

УДК 621.791

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.94.0.128

РОЗМІРНИЙ ЕФЕКТ У ПРОЦЕСІ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ ЗА МАРТЕНСОМ

Мощенко В. І., Костіна Л. Л., Плужніков Д. О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Важливим аспектом під час проведення дослідження твердості з використанням у нано- та мікродіапазонах індентора Берковича є врахування розмірного ефекту. У процесі вимірювання твердості за шкалами Мартенса індентором Берковича прикладене навантаження ділять на площу поверхні втиснутої в матеріал частини наконечника. Значним фактором, що впливає на відповідність результатів вимірювання твердості, є розмірний ефект. Причини його виникнення можуть бути різними, залежно від цього він може бути прямим та зворотним. Розмірний ефект значно впливає на результати вимірювання твердості, змінюючи їхнє значення у 2,5–3 рази.

Ключові слова: твердість за Мартенсом, індентор, діаграма індентування, розмірний ефект.

Вступ

Для оцінки властивостей матеріалів використовують випробування на твердість. Це забезпечує легкість вимірювання і випробування безпосередньо деталі, яка вже готова до експлуатації, високу продуктивність методу, можливість оцінити інші механічні властивості матеріалу: пружність, повзучість, межу міцності [1].

Важливим аспектом є використання в мікродіапазоні інденторів Берковича й Віккерса, які більшою мірою відповідають неруйнівному контролю, тоді як індентори Брінелля та Роквелла [1–3] в макродіапазоні залишають за собою доволі великі деформації, які в подальшому сприяють зародженню та розвитку структурних дефектів, чим знижують термін використання виробів. У зв'язку з удосконаленням технологічності виробів усе більше виробників промисловості намагаються мінімізувати розміри деталі, одночасно підвищити їхню працездатність шляхом нанесення зміцненого шару. У свою чергу товщину зміцненого шару потрібно зменшувати за умови збільшення терміну експлуатації. Також дослідження твердості дуже малих виробів у мікродіапазоні ускладнюється, що пов'язано із значною невідповідністю розмірів виробу та випробувального методу [4].

Значним фактором, що впливає на відповідність результатів вимірювання твердості, є розмірний ефект.

Аналіз публікацій

Розмірний ефект – це залежність твердості від глибини проникнення індентора або

навантаження в процесі використання індентора певної форми та визначеного матеріалу [4].

Наявність розмірного ефекту під час вимірювання твердості за методами Берковича і Віккерса ускладнює поняття значень твердості за умови зіставлення. Після виявлення розмірного ефекту виникає розбіжність в інтерпретації твердості як постійної величини, що характеризує властивості матеріалу. Отже, явище розмірного ефекту вимагає додаткового дослідження за певних параметрів вимірювання твердості, а саме в процесі вдавлення пірамідальних інденторів за умови невідновленого відбитку.

Твердість за шкалами Мартенса НМ вимірюють під прикладеним випробувальним навантаженням. Числа твердості за шкалами Мартенса визначають за $F-h$ -діаграмою під час зростання випробувального навантаження (бажано після досягнення заданого випробувального зусилля). У процесі вимірювання твердості за шкалами Мартенса враховують і пластичну, і пружну деформації, тому це значення твердості можна обчислити для всіх матеріалів.

Твердість за шкалами Мартенса визначають для обох пірамідальних наконечників, показаних на рис. 1 [5].

У процесі обчислення твердості за шкалами Мартенса прикладене навантаження F ділять на функцію площі поверхні $A_s(h)$ робочої частини наконечника. Числа твердості за шкалами Мартенса позначають НМ.

За умови обчислення твердості за шкалами Мартенса прикладене навантаження F ділять на функцію площі поверхні $A_s(h)$ ро-

бочої частини наконечника. Числа твердості за шкалами Мартенса позначають НМ. У позначенні твердості за Мартенсом також вказують величину навантаження, час вдвлювання індентора і час витримки.

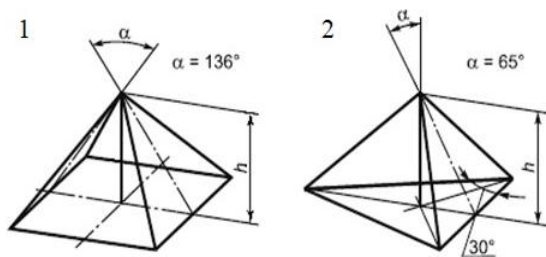


Рис. 1. Форма наконечників для визначення НМ [5]: 1 – піраміда Віккерса: α – кут при вершині 136° ; h – висота піраміди, 2 – піраміда Берковича: α – кут при вершині 65° ; β – кут між сторонами 30° ; h – висота піраміди

Визначення твердості у використанні піраміди Віккерса виконують за формулою:

$$HM = \frac{F}{A_s(h)} = \frac{F}{26,43h^2}, \quad (1)$$

де F – прикладене навантаження, Н; $A_s(h)$ – площа поверхні робочої частини наконечника, мм.

Твердість під час використання піраміди Берковича визначають за формулою:

$$HM = \frac{F}{A_s(h)} = \frac{F}{26,44h^2}. \quad (2)$$

Для глибини індентування менше ніж 6 мкм не можна використовувати теоретичну функцію, визначальну площу перетину наконечника за методом Віккерса (3), Берковича (4), оскільки всі згадані наконечники мають деяку заокругленість вершини, а наконечники зі сферичним кінцем (сферичні й конічні) мають відхилення від сферичності. Знання точної функції, що визначає площу поперечного перерізу цього наконечника, особливо важливе для глибин індентування менше ніж 6 мкм і підходить для всіх глибин [4].

Визначають площу перетину наконечника піраміди Віккерса за формулою:

$$A_s(h) = \frac{4 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos(\alpha)} n^2. \quad (3)$$

Визначають площу перетину наконечника піраміди Берковича за формулою:

$$A_s(h) = \frac{3\sqrt{3} \tan(\alpha)}{\cos(\alpha)} n^2. \quad (4)$$

Для забезпечення вимірювань значень твердості рекомендується використовувати випробувальні навантаження 1 Н; 2,5 Н; 5 Н і 10 Н та їхні десяткові кратні одиниці.

В окремих випадках може бути корисним утримувати задане випробувальне навантаження довше за встановлений тимчасовий інтервал. Тривалість витримки під навантаженням має фіксуватися з точністю до 0,5 с.

Після випробування отримані дані твердості за Мартенсом позначаються як на рис. 2.



Рис. 2. Позначення твердості за шкалою Мартенса, НМ [5]

Метод визначення твердості за шкалами Мартенса, що обчислюється за нахилом кривої навантаження на $F-h$ -діаграмі, не потребує визначення «нульової точки» в разі однорідних матеріалів [5] (рис. 3).

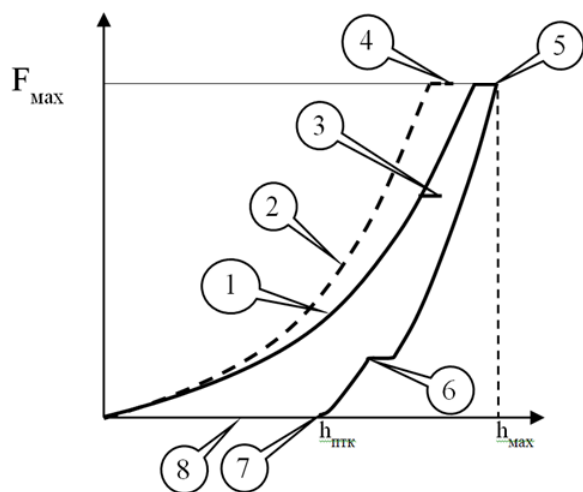


Рис. 3. Діаграма навантаження $F-h$ [4]

Пояснення до рис. 3: (-) – ділянка навантаження діаграми, що фіксується приладом;

(----) – скорегована з урахуванням прогину на краю відбитку; 1 – ділянка навантаження; 2 – розрахунку твердості за методом середнього контактного тиску; 3 – твердість за Мартенсом згідно з ISO 14577; 4 – твердість H_T за ISO 14577; 5 – за Шором, Барколом; 6 – точка, що приблизно відповідає твердості за Роквеллом; 7 – твердість за останньою точкою контакту; 8 – точка вимірювання твердості за методами Брінелля, Віккерса.

Для достовірного визначення навантаження та відповідної йому глибини проникнення індентора для кожного циклу випробувань потрібно встановити нульову точку індентування для кривої $F-h$ (рис. 4). Для цього або прикладене навантаження підтримують постійним упродовж певного часу і фіксують глибину індентування як функцію часу, або підтримують постійною глибину індентування протягом певного часу, а навантаження фіксують як функцію часу.

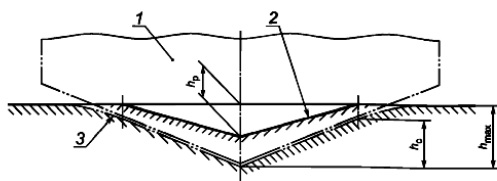


Рис. 4. Схема поздовжнього перерізу зони індентування: 1 – наконечник; 2 – поверхня відбитку в досліджуваному зразку після повного розвантаження; 3 – поверхня стикування досліджуваного зразка з наконечником за умови максимальних глибини індентування та вимірювального навантаження [5]

Невизначеність результатів вимірювань є сукупністю невизначеностей низки джерел. Основними є невизначеність: нульової точки, вимірювання прикладеного навантаження, переміщення наконечника, апроксимації кривих $F-h$, площини контакту (чистота поверхні), невизначеності внаслідок теплового дрейфу та неоднорідності матеріалу зразка [4].

У процесі дослідження однорідних матеріалів розміри неоднорідностей на поверхні невеликі щодо глибини індентування. Тобто розрахунок за умови 50–90 % F_{max} для кривої навантаження на $F-h$ -діаграмі виконують за формулою:

$$h = m\sqrt{F}, \quad (5)$$

де m – нахил кривої навантаження діаграми; F – прикладене навантаження на індентор, Н.

Нахил m можна визначити шляхом лінійної регресії результатів вимірювань відповідно до рівняння (5). У цьому випадку можна визначити твердість за допомогою наступної модифікації методу, за нахилом кривої навантаження на $F-h$ -діаграмі за формулою:

$$HM_s = \frac{1}{m^2 A_s(h)/h^2}. \quad (6)$$

Твердість за шкалами Мартенса, яку визначають за нахилом кривої навантаження на $F-h$ -діаграмі, позначають HM_s . Визначення твердості за нахилом кривої навантаження на $F-h$ -діаграмі для наконечника Віккерса виконують за формулою:

$$HM_s = \frac{1}{m^2 \cdot 26,43}. \quad (7)$$

Визначення твердості за нахилом кривої навантаження на $F-h$ -діаграмі для наконечника Берковича виконують за формулою:

$$HM_s = \frac{1}{m^2 \cdot 26,44}. \quad (8)$$

Після випробування отримані дані твердості за Мартенсом за нахилом кривої навантаження $F-h$ -діаграми позначають відповідно рис. 5.



Рис. 5. Позначення твердості за шкалою Мартенса, HM_s [5]

Перевага визначення твердості за шкалами Мартенса за нахилом кривої зростання навантаження полягає в незалежності отриманого значення твердості від невизначеності, пов'язаної з перебуванням «нульової точ-

ки» і шорсткості зразка. Вібrazioї також мало впливають на результати визначення твердості за цією шкалою. Для зразків, що мають різну твердість на різних глибинах індентування, значення твердості будуть відрізнятися від значень, визначених за формулами (6), (7).

На відміну від твердості за шкалами Брінелля, Роквелла, Віккерса і НМ, твердість передбачає не тільки опір пластичній деформації, а й опір пружній деформації.

Розмірний ефект (ISE) – це зменшення твердості за умови збільшення навантаження втискання.

У визначенні твердості індентором Берковича, який є усіченою тригранною алмазною пірамідою з різними кутами при вершині, а саме стандартну з кутом при вершині $\alpha=65,03^\circ$ та модифіковану з кутом при вершині $\alpha=65,27^\circ$, останнім часом все більше використовують модифікований індентор. Це викликано бажанням зрівняти площі проєкцій відбитків, отриманих цими пірамідами, з метою більш коректного порівняння чисел твердості. Також це дає змогу отримати близькі значення проєкційної твердості, вимірної за допомогою пірамід Віккерса і Берковича. Перевагою цього методу є отримання ідеальної геометричної форми наконечника. Розмірний ефект у цьому випадку такий самий, як і під час вимірювання пірамідою Віккерса. У разі збільшення навантаження твердість знижується – це прямий розмірний ефект.

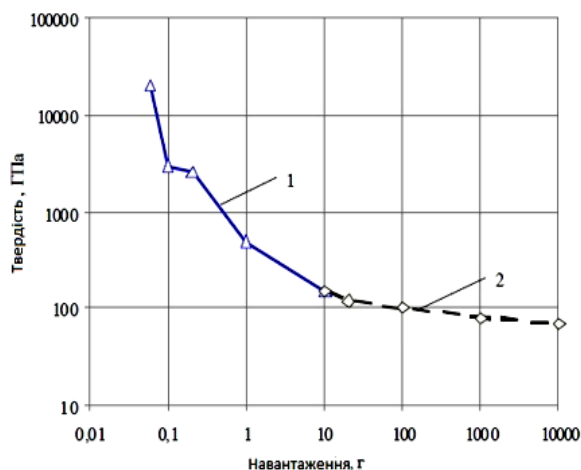


Рис. 6. Характер зміни твердості залежно від навантаження (прямий розмірний ефект) у процесі дослідження твердості пірамідами Берковича (1) та Віккерса (2) [4]

Основні гіпотези розмірного ефекту:
– вплив зовнішніх вібрацій;

- вплив недосконалості індентора;
- вплив меж зерен і домішок;
- наклеп поверхні під час полірування;
- наклеп під час індентування;
- індентування «бездислокаційних об'ємів» із твердістю, що наближається до теоретичної межі, коли розмір відбитку порівняний з междислокаційними відстанями;
- вплив геометрії індентора на значення площі (об'єму) втиснутої частини і, відповідно, твердість;
- збільшення відносної похибки вимірювання розмірів відбитка;
- велика відносна частка пружного відновлення для маленького відбитка;
- зміна положення поверхні контакту щодо об'єму, який індентують;
- наявність «крайового» ефекту – додаткової згинальної деформації по краю відбитка тощо [4].

Отже, характер зміни твердості зі збільшенням навантаження (розмірний ефект) залежить від геометрії індентора. Але існує розбіжність в оцінці розмірного ефекту, яка пов'язана із застосуванням у дослідженнях матеріалів, що значно відрізняються за пластичністю та здатністю до зміцнення.

Мета і постановка завдання

Метою дослідження є оцінка характеру зміни твердості зі збільшенням навантаження на індентор, з використанням функціональної залежності твердості від глибини втискання індентора. Для цього необхідно встановити такий зв'язок для інденторів різної геометрії, провести експериментальне дослідження під час втискання піраміди Берковича у металеві зразки різної твердості на приладі Nano Test Micro Materials Ltd, розрахувати значення твердості за Мартенсом у різних точках на навантажувальній гілці діаграми індентування.

Дослідження твердості за Мартенсом

Для дослідження були відібрані зразки, виготовлені з мір твердості. Види зразків та рівень їхньої твердості подані в табл. 1.

Зразки були піддані хімічному та металографічному аналізу.

Вміст вуглецю визначали на аналізаторі АН-7529. Вміст елементів Mn, Si, Cr, Ni визначали методом фотоелектричного спектрального аналізу за допомогою установки МФС-8. Вміст сірки та фосфору досліджували тетраметричним методом.

Таблиця 1 – Рівень твердості зразків

Вид зразка	Рівень твердості	№ зразка
Міра твердості HBW	103HBW10/1000/10	1
	187HBW10/1000/10	2
	411HBW10/1000/10	3

Мікроструктуру зразків досліджували за допомогою металографічного мікроскопа. Виявлення мікроструктури здійснювали хімічним травленням мікрошліфів у 4 % розчині азотної кислоти в етиловому спирті.

Результати досліджень наведені в табл. 2, 3.

Таблиця 2 – Хімічний склад зразків

№ зразка	Вміст елементів, % ваг					Марка сталі
	C	Mn	Si	Cr	Ni	
1	0,15	0,40	0,24	0,16	0,23	15 (10)
2	0,94	0,33	0,27	0,35	0,20	У10 (зав. Cr)
3	1,0	0,20	0,33	0,27	0,16	У10А (зав. Cr)

Таблиця 3 – Мікроструктура зразків

Клеймо зразка	Мікроструктура
1	Ферит + перліт
2	Перліт (грубо дисперсний)
3	Сорбіт або тростит

Аналіз отриманих мікроструктур виявив у зразку 1 характерну для відпаленого стану ферито-перлітну структуру. Зерна мають рівноважну форму, ферит становить більшу частину структури. Пластини перліту мають доволі значні розміри, така структура типова для відпаленої низьковуглецевої сталі й характеризується невеликими значеннями твердості (рис. 7).

У структурі зразка 2 (рис. 8) характерна будова зернистого перліту, яка складається з феритної основи та частинок цементиту глобулярної форми з розміром 10–20 мкм. Ця структура характерна для заевтектоїдної сталі У10 після сфероїдизувального відпалу.

Структура зразка № 3 (рис. 9) характерна для загартованого стану сталі У10А з подальшим середнім відпуском в умовах температур 400–450 °С. Структурою є сорбіт або тростит відпуску з частинками цементиту зернистої форми розміром 3–10 мкм.

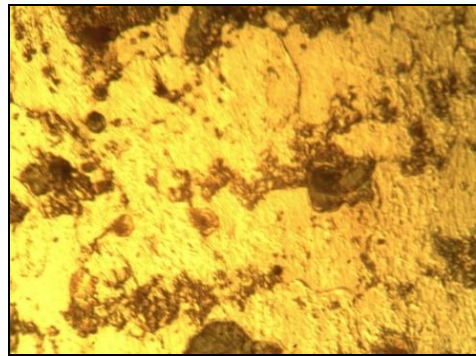


Рис. 7. Мікроструктура зразка № 1 зі сталі 15 за умови збільшення x 300

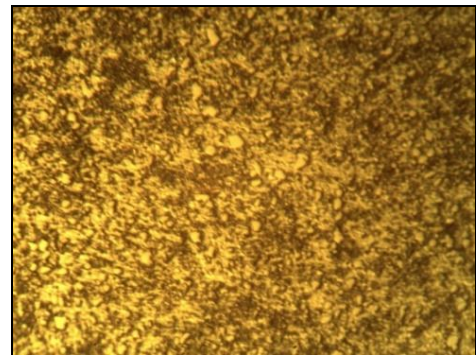


Рис. 8. Мікроструктура зразка № 2 зі сталі У10 за умови збільшення x300

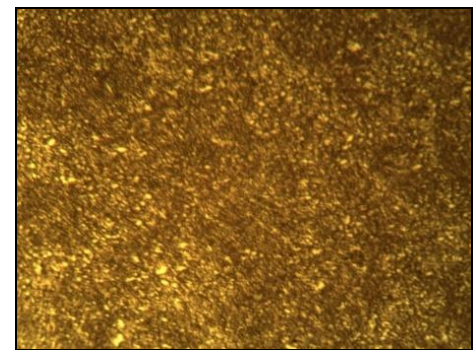


Рис. 9. Мікроструктура зразка № 3 зі сталі У10А за умови збільшення x300

Вимірювання твердості проводили на приладі NanoTest (Micro Materials Ltd.) Унікальністю цього приладу – горизонтальне розташуванням шпинделя та індентора, що дозволяє з більшою точністю визначити твердість у мікро- і нанодіапазоні. Це пов'язано із силою тяжіння, яка діє на досліджуваний зразок під час проведення випробування. Отримані таким чином дані мають похибку в розрахунку значень твердості. За умови нанодіапазону така похибка найбільш яскраво виражена.

Умови вимірювання твердості за Мартенсом обирають за комп'ютерною програмою Micro Materials Ltd. Testing Platform (рис. 10).

Після відкриття файлу з діаграмою інденування для випробування матеріалу на твердість обирають потрібну діаграму за випробуваним зразком.

На діаграмі під номером 17 обираємо 6 точок випробування за формою зростання. Це потрібно для того, щоб простежити за зміною залежності прикладеного навантаження до глибини отриманого відбитку. Потрібно точно визначити точки за умови приблизних показників навантаження для зразків.

У виборі точок на діаграмі інденування фіксуємо показники навантаження і глибини проникнення індентора на прикладі першої точки.

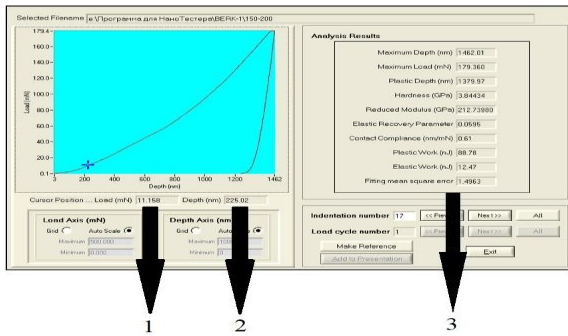


Рис. 10. Вибір даних для розрахунку твердості за Мартенсом: 1 – навантаження в заданій точці; 2 – глибина впровадження індентора в заданій точці; 3 – загальні результати діаграми

За авторською програмою визначаємо твердість за Мартенсом за отриманими в процесі інденування в різних точках показниками навантаження і глибини на діаграмі згідно зі стандартом ISO 14577 (рис. 11–14).

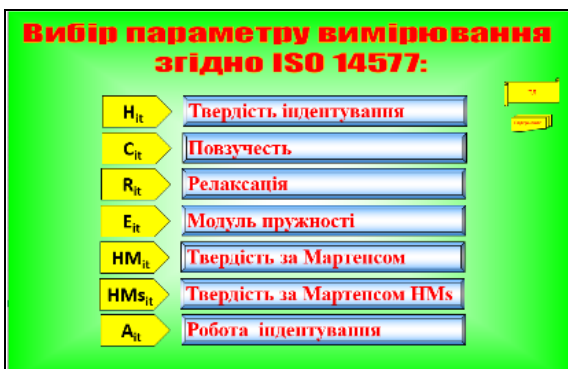


Рис. 11. Розрахунок механічних властивостей матеріалів згідно зі стандартом 14577

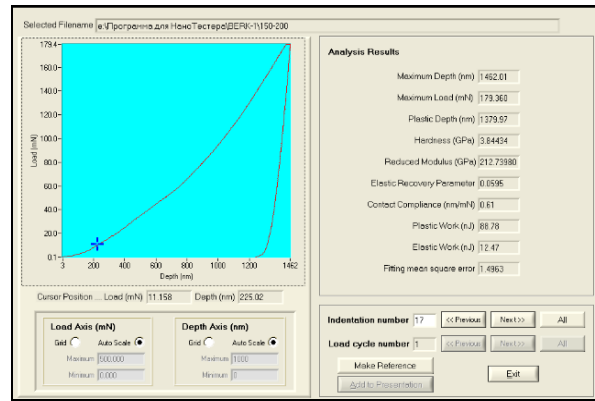


Рис. 12. Значення навантаження та глибини впровадження індентора в точці № 1 навантажувальної гілки діаграми № 17 у процесі інденування пірамідкою Берковича зразка № 1

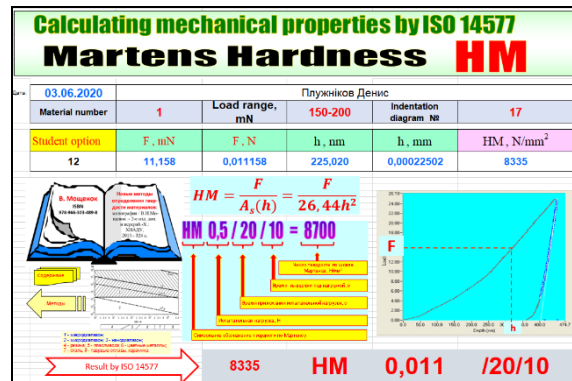


Рис. 13. Розрахунок твердості за Мартенсом для точки № 1 навантажувальної гілки діаграми інденування № 17 зразка № 1 у мікродіапазоні 150–200 мН

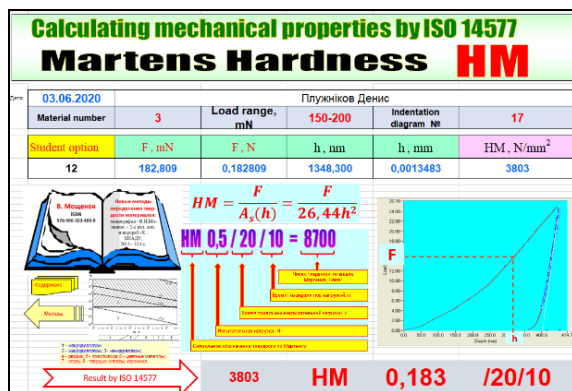


Рис. 14. Розрахунок твердості за Мартенсом для точки № 6 навантажувальної гілки діаграми інденування № 17 зразка № 3 за умови навантаження 150–200 мН

У процесі вимірювання твердості за Мартенсом зазвичай використовується реальна

піраміда Берковича, однак її застосування спричиняє значні похибки у визначенні твердості, які обумовлені притупленням вершини та наявністю лінії перетину граней, що важко піддається вимірюванню та математичному опису.

Цю проблему можна вирішити, якщо розробити математичну модель піраміди Берковича з притупленням, тобто сферопірамідальну модель [4].

Таблиця 4 – Результати визначення твердості за Мартенсом для зразка № 2

Номер точки на діаграмі інденування	F , mN	h , nm	HM, N/mm ²
1	11,158	225,020	8335
2	39,720	550,130	4964
3	70,928	831,620	3879
4	114,830	1113,120	3505
5	151,856	1303,420	3381
6	179,360	1450,120	3226

Таблиця 5 – Результати визначення твердості за Мартенсом для зразка № 1

Номер точки на діаграмі інденування	F , mN	h , nm	HM, N/mm ²
1	11,051	257,920	6283
2	27,290	525,240	3741
3	51,388	823,750	2864
4	93,820	1144,540	2709
5	138,347	1420,780	2592
6	177,636	1612,360	2584

Таблиця 6 – Результати визначення твердості за Мартенсом для зразка № 3

Номер точки на діаграмі інденування	F , mN	h , nm	HM, N/mm ²
1	12,989	255,160	7546
2	41,562	531,170	5571
3	77,682	792,650	4676
4	112,185	988,760	4340
5	151,540	1195,770	4008
6	182,809	1348,300	3803

З наведених результатів видно, що для всіх досліджених зразків реалізується прямий розмірний ефект: з підвищенням навантаження від 11–13 до 170–180 мН твердість знижується у 2,5–3 рази.

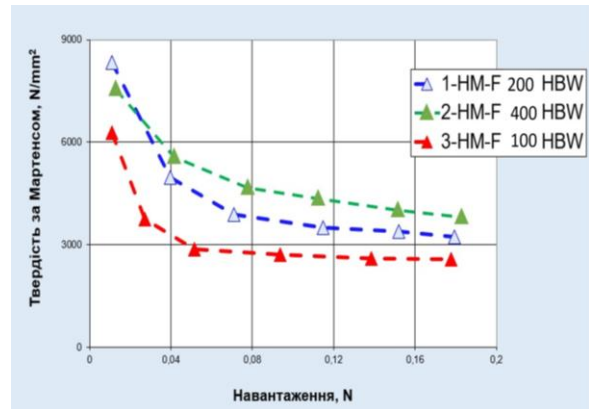


Рис. 15. Результати розрахунку твердості за методом Мартенса в діапазоні навантажень 150–200 мН

Висновки

1. У процесі визначення твердості за Мартенсом розмірний ефект виявляється в зниженні твердості за умови підвищення навантаження в 2–3 рази, тобто присутній так званий прямий розмірний ефект (indentation size effect).

2. Твердість за Мартенсом враховує як пружну, так і пластичну складову деформації в процесі вдавлювання інденаторів у досліджуваний метал.

Література

1. Metallic materials. – Vickers hardness test. – Part 1: Test method: ISO 6507-2018. – Published 10.01.2018. – 38 p.
2. ASTM E18 – 08b Standart Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008. – 37 p.
3. Metallic materials. – Rockwell hardness test – Part 1: Test method: (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) (ICS: 77.040.10): ISO 6508-1:2016 – Published 08.08.2016. – 38 p.
4. Мошенок В. І. Нові методи визначення твердості матеріалів: монографія. – 2-е вид., доп. і перероб. – Харків: ХНАДУ, 2013. – 324 с.
5. ISO 14577-1:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. – Part 1: Test method.

References

1. Metallic materials. – Vickers hardness test. – Part 1: Test method: ISO 6507- 2018. – Published 10.01.2018. – 38 p.
2. ASTM E18 – 08b Standart Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008. – 37 p.
3. Metallic materials. – Rockwell hardness test – Part 1: Test method: (scales A, B, C, D, E, F, G,

- H, K, N, T) (ICS: 77.040.10): ISO 6508-1:2016. – Published 08.08.2016. – 38 p.
4. Moshchenok V.I. Novi metodi viznachennya tverdosti materialiv: monografiya. – Ed. 2. – Kharkiv: KHNADU, 2013. – 324 p.
 5. ISO 14577-1:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. – Part 1: Test method.

Мощенок Василій Іванович, к.т.н., професор кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. (+38) 096-359-79-46,

e-mail: mvi@khadi.kharkov.ua, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 25, ул. Ярослава Мудрого, м. Харків, 61002, Україна.

Костіна Людмила Леонідівна, к.т.н., доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, e-mail: kostina4991@gmail.com, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 25, вул. Ярослава Мудрого, м. Харків, 61002, Україна.

Плужніков Деніс Олександрович, студент Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 25, вул. Ярослава Мудрого, м. Харків, 61002, Україна.

Dimensional effect when measuring Martens hardness

Abstract. Problem. *One of the most common methods of non-destructive testing, hardness testing, is used to evaluate the properties of materials. This is due to the ease of measurement and testing of the finished part, which will be used in the future, high productivity of the method, the ability to assess other mechanical properties of the material: elasticity, creep, tensile strength. An important aspect in the study of the hardness using in the range the Berkovich and Vickers indenters, which are more consistent with non-destructive testing, while the methods of Brinell and Rockwell leave quite large deformations, in our opinion, which further promote the development of structural defects and reduce the service life, which are not acceptable in critical products. Due to the improvement of product manufacturability, more and more manufacturers are trying to minimize the size of the part, while increasing their performance by applying a reinforced layer, which, in turn, should seek to reduce the thickness with increased service life. It is also impossible to study the hardness of very*

small products in the micro range due to the large mismatch between the dimensions of the product under test and the test method. In our opinion, the study of hardness by the Berkovich method in comparison with the Vickers method is more expedient for use with the same physicochemical properties of the material because of a larger scatter of hardness values between the compared methods, although they should be almost the same, with a small difference. An important omission to a certain year was the dimensional effect. Goal. *The aim of the study is to assess the nature of the change in hardness with increasing load on the indenter, using the functional dependence of the hardness on the depth of the indenter. For this purpose, it is necessary to establish such connection for an indenter of various geometry. In this regard, we consider it appropriate to check the validity of the Meyer equation, which relates the load to the size of the imprint, for different indenters and materials. Results.* *When the hardness is calculated according to the Martens scales, the Vickers and Berkovich indenters are applied to the function of the surface area of the working part of the tip. An important factor of the consistency of the results in the increase in hardness is the small effect. The reasons for this can be very negligible. The sizeable effect is significantly infused into the results of increasing hardness, changing from 2,5 to 3,0 folds.*

Key words: *hardness by Martens, indenter, indenting diagram, sizeable effect.*

Moshchenok Vasyl Ivanovich PhD, professor, chair of technology of metals and materials technology, tel. (+38) 096-359-79-46,

e-mail: mvi@khadi.kharkov.ua; Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Kostina Lyidmila Leonidovna, PhD, the senior lecturer, chair of technology of metals and materials technology, tel. (+38) 066-150-89-72, e-mail: kostina4991@gmail.com; Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Pluzhnikov Denis Alexandrovich, student, chair of technology of metals and materials technology, tel. (+38) 073-688-22-26,

e-mail: brd_nvr22@ukr.net; Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.