

ПРИЛАДИ

УДК 620.178.1

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/01>

Альховик О.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ТВЕРДОМІРІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ СПЕЦТЕХНІКИ

В статті проаналізовано застосування електронних портативних твердомірів з програмним забезпеченням на виробництві та в польових умовах для забезпечення високої надійності та терміну експлуатації спецтехніки.

Розглянуті методи і засоби визначення показників фізико-механічних властивостей матеріалів, в першу чергу твердості матеріалу, від якої залежить якість, надійність, експлуатаційні властивості, ресурс та безпека спецтехніки, яку виробляють підприємства.

Описані прямі (класичні методи визначення показників твердості по Брінеллю, Роквеллу, Шору, Віккерсу, Супер-Роквеллу) та непрямі методи (динамічний і ультразвуковий).

Для визначення показників твердості прямими методами застосовують стаціонарні установки. Вимірювання показників твердості за допомогою стаціонарних установок потребує великих затрат часу. Стаціонарні установки мають обмеження під час застосування по вазі та розмірах виробів, які підлягають випробуванням, наявність доволі великого відтиску на поверхні виробу та відсутність мобільності.

Динамічні твердоміри, в яких використовується метод відскоку (метод Ліба), рекомендовані до використання для визначення твердості виробів з вагою не менше ніж 5 кг та товщиною стінки не менше ніж 6 мм.

Ультразвукові твердоміри, в яких визначення твердості ґрунтується на зміні резонансної частоти коливань металевого стержня із закріпленою на кінці алмазною пірамідкою Віккерса під час контакту останньої з поверхнею виробу. Ультразвукові твердоміри практично не мають обмежень під час застосування.

Динамічні і ультразвукові твердоміри доповнюють один одного, тому існують комбіновані твердоміри, які дозволяють проводити визначення твердості великого сортаменту виробів та марок матеріалів одним комбінованим приладом.

На підставі проведеного аналізу визначено, що для виготовлення якісної та надійної спецтехніки необхідно проведення контролю фізико-технічних характеристик елементів виробів, в тому числі визначення показників твердості елементів виробів з застосуванням динамічних, ультразвукових та комбінованих портативних електронних твердомірів.

Ключові слова: твердість, метод визначення твердості, твердомір, якість, надійність, спецтехніка.

Постановка проблеми. Твердість – здатність матеріалу чинити опір проникненню в його поверхневі шари іншого, твердішого тіла. Показник твердості визначає: можливість обробки матеріалу свердлінням, різанням, шліфуванням; стійкість проти спрацювання матеріалу; здатність обробляти інші матеріали.

На цей час визначення показників твердості матеріалів здійснюється за допомогою двох методів: прямих та непрямих. Прямі методи – це

класичні методи визначення показників твердості матеріалів по Брінеллю, Роквеллу, Шору, Віккерсу, Супер-Роквеллу [5; 9; 10]. Твердість металів та інших матеріалів оцінюється в одиницях твердості. Визначення показників твердості прямими методами ґрунтується на здатності матеріалу чинити опір проникненню іншого, твердішого тіла – індентора. Індентор – це накісничок приладу, який виготовляють з алмазу, карбиду вольфраму або гартованої сталі чи твер-

дого сплаву та який має визначену форму: кулька, конус, піраміда.

Прилади для визначення показників твердості прямими методами – це стаціонарні установки, в яких до індентора, що вдавлюється в поверхню зразка, який підлягає випробуванню, прикладається визначене навантаження. Навантаження може прикладатися в ручному або автоматичному режимі. На початку випробувань до індентора прикладається невелике навантаження для перевірки правильності його встановлення, а потім прикладається розрахункове навантаження. Після прикладання навантаження на поверхні зразка залишається відтиск, по формі і глибині якого визначається твердість матеріалів.

До недоліків стаціонарних твердомірів варто віднести: відсутність мобільності; обмеження по вазі та розмірах виробів, які підлягають випробуванню; наявність доволі великого відтиску на поверхні виробу; великі затрати часу на визначення показників твердості.

У наукових дослідженнях та на виробництві застосовують також непрямі методи визначення показників твердості – ультразвуковий і динамічний. Ці методи визначають показники твердості матеріалів в залежності від інших фізико-механічних характеристик матеріалів, що підлягають дослідженням.

У цій роботі проаналізовані методи і засоби для визначення твердості матеріалів та необхідність застосування електронних твердомірів з програмним забезпеченням для підвищення якості, надійності та збільшення терміну експлуатації спецтехніки, саме тому тема цієї роботи є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливим етапом під час виготовлення та експлуатації спецтехніки є контроль якості продукції. На якість і надійність техніки великий вплив мають фізико-механічні властивості матеріалів і виробів, передусім твердість матеріалів, від якої залежать ресурс роботи і експлуатаційні властивості спецтехніки. Першим визначенням твердості матеріалів почав займатися в 1722 р. французький природознавець Реомюр Рене Антуан, його справу продовжив німецький мінеролог Моос. Шкала Мооса виявилася дуже вдалою і використовується в мінералогії до цього часу [3, с. 102]. В ХХ ст. проблемами твердості матеріалів займалися вчені Брінелль, Роквелл, Віккерс та інші.

Науковими дослідженнями твердості матеріалів в наш час займаються професори ХНАДУ к.т.н. В.І. Мощенко, д.т.н. Ю.В. Батигін та інші вітчизняні та зарубіжні вчені. В їхніх працях опи-

сані класифікація методів визначення твердості матеріалів та сфери застосування цих методів [1, с. 129–132]. Попри велику кількість публікацій, майже у всіх публікаціях описані прямі методи визначення твердості на стаціонарних установках, але мало уваги приділяється портативним електронним твердомірам з програмним забезпеченням, за допомогою яких визначають показники твердості матеріалів та виробів непрямыми методами, тому існує необхідність у подальших дослідженнях сфери застосування цих приладів.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз сфер застосування електронних твердомірів з програмним забезпеченням для підвищення надійності та якості спецтехніки за різних умов – на промислових підприємствах, під час випробувань і в польових умовах.

Викладення основного матеріалу дослідження. На цей час використовуються твердоміри, призначені для визначення твердості виробів, виготовлених із сталі, сплавів, чавуну, кольорових металів, пластмаси, гуми, інших матеріалів та зварних з'єднань, за шкалами Брінелля (НВ), Роквелла (HRB, HRC), Віккерса (HV), Шора "D" (HSD) [4, с. 119–125].

Способи визначення твердості залежно від характеру прикладання навантаження і вимірювання опору вдавлення індентора поділяють на статичні, динамічні і кінетичні. Найбільш поширені статичні методи, за яких навантаження до індентора прикладають плавно і поступово, а час витримки під навантаженням регламентується згідно зі стандартами на відповідні методи. Кінетичні методи визначення твердості ґрунтуються на безперервній реєстрації процесу вдавлення індентора з записом діаграми «навантаження на індентор – глибина вдавлення індентора». Особливість такого підходу основана на реєстрації процесу пружно-пластичного деформування матеріалу під час вдавлення індентора. Під час динамічних методів визначення твердості індентор діє на виріб з певною кінетичною енергією, яка витрачається на пружну віддачу виробу і формування відбитка.

У цій статті розглядаємо ручні портативні електронні прилади, які почали використовуватися останнім часом через свою доступність, достатню точність вимірювання, мобільність, універсальність та невисоку вартість. Завдяки розробці та серійному виробництву портативних твердомірів контроль твердості став доступний не лише в наукових лабораторіях і на промислових підприємствах, а також в польових умовах.

На цей час застосовуються два способи визначення твердості, які використовуються в портативних електронних приладах з програмним забезпеченням – динамічний і ультразвуковий.

Динамічний метод (метод відскоку, метод Ліба) регламентується ASTM A956-02 “Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products” [11]. Визначення твердості за цим методом проводиться шляхом вимірювання швидкості відскоку твердосплавної кульки. Швидкість відскоку кульки залежить від твердості поверхні зіткнення. Швидкість падіння-відскоку визначається за допомогою вимірювання ЕРС, що наводиться в котушці індуктивності постійним магнітом, закріпленим на бійку з твердосплавною кулькою. Порівняння цих швидкостей і є величиною твердості за шкалою Ліба (HL), яка на практиці не застосовується. Прилади автоматично перекладають та показують значення твердості по одній з розповсюджених шкал твердості: Роквелла; Брінелля; Віккерса; Шора.

Динамічні твердоміри рекомендовані для використання під час визначення твердості виробів з вагою, не меншою 5 кг, та товщиною стінки, не меншою 6 мм. Обмеження викликані необхідністю запобігання виникненню пружних коливань в тілі виробу, які призводять до додаткових непередбачуваних похибок.

Динамічний метод застосовується для виробів із значними габаритними розмірами, кованих виробів, литих деталей та деталей зі складною конфігурацією. Глибина відбитка за динамічного методу – 300–500 мкм, що свідчить про непридатність цього методу для визначення твердості поверхневого зміцненого шару, тому що в цьому разі прилад показує середнє значення твердості, яке враховує твердість поверхневого шару і твердість основного металу. Динамічний твердомір чутливий до положення датчика приладу в просторі. Датчик приладу повинен бути встановлений по нормалі до поверхні виробу; відхилення від нормалі призводить до завищення результату визначення твердості.

Твердоміри, в яких реалізований динамічний метод вимірювання, – NOVOTEST T-Д1 і T-Д2, та аналогічні прилади інших виробників.

Ультразвуковий метод регламентується ASTM A1038-10a “Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method” [12]. Метод заснований на зміні резонансної частоти коливань металевого стержня із закріпленою на кінці алмазною пірамідкою Віккерса під час контакту пірамідки з поверхнею виробу.

На металевий стрижень (резонатор) за допомогою п’єзоелектричного перетворювача подаються коливання ультразвукової частоти. На протилежному кінці стрижня закріплена алмазна пірамідка Віккерса, яка контактує з металом. Залежно від твердості виробу пірамідка під час прикладення фіксованого навантаження вдавлюється на різну глибину і має різну площу контакту з металом. Під час контакту з металом в стрижні відбувається згасання частоти коливань. Швидкість затухання коливань залежить від площі контактної поверхні – із збільшенням площі контактної поверхні збільшується швидкість затухання коливань. Прилад фіксує зміну частоти коливань і автоматично переводить її в значення твердості за шкалою, по якій відкалібрований прилад.

Ультразвуковий метод вимірювань твердості майже не має обмежень під час застосування. Мінімальні допустимі значення ваги і товщини стінок контрольованих виробів умовні. Виріб повинен мати ділянку з площею, достатньою для контакту з пірамідкою (індентором). Притискання стрижня до виробу з зусиллям 5 кгс триває близько секунди.

Ультразвуковий метод найбільш придатний для застосування під час контролю твердості зміцнених поверхневих шарів виробів, тому що глибина проникнення індентора знаходиться в межах 30–50 мкм. Твердомір чутливий до положення датчика в просторі, тому необхідно встановлювати датчик по нормалі до поверхні виробу.

Головний недолік методу – обмежене застосування на грубозернистих структурах. Ультразвуковий метод, зважаючи на малу площу контакту, чутливий до розміру зерен матеріалу і призводить до додаткової похибки, яка залежить від різниці властивостей зерен сплавів, меж зерен і фаз компонентів. За допомогою ультразвукового методу можна визначати показники твердості різноманітних виробів. Це вироби різних форм і конструкцій з виступаючими елементами і важкодоступними місцями.

Твердоміри, в яких використовується ультразвуковий метод вимірювання, – NOVOTEST T-У1 і T-У2, та аналогічні інших виробників.

Динамічний і ультразвуковий методи, враховуючи їх рекомендовані сфери застосування, доповнюють один одного і дозволяють проводити визначення твердості великого сортаменту виробів та марок матеріалів.

Під час визначення твердості матеріалів динамічними та ультразвуковими методами необхідна попередня підготовка поверхні виробів, які під-

лягають контролю: видалення окалини, іржі, масил, бруду, фарби та інших забруднень. Рекомендовані значення шорсткості поверхні виробів для динамічного методу – не менше Ra 3,2, а для ультразвукового – не менше Ra 2,5.

Динамічний та ультразвуковий методи чутливі до модуля пружності матеріалу (модуля Юнга). Якщо прилад відкалібрований на конкретному матеріалі з певним значенням модуля пружності (звичайно – низьковуглецева сталь), то під час застосування його на матеріалі з іншим значенням модуля пружності визначений показник твердості матеріалу буде некоректним. Для забезпечення необхідної точності визначення твердості проводиться калібрування приладу на зразках матеріалу з відомою твердістю. Зразки матеріалу не повинні бути магнітними, рекомендовано після виготовлення зразків їх розмагнітити [7].

Твердоміри, які дозволяють проводити вимірювання двома методами (динамічним і ультразвуковим), називаються комбінованими, вони оснащені двома датчиками і двома пакетами програмного забезпечення. Такі твердоміри надають можливість вирішити максимальну кількість завдань визначення твердості одним приладом.

Твердоміри, в яких використовуються динамічні та ультразвукові методи, – NOVOTEST T-УД1 і T-УД2 та аналогічні інших виробників.

Електронні твердоміри з програмним забезпеченням (динамічні, ультразвукові та комбіновані) автоматично визначають середнє значення результатів вимірювань, його введення в буфер пам'яті приладу, вивід з нього на дисплей приладу або на комп'ютер зі збереженням у вигляді файлу. Незалежна пам'ять електронних твердомірів запрограмована не менше ніж на десять шкал твердості, а також допускає можливість програмування (калібрування) шкали твердості приладу з його клавіатури або з комп'ютера [2, с. 15–147].

В електронних твердомірах передбачена функція підсвічування дисплея, що забезпечує стійку роботу приладу в неосвітлених місцях. Електронні твердоміри придатні для використання за низьких (до мінус 15°C) температурах повітря. Дисплей приладу дозволяє відстежувати дії спеціаліста під час роботи (визначення середнього значення показників твердості, архівування даних, відображення положення датчиків, калібрування приладу по визначеній шкалі твердості, включення підсвічування, стан акумуляторів живлення).

Наявність спеціальних датчиків різного призначення, в тому числі спеціального датчика з подовженою насадкою, дозволяє вимірювати

твердість шестерень, шківів, пазів під шпонки, в важкодоступних місцях виробів, зон термічного впливу біля зварних валиків на виробках.

Корпуси електронних твердомірів виготовляються в протиударному, вологостійкому виконанні. В багатьох марках твердомірів є вбудовані фотокамери для фіксації процесів визначення твердості з зазначенням часу та дати проведення вимірів.

Під час роботи з ручними приладами на результати визначення твердості також впливає людський фактор. Для успішної роботи з приладом спеціаліст повинен «набити руку», пристосуватися, відчути роботу датчика – це досягається після декількох годин навчання.

Для отримання точних результатів вимірювань рекомендується проводити ряд вимірів – достатня кількість 5–8 раз, з подальшим автоматичним визначенням середнього результату вимірів. Під час визначення середнього результату необхідно відкидати явно некоректні (завищені або занижені) значення твердості; поява таких значень зумовлена непрямыми методами вимірювання. На швидкість відскоку кульки або зміну частоти коливань резонатора можуть, крім твердості матеріалу, вплинути тремтіння рук, переміщення об'єкта контролю, похитування датчика, чистота поверхні та її шорсткість, а для ультразвукового датчика – занадто коротке або занадто тривале прикладення навантаження до вимірювального датчика; занадто слабе або занадто сильне притиснення датчика до об'єкта контролю; низька напруга елементів живлення (за умови їх виснаження). У разі правильного використання за допомогою ручних електронних твердомірів можна досягти точності вимірювань, яка майже не відрізняється (відхилення $\pm 3\%$) від результатів вимірювань стаціонарними твердомірами.

Вага та габаритні розміри електронних твердомірів і швидкість вимірювань роблять їх незамінними інструментами під час проведення експрес-аналізів твердості в виробничих та польових умовах. Автономність роботи вказаних приладів забезпечується за допомогою акумуляторів типу АА.

Портативні електронні твердоміри надають можливість проводити вимірювання твердості за різними шкалами твердості: Роквелла; Брінелля; Віккерса; Шора. Калібрування електронних твердомірів з програмним забезпеченням із використанням зразка матеріалу з відомим значенням твердості повинно проводитися досвідченим спеціалістом. Проведення калібрування проводиться

за допомогою введення з клавіатури електронних твердомірів необхідних даних. Час калібрування приладу не перевищує 5 хвилин.

Висновки. Застосування електронних портативних твердомірів з програмним забезпеченням на виробництві та в польових умовах надає можливість оперативно контролювати фізико-технічні характеристики (твердість) вихідних матеріалів і виробів, що впливає на якість виробів. Зазначені прилади дозволяють проводити вимірювання твердості поверхневого шару металів, які пройшли поверхневу обробку: напилювання, наплавлення, механічну, термічну та інші види обробок. Такий контроль твердості неможливий за допомогою твердомірів стаціо-

нарного типу. Електронні твердоміри дозволяють проводити вимірювання твердості великогабаритних виробів та в важкодоступних зонах виробів; проводити експрес-аналіз твердості з високою продуктивністю – для одного виміру твердості потрібно майже в 10 разів менше часу, ніж для твердомірів стаціонарного типу. З підвищенням якості виробів збільшується також їхня надійність, термін експлуатації і покращуються робочі техніко-економічні характеристики в процесі експлуатації. Визначення показників твердості з застосуванням електронних твердомірів з програмним забезпеченням повинні виконувати спеціалісти, які пройшли навчання і мають практичні навички роботи.

Список літератури:

1. Мощенок В.І. Сучасна класифікація методів визначення твердості. *Автомобільний транспорт*. № 26, 2010. с. 129–132.
2. Шкурко В.В., Хейфец И.М., Алексеева Т.А. Анализ технических средств и программного обеспечения для управления физико-механическими и геометрическими параметрами качества продукции. *Инновационные технологии в машиностроении. Электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технического парка Полоцкого государственного университета* (Новополоцк, 21–22 апреля 2020 г.) под. редакцией чл. корр. НАН Беларуси, д.т.н., проф. В.К. Шелега ; д.т.н., проф. Н.Н. Попок. с. 145–147.
3. Орешко Е.И., Уткин А.А., Ерасов В.С., Ляхов А.А. Методы измерения твердости материалов. *Труды ВИАМ* № 1 2020 (85). с. 101–117.
4. Сергеев А.П., Макаров А.В., Владимиров А.А., Белов Н.В. Анализ методов измерения твердости и перспективы их совершенствования. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 10. с. 119–125.
5. ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 Матеріали металеві. Випробування на твердість по Брінеллю. Частина 1. Метод випробування (EN ISO 6506-1:2014, IDT; ISO 6506-1:2014, IDT)
6. ДСТУ EN ISO 6506-2:2019 Матеріали металеві. Випробування на твердість по Брінеллю. Частина 2. Перевірення та калібрування випробувальних машин (EN ISO 6506-2:2018, IDT; ISO 6506-2:2017, IDT)
7. ДСТУ EN ISO 6506-3:2017 Матеріали металеві. Вимірювання твердості за шкалою Брінелля. Частина 3. Калібрування еталонних мір твердості (EN ISO 6506-3:2014, IDT; ISO 6506-3:2014, IDT)
8. ДСТУ EN ISO 6506-4:2019 Матеріали металеві. Випробування на твердість по Брінеллю. Частина 4. Таблиця значень твердості (EN ISO 6506-4:2014, IDT; ISO 6506-4:2014, IDT)
9. ДСТУ ISO 6507-1:2007 Матеріали металеві. Визначення твердості за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2005, IDT)
10. ДСТУ ISO 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) (ISO 6508-1:2005, IDT)
11. ASTM A956-02 «Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products», ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002, www.astm.org
12. ASTM A1038-10a «Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method», ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org

Alkhovyk O.V. APPLICATION OF ELECTRONIC HARDNESS MEASURING INSTRUMENTS TO IMPROVE QUALITY AND RELIABILITY WHEN PRODUCING SPECIAL EQUIPMENT

The use of electronic hardness measuring instruments with software in production and in the field to ensure high reliability and service life of special equipment is analyzed in the article.

The article considers methods and means of determining the indicators of physical and mechanical qualities of materials, first of all the hardness of the material, on which the quality, the reliability, the operational attributes, the resource and the safety of the special equipment which is produced by enterprises depend on.

The article describes direct (Brinell, Rockwell, Shore, Vickers, Super-Rockwell classical methods for determining hardness indicators) and indirect methods (dynamic and hypersonic).

Permanently fixed installations are used to determine hardness indicators by direct methods. Measuring hardness indicators by means of permanently fixed installations requires a lot of time. Permanently fixed installations have limitations when applying on the weight and on the size of the devices which are to be tested, the presence of quite a large imprint on the surface of the device and the lack of mobility.

Dynamic hardness measuring instruments in which the rebound method is used (Leeb method) are recommended for use to determine the hardness of devices weighing at least 5 kg and having the wall thickness of at least 6 mm.

Hypersonic hardness measuring instruments, in which the determination of hardness is based on the change of the resonant oscillations frequency of the metal rod with the fixed Vickers diamond pyramid at the end when the latter is in contact with the surface of the product. Hypersonic hardness measuring instruments have virtually no restrictions on use.

Dynamic and hypersonic hardness measuring instruments reinforce each other, so there are combined hardness measuring instruments which allow determining the hardness of a wide range of devices, products and brands of the materials with one combined device.

It is determined based on the analyses that it is necessary to control the physical and technical characteristics of product elements, including determining the hardness of the product elements using dynamic, hypersonic and combined portable electronic hardness measuring instruments for producing of high-quality and reliable special equipment.

Key words: *hardness, method of hardness determination, hardness measuring instrument, quality, reliability, special equipment.*