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
mixnyan@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3210-4173>

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

В машинобудуванні основними параметрами, що визначають застосування матеріалів є їх експлуатаційні характеристики, які визначаються механічними властивостями. Матеріал повинен відповідати заданим параметрам міцності, твердості, пружності та в'язкості. Тільки методика визначення твердості матеріалу, окрім фізичних методів, дозволяє проводити дослідження без виготовлення спеціальних зразків не руйнуючи деталь. При цьому враховується той фактор, що решта властивостей побічно пов'язана з параметром твердості.

Класичне визначення твердості матеріалів, як механічної властивості – це є здатність твердого тіла чинити опір проникненню в нього іншого більш твердого тіла. Виходячи з цього твердість характеризується величиною, тобто об'ємом, на яку більш тверде тіло проникає в досліджуваний матеріал.

Зараз існує надзвичайно багато методик визначення твердості, але всі вони є побічними. Навіть найбільш стандартизовані методи враховують площу взаємодії між індентором і досліджуваним матеріалом, яка в значній мірі залежить від геометрії індентора та навантаження. Об'ємна характеристика твердості, яка запропонована в даній роботі, враховує як навантаження так і геометрію індентора.

В сучасному металознавстві 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.

Для досліджень автори застосовували розроблену методику, яка передбачає застосування єдиної характеристики – об'ємної твердості матеріалів.

Ця характеристика не вимагає застосування перехідних таблиць одиниць твердості отриманих при різних методах. Об'ємна твердість, на відміну від інших методів, реально відповідає фізичному змісту характеристики твердості, як здатності матеріалу чинити опір втіленню в нього іншого, більш твердого матеріалу. Вона характеризується витісненим питомим об'ємом.

Математично вона характеризується зусиллям, яке необхідне для витіснення одного кубічного міліметра речовини.

Метою даної роботи було наочна демонстрація можливості застосування поняття об'ємної твердості, як характеристики, яка відповідає фізичному змісту цієї властивості матеріалів. Показати, що запропонована методика дає можливість реального порівняння твердості матеріалів з широким спектром властивостей.

Для забезпечення широкого діапазону досліджень були вибрані матеріали з різною внутрішньою будовою, залежно від хімічного складу сплавів, а також режиму хіміко-термічної обробки.

Проведені порівняння результатів отриманих при різних методах дослідження твердості і показано, що саме об'ємна твердість може наглядно характеризувати та узагальнювати дані результати.

Ключові слова: об'ємна твердість, механічні властивості, комплексне легування, сталь, термічна обробка.

Метою даної роботи була наочна демонстрація можливості застосування поняття об'ємної твердості, як характеристики, яка відповідає фізичному змісту цієї властивості матеріалів. Показати, що запропонована методика дає можливість реального порівняння твердості матеріалів з широким спектром властивостей.

Для забезпечення широкого діапазону досліджень були вибрані матеріали з різною внутрішньою будовою, залежно від хімічного складу сплавів, а також режиму хіміко-термічної обробки.

При цьому структура сталі була визначальним фактором, тому що одні і ті ж властивості за твердістю можна досягти, як завдяки зміні хімічного складу сталі, а також режимів термічної і хіміко-термічної обробки.

На твердість сталі визначальний вплив, як відомо, має вміст вуглецю, але в певних межах механічні властивості сплавів змінюються за рахунок зміни ступеню легування. При цьому це стосується як властивостей сталі в рівноважному стані, так і в зміцненому, після термічної та хімічно-термічної обробки.

Для узагальнення результатів досліджень в якості основних структурних складових визначались – розмір аустенітного зерна, морфологія карбідної фази та мартенситу. Саме ці фактори, визначають властивості сплаву, як в рівноважному так і в термічно зміцненому стані.

Дослідження проводились на сталях легуваних комплексом елементів, що зміцнює твердий розчин, а також концентрацію та морфологію карбідної фази.

В якості основного методу, що застосовується для визначення загального рівня фізико-механічних властивостей сплаву в металознавстві прийнято застосовувати методи визначення твердості.

Їх переваги, в першу чергу в тому, що вони дають можливість отримувати результати безпосередньо на готових деталях [1]. Крім того твердість, в певній мірі визначає характеристики міцності та пружності, а також побічно вказує на в'язкість і пластичність сталі.

В сучасному металознавстві, застосовується різні методи визначення твердості [2, 3, 4, 5] в залежності від масштабних факторів та факторів, що визначаються внутрішньою будовою, а також видом і режимами зміцнення [6].

За наведеними причинами які визначають наявність цілого комплексу характеристик твердості та одиниць вимірювань [7], для кожного методу окремо, застосовувалась методика запропонована авторами в роботі [8], яка передбачає застосування єдиної характеристики – об'ємної твердості

Методи дослідження та контролю якості металів

матеріалів. Ця характеристика не вимагає застосування перехідних таблиць одиниць твердості отриманих при різних методах.

Вона є єдиною методикою, що описує дійсні властивості твердості, тобто враховуються не площа залишеного відбитку різноманітними за формою інденторами і при змінних навантаженнях, що визначаються при різних методиках, а зусиллям необхідне для витіснення 1 мм³ матеріалу.

Стандартні методики характеризують твердість, як співвідношення прикладного зусилля до площі відбитка, отриманого в результаті взаємодії з індентором. Це стосується при методах за Брінеллем та Вікерсом, а при методі Роквелла враховується глибина проникнення індентара. Тому саме характеристика об'ємної твердості дозволяє об'єднати результати, отримані за допомогою різних методик не за допомогою таблиць, а введенням єдиної реальної фізичної величини. Вона характеризується питомим зусиллям необхідним для витіснення 1 мм³ матеріалу, що за фізичним змістом відповідає визначенню твердості.

Для розуміння більш точної відповідності визначення поняття твердості як фізичної величини, авторами запропоновано ввести узагальнюючу характеристику – об'ємну твердість матеріалу.

Об'ємна твердість, на відміну від інших методів враховує витіснений об'єм металу, що відповідає фізичному змісту характеристики твердості матеріалу, як здатності матеріалу чинити опір втіленню в нього іншого, більш твердого матеріалу.

Методика досліджень передбачає визначення властивостей залежно від хімічного складу сплаву, а також режиму хіміко-термічної обробки.

Вплив хімічного складу. Структура сплаву розглядалася, як зв'язуючи ланка, між хімічним складом і властивостями сплаву. Тому досліджувався вплив комплексного легування, елементами що змінюють твердість в рівноважному стані. Дані хімічного складу сталей наведені в табл. 1 та механічних властивостей їх в табл. 2.

Таблиця 1
Хімічні склади досліджуваних сталей

Table 1
Chemical compositions of the investigated steels

Вміст легуючих елементів, %								
Марки сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Nb	Ca
15XГН	0,13	0,34	0,89	1,03	0,99	-	-	0,005
15XГНТ	0,16	0,34	0,89	0,92	1,03	0,04	-	0,005
18ХГТ	0,18	0,41	1,02	0,97	0,21	0,07	-	-
15XГНТБ	0,16	0,36	1,03	0,98	1,01	0,04	0,11	0,005
*Примітка: вміст S, P не більше ніж 0,030 % кожного відповідно ДСТУ								

Таблиця 2
Механічні властивості досліджуваних сталей

Table 2
Mechanical properties of the investigated steels

Марка сталі	Характеристики				
	Межа плинності, σ_t , МПа	Межа міцності, σ_b , МПа	Відносне подовження, δ , %	Ударна в'язкість, КСУ, Дж/м ²	Твердість, HRC
15ХГН	860	980	15	980	33
15ХГНТ	1063	1180	13	1080	39
18ХГТ	901	1060	11	970	40
15ХГНТБ	1160	1290	15	1280	44

В нашій роботі дослідження проводились на низьковуглецевих легованих сталях. Зміна структурного складу та властивостей визначалася на зразках після хіміко-термічної обробки за оптимальним режимом, що застосовується для зміцнення шестерень:

- цементація при температурі 930 ± 10 °С в газоподібному карбюраторі, тривалість 10 годин;
- охолодження до температури 400...300 °С, для того щоб відбулося повне $\gamma - \alpha$ перетворення;
- нагрівання до температури гартування 820 °С, витримка 20 хвилин та охолодження в маслі ($t = 70 \dots 90$ °С);
- відпуск при температурі 220 °С, тривалістю 2 години.

В результаті на поверхні сталі отримали структуру відпущеного мартенситу (рис. 1, 2), яка в серцевині переходить у низьковуглецевий мартенсит. При порівнянні структур сталей з різним вмістом

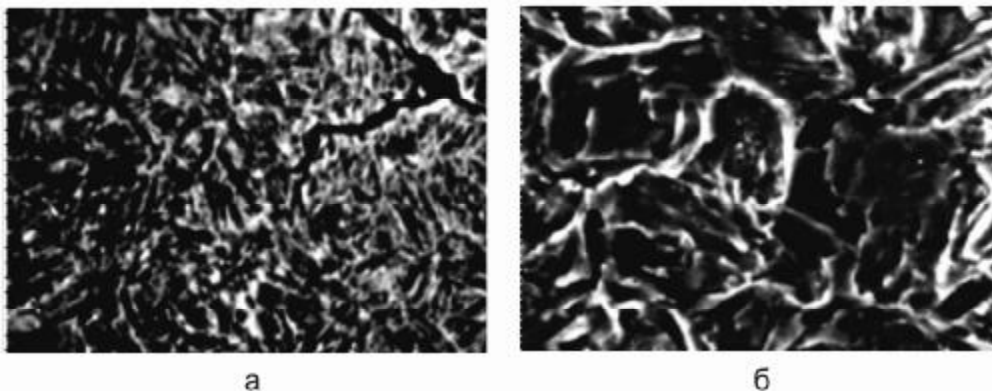


Рис. 1. Структура сталі 15ХГН: а – поверхня (мартенсит), б – серцевина (низьковуглецевий мартенсит). $\times 2000$.

Fig. 1. Structure of 15HGN steel: a – surface (martensite), б – core (low-carbon martensite). $\times 2000$.

карбідуутворюючих елементів наглядно видно значне подрібнення мартенситної структури, як на поверхні, так і всередині після хіміко-термічної обробки.

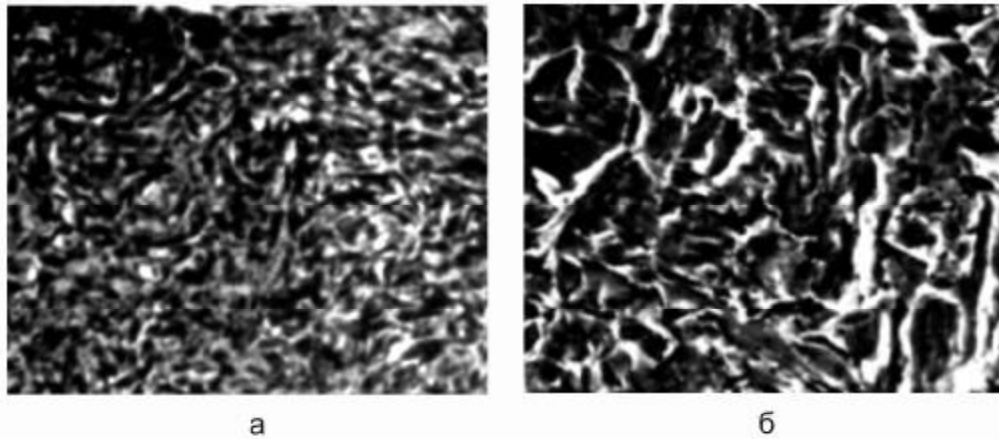


Рис. 2. Структура сталі 15ХГНБТ: а – поверхня (мартенсит), б – серцевина (низьковуглецевий мартенсит). × 2000.

Fig. 2. Structure of 15HGNBT steel: a – surface (martensite), б – core (low-carbon martensite). × 2000.

Дослідження мікротвердості сталі залежно від глибини поверхневого зміцненого прошарку і, як наслідок, вмісту вуглецю проводились на мікротвердомірі ПМТ-3. Для узагальнення результатів досліджень після різних методик визначення твердості в роботі використовувалась в якості єдиної характеристики – об'ємна твердість матеріалу, що визначалась за формулами, виведеними авторами в роботі [8].

Формула для визначення об'єму витісненого металу за методом Роквеллом виведена виходячи з об'єму конуса, що втілюється в досліджуваний матеріал на задану глибину h і при цьому відповідає цьому об'єму:

$$V = \pi h^3, \text{ мм}^3 \quad (1)$$

Глибина втілення алмазного конусу визначається із співвідношення:

$$h = (100 - \text{HRC}) \cdot 0,002, \text{ мм} \quad (2)$$

Виходячи з запропонованої методики визначення об'ємної твердості, як фізичної величини, що характеризується питомим зусиллям витіснення заданого об'єму, формула для методу Роквелла набуває вигляду:

$$H_v = P/V = P/\pi h^3 \quad (3)$$

де P – навантаження, що діє на метал, кН;

V – об'єм витісненого металу, мм^3 .

Методи дослідження та контролю якості металів

При застосуванні методу Віккерса вихідними даними для визначення об'єму витісненого металу була довжина діагоналі відбитку, виходячи з геометричних параметрів алмазної пірамідки (кут 120) визначалась і глибина її втілення, тоді формула для визначення об'ємної твердості набула наступного вигляду:

$$V = 2,48 \cdot d^3 / 12, \text{ кН/мм}^3 \quad (5)$$

де d – діагональ відбитку, мм.

Для визначення об'ємної твердості матеріалу знаючи значення об'єму витісненого металу при навантаженні, формула набуває вигляду:

$$H_V = P/V = P / (2,48 \cdot d^3 / 12) \quad (6)$$

де P – навантаження, що діє на метал, кН;

V – об'єм витісненого металу, мм³.

Перевага методики визначається введенням єдиної фізичної величини, що відповідає фізичній суті властивості твердості. Пропонується в її якості використовувати поняття об'ємної характеристики твердості – H_V , яке полягає в зусиллі необхідному для витіснення 1 мм³ матеріалу або структурної складової (мікротвердість).

В роботі визначався вплив легування на структуру і, як наслідок, твердість сталі (табл. 4).

Комплексне легування елементами, що утворюють важкорозчинну карбідну фазу підвищило твердість сталі, зміцненої шляхом гартування з низьким відпуском.

За рахунок легування значно подрібнюється структура в рівноважному стані більше ніж у 2 рази (рис. 3), що підвищує весь рівень

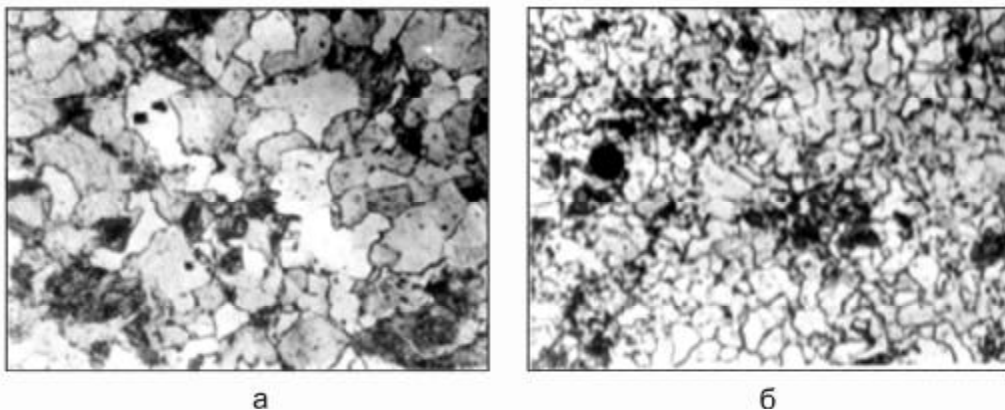


Рис. 3. Структура зерна сталей після відпалу при температурі 930 ... 940 °С з вмістом: а – 15ХГН (хрому, нікелю, марганцю по 1 %); б – 15ХГНБТ (хрому, нікелю, марганцю по 1%, титану- 0,04 %, ніобію - 0,07 %). ×200.

Fig. 3. The grain structure of steels after annealing at a temperature of 930 ... 940 °C with the content of: а – 15HGN (chromium, nickel, manganese 1% each); б – 15HGNBT (chromium, nickel, manganese 1% each, titanium - 0.04 %, niobium - 0.07 %). ×200.

механічних властивостей. Наявність в сталі дрібнодисперсної карбідної фази також сприяє одночасному підвищенню і міцності, і в'язкості сталі. Вміст карбідоутворюючих елементів Ti та Nb в межах – 0,05 для Ti і 0,11 для Nb сприяє подрібненню зеренної структури та її стійкості до росту при температурах аустенизації, впливу яких зазнає сталь в процесі цементації. Так якщо у сталі 15ХГН розмір зерна, після витримки тривалістю 4 години при температурі 930 °С розмір зерна перевищував 21 мкм. Відповідно, сталь додатково легована комплексом карбідоутворюючих елементів мала зерно значно менше – до 9 мкм.

Підвищення дисперсності твердого розчину, яка пояснюється наявністю карбідної фази, стійкої до високих температур (рис. 4) забезпечує покращення усього комплексу механічних характеристик сталі, як твердості і міцності, так і в'язкості.

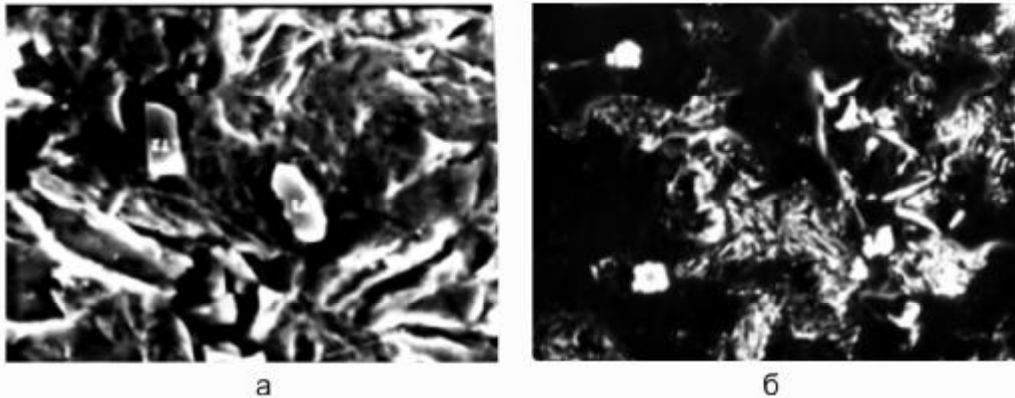


Рис. 4. Дисперсна карбідна фаза: а – титану, б – ніобію, $\times 3000$.

Fig. 4. Dispersed carbide phase: a – titanium, $\times 3000$, б – niobium, $\times 3000$.

Сталі леговані комплексом елементів, що утворюють високотемпературну карбідну фазу значно відрізняються концентрацією титану та ніобію, хімічний склад наведено в табл. 1.

Аналізуючи наведені результати можна зробити висновок, що рівень твердості сталей збільшується при підвищенні вмісту титану та ніобію, за рахунок підвищення концентрації карбідної фази стійкої до високих температур, яких зазнає сталь в процесі цементації. Це підвищує дисперсність мартенситу і, як наслідок, рівень механічних властивостей.

Аналогічно до рівня механічних властивостей підвищується і об'ємна твердість матеріалів, що визначалась за розробленою методикою. Отримані результати наведені в табл. 3 цілком відповідають теоретичним передумовам.

Вплив вмісту вуглецю на об'ємну твердість в загартованому стані визначався на зразках виготовлених з поперечного перерізу зубця шестерні після хіміко-термічної обробки. Вихідними даними була твердість поверхні матеріалу та зміна твердості по глибині поверхневого прошарку залежно від зміни вмісту вуглецю. При цьому для порівняння різних методів визначення твердості використовувалась єдина характеристика, а саме об'ємна твердість матеріалу.

Методи дослідження та контролю якості металів

Таблиця 3
Вплив легування на об'ємну твердість

Table 3
The effect of alloying on bulk hardness

Марка сталі	15ХГН	15ХГНТ	18ХГТ	15ХГНТБ
Твердість, <i>HRC</i>	35	39	40	45
Глибина втілення індентора, <i>мм</i>	0,130	0,122	0,120	0,111
Об'єм витісненого металу, <i>мм³</i>	0,0069	0,0060	0,0053	0,0041
Твердість об'ємна, <i>Кн/мм³</i>	217140	251578	281176	367692

Оскільки на твердість сталі, особливо в загартованому стані, визначальний вплив має вміст вуглецю. Від його концентрації залежить подрібнення мартенситної структури (рис. 1, 2) і, як наслідок твердість сталі.

Вимірювання проводились на одному зразку, що виключає вплив ступеню легування та режимів термічної обробки. Запропонована методика дає можливість відкинути вплив побічних факторів на характеристику, що досліджувалась. Результати вимірювань показали як впливає вміст вуглецю на рівень об'ємної твердості сталі (табл. 4).

Таблиця 4
Вплив вмісту вуглецю на об'ємну твердість сталі

Table 4
Effect of carbon content on bulk hardness of steel

Вміст вуглецю, %	0,8	0,6	0,4	0,25	0,15
Мікротвердість, <i>Hu</i>	572	514	420	350	297
Діагональ відбитку, <i>мм</i>	0,018	0,019	0,021	0,023	0,025
Об'єм витісненого металу, <i>мм³</i>	0,000014	0,000017	0,000023	0,00030	0,000039
Твердість об'ємна, <i>Кн/мм³</i>	857143	600000	521739	400000	307692
*Примітка: усі значення переведено у мм, але за абсолютною величиною вони відрізняються в 2-3 рази.					

Для ототожнення результатів проведених досліджень з використанням різних методів використовувалась розроблена методика визначення об'ємної твердості матеріалів, яка визначається як питома робота втілення індентора в досліджуваний матеріал, що відповідає фізичному змісту такої важливої в матеріалознавстві властивості як твердість.

Порівняння величин об'ємної твердості отриманих після розрахунків даних різних методів матеріалів з однаковим хімічним складом показало достатню кореляцію результатів (табл. 3, 4).

Висновки

В роботі представлена методика визначення об'ємної твердості матеріалів, як узагальнюючої характеристики для різних методів визначення цієї властивості.

Отримані результати при різних методах визначення твердості знаходяться в межах одного порядку величин.

Для виключення розбіжностей в методах необхідно введення коефіцієнтів, які характеризують здатність до втілення інденторів, що мають різну геометрію.

З метою виведення цих коефіцієнтів необхідно проведення значної кількості досліджень на широкому спектрі матеріалів, та значна статистична обробка результатів.

Література

1. Пятак А.И., Моценко В.И., Дощечкина И.В., Кухарева И.Е. Новые принципы оценки твердости массового контроля качества деталей машин // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2008. – №43. – С. 119-122.
2. ДСТУ ISO 6506-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінелем. Частина 1. Метод випробування.
3. ДСТУ ISO 6506-4:2008 Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінелем. Частина 4. Таблиця значень твердості.
4. ДСТУ ISO 6507-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування.
5. ДСТУ ISO 6508-1:2013 Матеріали металеві. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T).
6. Моценко В.И., Дощечкина И.В., Ляпин А.А. Размерный эффект в значениях твёрдости материалов // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2008. – № 41. – С. 71-76.
7. Моценко В.И. Сравнение чисел твердости, полученных различными методами // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2011. – № 55. – С. 161-165.
8. Semenovskiy O.E., Titova L.L., Mykhniy O.V. Hardness – volumetric characteristic of the material // Machinery and Energetics. Journal of Production Research. Kyiv. Ukraine. – 2021. – №12(4) – С. 139-144.

References

1. Pyatak A.Y., Moshchenok V.Y., Doshchechkyna Y.V., Kukhareva Y.E., *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu*, 2008, No. 43, pp. 119-122 [in Russian].
2. DSTU EN 6506-1:2007 *Materialy metalevi. Vyznachennya tverdosti za Brinelem. Chastyna 1. Metod vyprobuvannya* (Metal materials. Determination of hardness according to Brinell. Part 1. Test method) [in Ukrainian].
3. DSTU EN 6506-4:2008 *Metalevi materialy. Vyznachennya tverdosti za Brinelem. Chastyna 4. Tablytsya znachen' tverdosti* (Metallic materials. Determination of hardness according to Brinell. Part 4. Table of hardness values) [in Ukrainian].

4. DSTU EN6507-1:2007 *Materialy metalevi. Vyznachennya tverdosti za Vikersom. Chastyna 1. Metod vyprobuвання* (Metal materials. Determination of Vickers hardness. Part 1. Test method) [in Ukrainian].
5. DSTU EN6508-1:2013 *Materialy metalevi. Vyznachennya tverdosti za Rokvellom. Chastyna 1. Metod vyprobuвання* (shkaly A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) (Metallic materials. Definition of Rockwell hardness. Part 1. Test method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)) [in Ukrainian].
6. Moshchenok V.Y., Doshchechkyna Y.V., Lyapyn A.A., *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu*, 2008, No. 41, pp. 71-76 [in Russian].
7. Moshchenok V.Y., *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu*, 2011, No. 55, pp. 161-165 [in Russian].
8. Semenovskiy O.E., Titova L.L., Mykhniian O.V. Hardness - volumetric characteristic of the material // *Machinery and Energetics. Journal of Production Research*. Kyiv, 2021, No. 12(4), pp. 139-144 [in English].

Одержано 20.11.22

Semenovskiy O. E., Mykhniian O. V.

Structure and volumetric hardness of materials

Summary

In modern mechanical engineering, the main parameters that determine the use of materials are their operational characteristics, which are determined by mechanical properties. The material must meet the given parameters of strength, viscosity, and hardness. Only the method of determining the hardness of the material, in addition to physical methods, allows conducting research without making special samples without destroying the part. At the same time, the factor that the rest of the properties are indirectly related to the hardness parameter is taken into account.

In modern metallurgy, it is customary to compare the units of all hardness measurement methods for their practical comparison, depending on the scale factor, by converting their values to such generally accepted methods as Brinell, Rockwell, or Vickers. For research, the authors used a methodology that involves the use of a single characteristic - volume hardness of materials. This characteristic does not require the use of transitional tables of hardness units obtained by different methods. Volumetric hardness, unlike other methods, takes into account the displaced volume of metal, which corresponds to the physical content of the material hardness characteristic, as the ability of the material to resist the incorporation of another, harder material into it.

The main goal of this work was to determine the influence of the internal structure of the alloy on the mechanical properties and to relate these characteristics to the volume hardness of the material. The research methodology provided for the determination of properties depending on the chemical composition of the alloy, as well as the mode of chemical and thermal treatment. The structure of the alloy was considered as the connecting link between the chemical composition and the properties of the alloy. Therefore, the influence of alloying with elements that change the hardness of steel was investigated.

Complex alloying with elements that form a difficult-to-dissolve carbide phase made it possible to increase the hardness of steel strengthened by quenching with low tempering.

Keywords: volumetric hardness, mechanical properties, complex alloying, steel, heat treatment.