

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.331

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/03>**Топчій Н.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ПОРТАТИВНІ ТВЕРДОМІРИ: ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ

У даній статті проведено дослідження електронних портативних твердомірів, розкрито поняття твердості, методів вимірювання твердості, історію виникнення та основні принципи роботи портативних твердомірів.

Останнім часом технологічний розвиток в галузі металообробки, енергетики та машинобудування призводить до все більш широкого застосування зміцнювальних та функціональних покриттів, тонких плівок, різних технологій модифікації поверхні. Одними з найважливіших характеристик матеріалів є їх механічні властивості, що визначають споживчі та експлуатаційні характеристики матеріалів та є непрямими показниками їхньої якості. Узагальненою характеристикою механічних властивостей матеріалів є жорсткість. Вимірювання твердості широко поширені в промисловості при проведенні контролю технологічних процесів, визначенні експлуатаційних характеристик виробів, виборі режимів механічної обробки та типу ріжучого інструменту тощо.

Як правило, сучасний переносний твердомір дозволяє вимірювати твердість за всіма основними існуючими шкалами. Портативним твердоміром вимір проводиться безпосередньо на деталі, що є явною перевагою таких приладів. Переносний твердомір – це електронний пристрій і тому в ньому зазвичай є цілий набір корисних функцій, таких як можливість збереження вимірів, формування та редагування протоколів результату контролю, передача вимірів на електронно-вимірювальний пристрій для подальшої обробки, друк результатів вимірювання на принтер прямо з твердоміра. Портативні твердоміри дозволяють виміряти твердість з точністю, що не поступається стаціонарним та при цьому мають низку незаперечних переваг. Портативні прилади, порівняно зі статичними твердомірами Брінелля, Роквелла і Віккерса, мають безперечні переваги, що полягають у можливості контролю об'єктів, що знаходяться в експлуатації без виготовлення спеціальних зразків і руйнування виробу. Також вони дозволяють контролювати великі об'єкти з довільно орієнтованими у просторі поверхнями

Ключові слова: твердість, твердомір, вимірювання, об'єкт вимірювання, метод, принцип.

Постановка проблеми. Завдання вимірювання твердості було актуальним завжди, проте в даний час його значимість особливо зросла, що зумовлено необхідністю при проведенні технічного діагностування, експертизи промислової безпеки.

Портативні електронні твердоміри знайшли широке вживання для контролю твердості деталей, як в процесі виробництва, так і в процесі експлуатації. У багатьох галузях промисловості широкого поширення набули твердоміри динамічної дії, робота яких заснована на ударному методі докладання навантаження та визначення твердості за параметрами впровадження індентора у матеріал.

Велика різноманітність цих приладів зводиться всього лише до чотирьох принципів виміру твердості – по відскоку, по різниці частот між власною частотою коливаний діамантового індентора і частотою заздалегідь навантаженого діамантового індентора, визначення твердості по величині електричного опору спеціального діамантового індентора та який реалізовує метод візуалізації відбитку індентора. Н оптичні системи вимірювання відстані між об'єктами. Вони можуть бути різні і включають в себе питання розпізнавання об'єктів, визначення фізичних параметрів середовища. Однією з найважливіших є визначення відстані до об'єктів. Наявність оптичної системи

в складі сучасного виробничого пристрою дозволяє оцінювати стан навколишнього простору. Це особливо важливо для рухомих технічних пристроїв, оскільки забезпечує безпеку і дозволяє приймати рішення про найбільш вигідніший спосіб виробництва [1, с. 118].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових надбань за темою дослідження показав масштабність сучасних досягнень.

Дослідженням проблемних питань аналізування вимірювань твердості займалися такі вітчизняні науковці, як Ляпунов А. М., Мітрофан Н.В., Алехін В.П. та інші.

Серед закордонних досліджень заслуговують на увагу праці І. Снеддона, Н.А. Стіллвела, Г.М. Фарра.

Водночас, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених проблемам вимірювання твердості, стрімке оволодіння сучасними технічними методами вимірювання зумовлює потребу подальших досліджень цієї тематики.

Мета. Провести аналіз принципів реалізації існуючих методів вимірювання твердості.

Викладення основного матеріалу дослідження. Перш ніж перейти до розгляду основного матеріалу дослідження, слід уточнити визначення поняття твердості:

твердість – здатність матеріалу чинити опір деформуванню та руйнуванню під дією місцевих контактних зусиль [2].

Твердість – одна з важливих характеристик, що вказує на здатність матеріалу чинити опір поверхневій деформації під дією більш твердого тіла. Знаючи твердість того чи іншого металу, можна судити про його опірність тертю, зносостійкість, оброблюваність, стійкість поверхневих шарів до руйнування тощо. Все це дозволяє розраховувати залишковий ресурс об'єкта контролю. Для інструментального визначення твердості методом втиснення використовуються твердоміри.

Для вимірювання твердості металів є кілька шкал (методів вимірювання):

Метод Брінелля – твердість визначається за діаметром відбитка, який залишає металева кулька, що втискується у поверхню. Твердість обчислюється як відношення зусилля, прикладеного до кульки, до площі відбитка (причому площа відбитка береться як площа частини сфери, а не як площа кола). Твердість, визначена за цим методом, позначається HB, де H = hardness (твердість, англ.), B – найменування шкали. Вимірювання проводяться відповідно до стандарту ДСТУ ISO 6506-1:2007 [3].

Метод Роквелла – твердість визначається за глибиною відбитка металевої кульки чи алмазного конуса у поверхні тестованого матеріалу. Твердість, визначена за цим методом, є безрозмірною і позначається HR, HRB, HRC і HRA; твердість обчислюється за такою формулою $HR = 100 - kd$, де d – глибина втиснення накоєчника після зняття основного навантаження, а k – коефіцієнт. Отже, нескінченній твердості відповідає HR 100; м'які матеріали можуть мати негативні значення твердості [3].

Метод Віккерса – твердість визначається за величиною відбитка, залишеного чотирикутною алмазною пірамідкою, яка втискується у поверхню. Твердість обчислюється як відношення зусилля, докладеного до пірамідки, до площі відбитка (причому площа відбитка береться як площа частини поверхні піраміди, а не як площа квадрата); одиницею твердості служить кгс/мм². Твердість, визначена за цим методом, позначається HV [3].

Портативні твердоміри хоч і можуть визначати твердість у тих же шкалах, що й стаціонарні прилади – Брінелля, Роквелла, Віккерса та інших – однак відрізняються від них докорінно, оскільки реалізують зовсім інші методи вимірів. Результати в HB, HRC, HL, HV та інших шкалах виходять шляхом перерахунку за алгоритмом математичної обробки. У кожного виробника портативних твердомірів він свій. Якогось єдиного стандарту тут немає – за винятком хіба що довідкових, що допускають інші співвідношення різних шкал у технічно обґрунтованих випадках.

Портативні прилади легші, їх можна застосовувати для оперативного контролю якості продукції на заводі, для вивчення властивостей матеріалів лабораторій. Твердість металу заміряється у вигляді механічного на підконтрольний зразок.

Динамічні прилади мають ряд переваг:

- можна оцінити твердість виробів з неоднорідною або крупнозернистою структурою, наприклад, литих або кованих;
- вимірювання твердості чорних металів;
- контроль якості кольорових металів;
- можна проконтролювати та міцність сталі на розрив [4].

Існує кілька моделей твердомірів. До того, як купити прилад, важливо визначитися зі структурою та властивостями вимірюваних матеріалів. Важливо також зважати на габарити контрольних зразків для перевірки. Для визначення параметра щільності користуються шкалами Роквелла, Віккерса, Брінелль та Шора. Якщо виріб виконаний з м'якого матеріалу, краще виміряти його

міцність за шкалою Брінеля або Шора. Твердоміри зі шкалою Роквелла найкраще підійдуть для вимірювання твердих матеріалів. Але найміцніші виробу прийнято виміряти шкалою Віккерса.

Твердість найчастіше визначають, як властивість поверхневого шару матеріалу чинити опір впровадженню іншого, твердішого тіла (індентора), за його зосередженому вплив на поверхню матеріалу [5]. Найбільш поширеними формами інденторів є: сталеві кульки, алмазна піраміда або конус. При контакті індентора з поверхнею виникають механічні напруги, що визначаються його формою, зусиллям, що прикладається, та методом вдавлювання. Залежно від величини цих напруг у поверхневому шарі металу відбуваються пружні, пружно-пластичні або пластичні деформації, що визначають значення твердості [6].

Найчастіше у таких приладах реалізуються наступні методи.

Ультразвуковий контактний імпеданс (UCI). В об'єкт впроваджується металевий стрижень з алмазним конусоподібним наконечником, внаслідок чого змінюється резонансна частота останнього. Розмір цього згасання корелює з твердістю об'єкта. Вважається, що UCI-метод є більш вимогливим до шорсткості поверхні. Для правильного калібрування потрібно вірно вказувати модуль пружності матеріалу. При цьому вимоги до вертикальної орієнтації датчика в момент виміру – не такі жорсткі, як при ударному методі, хоча насправді датчик у будь-якому випадку треба намагатися тримати перпендикулярно до поверхні. Допустимим відхиленням для UCI-методу вважається 15 градусів. З іншого боку, ультразвуковий контактний імпеданс гарний тим, що залишає на досліджуваній поверхні менший відбиток і підходить для контролю виробів малої товщини.

Динамічний (ударний, Leeb). Заснований на вимірі відношення швидкості падіння бойка до швидкості відскоку. Порівняно з UCI даний метод має більшу стабільність і відтворюваність показників. Проте він працює переважно на товстостінних об'єктах, з достатньо великими вагогабаритними характеристиками. У момент спуску бойка датчик повинен розташовуватися вертикально щодо поверхні ОК (за наявності автоматичної компенсації кута нахилу). Відбиток при цьому залишається більшої площини, ніж після ультразвукового перетворювача. Індентор є кулькою з карбиду вольфраму (або кубічного нітриду Бору, кераміки, полікристалічного алмазу, загартованої сталі або іншого матеріалу) діаметром 1,5–5 мм.

Статичний метод (Супер-Роквелла, Portable Rockwell, PR). За принципом дії найближче до методу Роквелла, який реалізується у класичних стаціонарних твердомірах. Індентор датчика для статичного методу являє собою алмазний усічений конус. Відмінність полягає лише в тому, що портативні твердоміри мають справу з меншими навантаженнями. Метод ґрунтується на вимірі глибини впровадження індентора при попередньому та основному навантаженні. Відношення між цими двома величинами перераховується у значення твердості. Тобто це прямий метод, що практично не залежить від модуля пружності та вимог до маси та розмірів об'єкта. Результати визначаються безпосередньо у SPR, без перерахунку. Схема контролю повинна включати наступні операції. Перша – вимір твердості статичним способом безпосередньо на об'єкті контролю чи зразку з тієї ж матеріалу і з тими самими параметрами поверхні (шорсткість, чистота тощо.). Наступний крок – калібрування ультразвукових чи динамічних датчиків за отриманими показаннями, за необхідності – з введенням поправки на вплив модуля пружності матеріалу. Після цього можна переходити до контролю у звичних шкалах HB, HRC, HV, HL. Такий підхід дозволяє досягти найбільш точних і достовірних результатів і знизити вплив факторів, що заважають.

Датчики динамічного методу можна умовно розділити за кількома ознаками.

Енергія удару. Визначається двома ключовими факторами – масою бойка та швидкістю, з якою він падає. Чим більша енергія удару, тим більший діаметр і глибина відбитка. Їхні точні значення визначаються конкретною модифікацією датчика і твердості ОК і, зазвичай, обчислюються сотими або навіть тисячними частками міліметра. Стаціонарні твердоміри залишають відбитки на порядок більших розмірів. Наприклад, за методом Брінелля, діаметр відбитка може сягати 6,0 мм. В той же час існують спеціалізовані перетворювачі для контролю виробів малої товщини, чутливі до ударних впливів, у тому числі з гальванічним покриттям та поверхневим зміцненням. Для контролю виробів високої твердості (понад 450 HB) НВП існує датчик типу E. Повертаючись до енергії удару варто зазначити, що для більшості типових завдань із вимірювання твердості цілком достатньо 11,5 мДж. У датчика G, який рекомендований для об'єктів товщиною від 70 мм і шорсткістю Ra = 7,0 мкм, енергія досягає 90 мДж.

Радіус індентора. Найчастіше він становить 1,5 мм, але трапляються моделі з індентором 2.5, 3 і навіть 5 мм.

Допустима товщина об'єкта у виняткових випадках маса об'єкта може становити лише 0,5 кг. При роботі з датчиком G (шорсткість 3,2-7 мкм) без масивної основи мінімальна маса ОК повинна становити 15 кг. У більшості типових завдань застосовуються датчики, розраховані на мінімальну масу виробів 3, 5 або 6 кг.

Допустима маса об'єкта. Для одних датчиків допустимим вважається лише 1,5 кг, але найчастіше це 3–5 кг. У деяких випадках мінімальна маса дорівнює 15 кг.

З автоматичним (телескопічним) або ручним взводом бойка. У іншому випадку для підготовки до вимірювання деяких датчиків може бути потрібний спеціальний шомпол.

Для звичайних та важкодоступних ділянок. Наприклад, для вінців зубчастих коліс, у вузьких пазах, глухих отворах тощо. Для вимірювання на таких ділянках можна у звичайного датчика відкрутити опорну шайбу (захисну насадку).

З датчиком кута повороту та без нього. Наявність такого датчика дозволяє автоматично враховувати відхилення перетворювача від вертикального положення.

З впаяним кабелем або роз'ємом для самостійної заміни кабелю.

Ультразвукові перетворювачі для портативних твердомірів, як правило, виготовляються з трьома варіантами навантаження: 1, 5 або 10 кг (10, 50 або 100 Н – ньютонів). Чим воно більше, тим глибше індентор проникає в досліджуваний матеріал. В цілому, глибина відбитка все одно виходить менше, ніж при ударному методі. Це дозволяє контролювати вироби з гальванічним покриттям завтовшки всього 9 мкм. Допустима маса об'єкта в деяких випадках може становити лише 0,3–1,0 кг. З іншого боку – вимоги до шорсткості жорсткіші. У багатьох датчиків допустима шорсткість вибирається у $R_a = 1,6$ мкм і навіть $R_a = 0,8$ мкм.

Для вимірювань у важкодоступних зонах передбачені датчики з довгим та вузьким стрижнем. Зважаючи на те, що ультразвукові датчики реалізують інший метод вимірювання, то на відміну від датчиків для методу Ліба, вони можуть бути виготовлені в компактному виконанні.

Кожен тип датчиків розрахований на свою шорсткість: $R_a = 0,4$ мкм, $R_a = 1,6$ мкм, $R_a = 2,0$ мкм, $R_a = 7,0$ мкм, $R_a = 12,5$ мкм і т.д. Шорсткість перевіряється за атестованими зразками шорсткості або за допомогою профілактометрів. Також потрібно переконатися, що на поверхні немає

покриттів (гальванічні покриття – це окремий випадок і для них є спеціальні датчики), накипу, іржі, мастильних матеріалів, забруднень та ін.

Контроль починається з вибору марки металу в налаштуваннях приладу та з вибору шкали вимірювань. Сучасні прилади дозволяють задавати в налаштуваннях параметри об'єкта, враховувати геометрію та ін. Проводити контроль рекомендується на чистій поверхні щонайменше 5 мм від краю об'єкта (10 мм для датчиків типу G) та 1 мм від найближчого відбитка після попереднього виміру.

Далі, тримаючи датчик у повітрі, необхідно звести пружинний механізм. Після встановлення датчика потрібно переконатися, що він розташований строго перпендикулярно до поверхні ОК і щільно притиснутий до неї. Після натискання кнопки спуску бойок, на кінці якого розташований кульковий наконечник з карбиду вольфраму або іншого твердого сплаву, падає в напрямній трубі на поверхню. Постійний магніт, що знаходиться всередині бойка, наводить в котушці індуктивності електрорушійну силу, яка конвертується у значення твердості відповідно до обраної шкали. Результат відображається на екрані електронного блоку. Якщо напрям удару бойка не збігався з напрямом сили тяжіння, то залежно від фактичного кута нахилу, типу датчика та діапазону значень.

Щоб отримати більш точні результати, у кожній точці може бути потрібна серія з 3–5 вимірювань з обчисленням середнього значення.

Конкретний спосіб визначення твердості вибирається виходячи з властивостей матеріалу, завдань вимірювання, умов його проведення, наявної апаратури тощо. Опис переваг та недоліків кожного з перерахованих методів вимірювання твердості наведено в описі твердомірів відповідного типу. Представлення отриманих розмірів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами відбувається безпосередньо від камер на екран монітору.

Введення графічної інформації виконується за наступним алгоритмом: пошук зображення на камері, виділення елементів зображення, що підлягають кодуванню, перетворення координат точок кодованого зображення в цифрову форму і передачу цифрового опису елементів зображення на комп'ютер для подальшої обробки.

Висновки. У роботі досліджено принципи реалізації вимірювання твердості. Наведено алгоритми роботи з детальним описом послідовності дій. Виявлено, що існуючі методи вимірювання

твердості не відображають цілком якогось одних певних властивостей матеріалів, тому немає прямого взаємозв'язку між різними шкалами і методами. Проте перспективи подальших досліджень ґрунтуються на вдосконаленні алгоритму використання кожного методу.

Список літератури:

1. Ляпунов А. М. Принципы работы портативных электронных твердомеров//Машинобудування. Харків, 2016, № 17 С. 118-123.
2. ДСТУ 2825-94 Розрахунки та випробовування на міцність. Терміни та визначення основних понять.
3. Вікіпедія. Твердість URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C> (дата звернення: 27.06.2022).
4. ТОВ НВФ "Стандарт-М" URL: <http://standart-m.com.ua/izmeritelnye-pribory/tverdomery> (дата звернення: 27.06.2022).
5. Козловский А.Э. Расчёт элементов конструкций на растяжение и сжатие: учеб.-метод. пособие / А.Э.Козловский; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. -Иваново, 2015. – 80 с.
6. Кондратьев А. В Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. / Совершенствование метода инструментального индентирования и программно-аппаратных средств контроля твердости металлических покрытий в микро- и нанометровых диапазонах – 2017 URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-metoda-instrumentalnogo-indentirovaniya-i-programmno-apparatnykh-sredstv-/read> (дата звернення: 27.06.2022).

Topchii N.V. PORTABLE HARDNEZERS: PRINCIPLES OF OPERATION AND ANALYSIS OF THE CURRENT STATUS OF METHODS AND INSTRUMENTS FOR MEASURING HARDNESS

In these statistical data, a study of electronic portable solid state drives was carried out, the disclosure of the concepts of hardness, hardness measurement methods, the history of occurrence and the basic principles of operation of portable solid state drives.

For the rest of the hour, technological development in the fields of metalworking, energy and mechanical engineering will lead to an ever wider stagnation of cost-effective coatings, thin slicks, and various upper modification technologies. One of the most important characteristics of materials are their mechanical characteristics, which are assigned to the use and use of the characteristics of materials and indirect indications of their cost. An important characteristic of the mechanical capacities of materials is hardness. The introduction of hardness in a wide increase in the workmanship during the control of technological processes, the selected operational characteristics of the mills, the choice of modes of mechanical processing of the adjustments of the cutting tool thinly.

As a rule, the daily transfer of a solid body is allowed to reveal hardness beyond all major skill scales. With a portable hardness tester, measurement is used directly on parts, which is clearly the main advantage of such devices. A portable solid state drive is an electronic device, as well as other functions, such as the possible refusal to save the results, the formation and coordination of control results protocols, the transmission of pulses to an electronic analyzer for sending, and the receipt of results on a solid state printer. Portable hardness testers make it possible to measure hardness with accuracy, which is not inferior to stationary ones and at the same time, they can achieve low non-peripheral transgressions. Portable accessories, paired with Brinell, Rockwell and Vickers static hardness testers, can be used without any troubles, which allow for the possibility of supervision of objects, which can be used in operation without preparing special equipment and destroying the mold. If you allow control of great objects with their upper

Key words: *hardness, hardness tester, measurement, object of measurement, method, principle.*