

Metódy merania tvrdosti materiálov a zásady pri voľbe prenosných prístrojov na meranie

Ing. Milan Zaťko, Ing. Erich Eckhardt

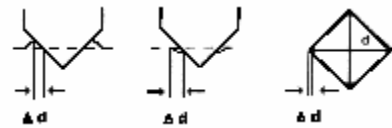
Hodnota tvrdosti je dôležitá charakteristika materiálu. Tvrdosť, ako materiálovo-fyzikálna vlastnosť, je všeobecne definovaná ako odpor materiálu proti vnikaniu cudzieho tvrdšieho telesa do meraného materiálu.

Hodnota tvrdosti dáva obraz o odolnosti materiálu oproti opotrebeniu, jeho opracovateľnosti, o stave tepelného spracovania a pod. Na základe vzájomnej závislosti tvrdosti a pevnosti materiálu možno jednoducho a rýchlo zistiť pevnosť skúšaného materiálu zmeraním jeho tvrdosti bez zdĺhavej výroby skúšobnej vzorky na zistenie pevnosti na trhacom zariadení.

Odpor materiálu proti vnikaniu cudzieho tvrdšieho telesa je tým väčší, čím menšia je veľkosť otláčku, ktorý spôsobí skúšobná sonda pri jej zatlačení do materiálu definovanou silou. Pri doteraz používaných a normovaných metódach merania je hodnota tvrdosti stanovená iba zo zostatkovej deformácie materiálu po vpichu. Podiel elastickej deformácie sa zanedbáva. Pri výpočte hodnoty tvrdosti sa predpokladá, že zostávajúci otláčok je geometricky verný obraz vnikajúceho telieska sondy. Tento predpoklad však zanedbáva dva dôležité momenty:

1. zostávajúci otláčok je v skutočnosti skresleným (deformovaným) obrazom vnikajúceho telieska sondy (obr. 1),
2. výsledná plastická deformácia je často iba malou časťou celkovej deformácie, ktorú materiál prekonal.

Oba faktory majú s narastajúcou tvrdosťou väčší význam. Závisia od elastickeho modulu materiálu a od medze klzu materiálu.



Obr. 1 Zväčšenie uhla vpichu v porovnaní s uhlom vnikajúceho hrotu pri skúške tvrdosti podľa Rockwella a Vickersa

Stručný opis statických a dynamických metód merania tvrdosti

Tvrdosť materiálov môžeme vo všeobecnosti zisťovať (merať) dvomi metódami:

a) Statickou metódou (podľa Brinella, Rockwella, Vickersa a. i.), ktorá sa zakladá na vniknutí skúšobného telieska štandardnou skúšobnou statickou silou do meraného materiálu a určení hodnoty tvrdosti ako podielu veľkosti sily a charakteristickej veľkosti otláčku v skúšanom materiáli (plocha, hĺbka). Táto metóda sa využíva najmä pri stacionárnych tvrdomeroch.

Skúška podľa Brinella (označenie skúšky HB)

Ako vnikajúce teliesko sondy sa používa guľôčka s priemerom 2,5; 5 alebo 10 mm. Je to veľmi presná metóda, je vhodná na meranie mäkkších materiálov a vyžaduje kvalitne pripravený povrch.

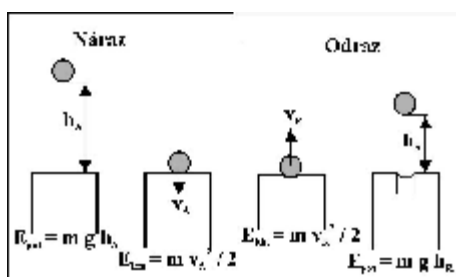
Skúška podľa Rockwella (označenie skúšky HR)

Ako vnikajúce teliesko sa používa diamantový kužeľ s vrcholovým uhlom 120° (označenie skúšky HRC) alebo guľôčka priemeru $\Phi = 1,5875$ mm (označenie skúšky HRB). Metóda je vhodná na tvrdšie materiály a pri dobrej príprave povrchu dosahuje vysokú presnosť.

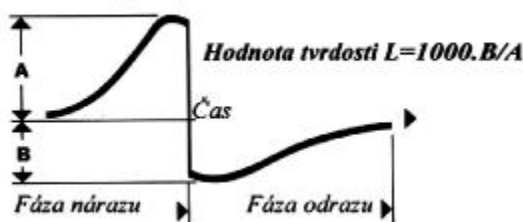
Skúška podľa Vickersa (označenie skúšky HV)

Ako vnikajúce teliesko sondy sa používa diamantový ihlan s vrcholovým uhlom 136° . Metóda je vhodná ako na meranie mäkkých, tak aj tvrdých materiálov.

b) Dynamickou metódou (Leeb, Shore atď.), ktorá je principiálne založená na vrhnutí skúšobného kalibrovaného telieska na meraný materiál a určení pomeru rýchlostí kalibrovaného telieska pred dopadom a po odraze telieska od meraného povrchu. Metóda sa používa hlavne pri prenosných tvrdomeroch.



Priebeh signálu pri skúšobnom údere



Obr. 2 Nárazová rýchlosť v_R pri dopade skúšobného telieska na skúšanú plochu (resp. energia pri dopade) a odrazová rýchlosť v_A po odraze (resp. energia po odraze) pri skúške tvrdosti podľa Leeba (resp. Shoreho) a priebeh signálu v meracom prístroji

Skúška podľa Leeba (označenie skúšky HL)

Pri skúške sa používa teliesko – úderník (s hrotom z tvrdého kovu), ktorý sa vrhá na skúšaný povrch materiálu. Meria sa nárazová rýchlosť v_R pri dopade úderníka na skúšanú plochu a odrazová rýchlosť v_A po odraze (obr. 2). Čím tvrdší je materiál, tým väčšia je rýchlosť po odraze. Hodnota tvrdosti HL je tisíc násobkom pomeru týchto dvoch rýchlostí. Hodnota tvrdosti (Leeb) je teda daná vzťahom:

$$HL = v_R / v_A \times 1000.$$

Metóda Leeb sa prevzala ako štandard na meranie tvrdosti v systéme ASTM: A 956-00 Štandardná skúšobná metóda na meranie tvrdosti oceľových výrobkov metódou "Leeb".

Skúška podľa Shoreho (označenie skúšky HS)

Pri skúške sa ako teliesko vrhané na skúšaný povrch materiálu používa presne definovaná štandardná guľôčka (priemerom a hmotnosťou). Meranie sa zakladá na určení pomeru energie guľôčky dopadajúcej na skúšaný materiál ($E_A = m \cdot g \cdot h_A$) a energie odrazenej guľôčky ($E_R = m \cdot g \cdot h_R$, obr. 2). Hodnota tvrdosti (Leeb) je teda daná vzťahom:

$$HS = E_A : E_R$$

Všeobecné poznámky k jednotlivým metódam

Nie všetky metódy merania tvrdosti sú schopné pokryť celý rozsah hodnôt tvrdostí rôznych materiálov bežne sa vyskytujúcich v technickej praxi. Orientačný prehľad o rozsahoch použiteľnosti jednotlivých metód je uvedený na obr. 3.

Namerané hodnoty tvrdosti rôznymi metódami (a tým aj v rôznych stupniciach tvrdosti) sa vzájomne porovnávajú – prepočítavajú podľa predpisov DIN 50 150, resp. ASTM E 140, pri zohľadnení všetkých obmedzení podľa uvedených predpisov. Tieto normy rozdeľujú materiály v závislosti od elastického modulu pružnosti E do nasledovných materiálových skupín:

- meď,
- bronz (CuAl, CuSn),
- mosadz (CuZn),
- hliník,
- guľôčková liatina,
- sivá liatina,
- nehrdzavejúca oceľ,
- nástrojová oceľ,
- nelegovaná a nízkolegovaná oceľ.

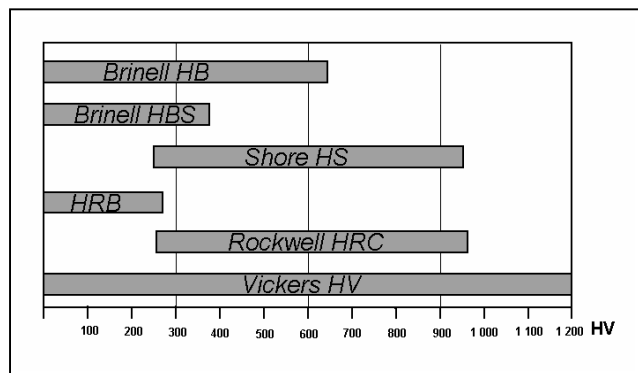
Špičkové meracie prístroje majú tieto prepočítavacie tabuľky uložené v pamäti a nameranú hodnotu tvrdosti automaticky zobrazujú vo zvolenej stupnici tvrdosti.

Meranie tvrdosti prenosnými tvrdomermi v praxi

Po tomto stručnom rámcovom opise metód merania a posudzovania tvrdosti materiálov sa ďalej uvádzajú možnosti merania prenosnými tvrdomermi v prevádzkových podmienkach.

Samozrejme, aj v prevádzkových podmienkach musí byť na presné meranie tvrdosti zabezpečená optimálna drsnosť a čistota meraného miesta (brúsený, resp. leštený povrch, zbavený nečistôt, prachu a mastnoty). Je potrebné brať do úvahy aj vplyv zvyškových magnetických polí, smer merania, stabilitu meracej sondy pri ručnom meraní a v neposlednom rade aj druh materiálu, ktorého tvrdosť sa meria.

Pri voľbe vhodného prístroja na prevádzkové meranie tvrdosti sa musí brať zreteľ na prístupnosť k meraným miestam, veľkosť, resp. hmotnosť kontrolovanej súčiastky (dielca) a ekonomické zhodnotenie vstupných nákladov (prevádzkové náklady sú už minimálne). Po konštrukčnej stránke musia byť prístroje odolné proti nárazom, prachu, vlhkosti (také sú typické prevádzkové podmienky). Prístroje by mali byť rozmerovo a hmotnosťou „prijateľné“, pričom pre užívateľa sú konštrukčne výhodné prístroje so samostatnou meracou časťou (sondou) a samostatnou vyhodnocovacou a zobrazovacou časťou. Samozrejmosťou býva dobrá čitateľnosť údajov na displeji za zníženej viditeľnosti. Užívateľ určite uvíta jednoduché ovládanie bez množstva ovládacích prvkov a nastavovacích faktorov, ktoré majú vplyv na výsledky merania.



Prístrojová technika – prenosné tvrdomery

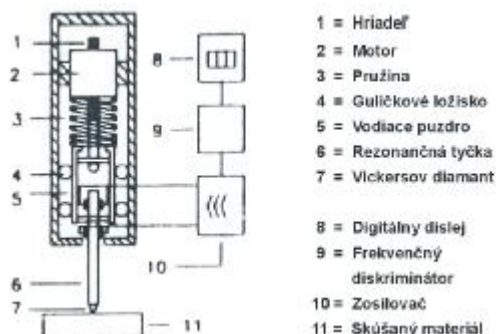
V súčasnosti si záujemca môže na trhu vybrať z celého radu prístrojov na meranie tvrdosti materiálov statickou alebo dynamickou metódou.

Prístroje používajúce statickú metódu merania tvrdosti

Špičkové moderné prenosné prístroje na meranie tvrdosti materiálov merajú metódou **UCI (Ultrasonic Contact Impedance)**. Tieto prístroje môžu pracovať vo veľkom meracom rozsahu (cca 20 až 1740 HV).

Metóda UCI (metóda bola patentovaná v r. 1961 v USA) sa zakladá na princípe závislosti zmeny vlastnej rezonančnej frekvencie skúšobnej sondy od veľkosti plochy otlaku v skúšanom materiáli. Skúšobná sonda je na jednom konci opatrená diamantovým ihlanom podľa Vickersa (136°), je vtlačaná štandardnou silou do skúšaného povrchu materiálu. Hĺbka vniknutia ihlanu do materiálu a tým aj celková kontaktná plocha sonda / materiál, je úmerná zmene rezonančnej frekvencie rezonátora sondy.

Tyčový rezonátor s vickersovým diamantom je pomocou piezoelektrického efektu vybudovaný k oscilácii v pozdĺžnom smere. Pri elastickej väzbe tohto systému s hmotou skúšaného materiálu vzniká posun rezonančnej frekvencie k vyšším hodnotám, pretože na kmitajúci systém pôsobí dodatočná spätná sila. Veľkosť tejto sily je závislá od kontaktnej plochy A medzi vnikajúcim telesom a skúšaným materiálom a od elastických charakteristík materiálu a rezonátora:



$$\Delta f = f(A, E_d, \nu_d, E_p, \nu_p, f_0)$$

kde A je kontaktná plocha,

E_d – elastický modul diamantu,

E_p – elastický modul skúšaného materiálu,

ν_d – Poissonovo číslo diamantu,

ν_p – Poissonovo číslo skúšaného materiálu,

f_0 – rezonančná frekvencia voľne kmitajúcej tyčky.

Pri zanedbaní tlmiaceho efektu a reaktancie skúšaného materiálu možno ukázať, že kontaktná plocha A je výsledkom súčinu dvoch funkcií g a h:

$$A = g(E_d, \nu_d, E_p, \nu_p) \cdot h(\Delta f / f_0)$$

Meraním E_d , ν_d , E_p , ν_p , Δf a f_0 možno vypočítať hodnotu A. Vickersova tvrdosť je potom daná vzťahom:

$$HV = F / A$$

kde F je štandardná skúšobná sila,

A – kontaktná plocha.

Pretože elasticke moduly a Poissonovo číslo sú často neznáme a ťažko zmerateľné, môže byť hodnota materiálových konštánt stanovená na porovnávacej mierke so známou tvrdosťou. Potom možno merať tvrdosť materiálov, ktorých elasticke konštanty sú len málo odlišné od hodnôt porovnávacej mierky. Na určenie tvrdosti HV sú potom potrebné iba hodnoty Δf a f_0 .

Keďže všetky potrebné veličiny sa merajú pri štandardnej prítlačnej sile, anuluje sa vplyv pružnosti materiálu, resp. jeho pamäťová schopnosť. Pri nelegovaných a nízko legovaných oceliach sú zmeny Poissonovho čísla a modulu pružnosti meraného materiálu malé (materiálové konštanty potrebné pre stanovenie stupňa tvrdosti) (niekoľko %). Preto môžu byť tieto prístroje "predkalibrované" na tieto materiály. Tak možno automaticky merať tvrdosť týchto materiálov s dostatočnou presnosťou aj bez potreby kalibračných normálov (porovnávacích mierok).

Prístroje používajúce dynamickú metódu merania tvrdosti

Ako vyplýva z technickej podstaty dynamickej metódy, prístroje zabezpečujú jednak vrhnutie skúšobného telesa na meraný povrch materiálu a jednak merajú a vyhodnocujú dopadovú a odrazovú rýchlosť, resp. energiu. Mechanická časť prístroja býva oddelená od vyhodnocovacej a zobrazovacej jednotky, a teda k jednej základnej jednotke možno pripojiť viaceré rázových jednotiek a tým pokryť širší rozsah tvrdostí. Najmodernejšie prístroje majú však obe jednotky integrované do jedného celku, čím je zvýšená operatívnosť použitia prístroja v rôznych podmienkach.

Prístroje s optickým snímaním vpichu

Prístroj TIV od firmy GE Inspection Technologies využíva úplne nový spôsob elektronického snímania parametrov a vyhodnocovania tvrdosti **TIV** (Through Intender Viewing – voľne preložené ako „pohľad cez diamant“). Tento spôsob sa síce zakladá na klasickom princípe merania tvrdosti (meranie veľkosti uhlopriečok vpichu Vickersovho diamantu), avšak na rozdiel od klasických tvrdomerov s mechanickým, resp. mechanicko-optickým meraním, sa pri spôsobe TIV uhlopriečky merajú priebežne elektronicky. Proces vnikania diamantu do materiálu sa sníma pomocou špeciálnej optiky a CCD kamery a **obraz vpichu sa priebežne zobrazuje na displeji**. Pri dosiahnutí nominálneho skúšobného zaťaženia (napr. 50 N) sa obraz zaznamená a automaticky vyhodnotí. Pri automatickom vyhodnotení systém stanovuje dĺžku uhlopriečok vpichu diamantu. Stanovené uhlopriečky sú potom základom pre výpočet zodpovedajúcej číselnej hodnoty podľa definície Vickersovej tvrdosti a výsledky sú zobrazené štandardne v stupnici HV (s možnosťou prepočtu podľa ASME alebo DIN na iné stupnice tvrdosti).

Túto metódu možno použiť pre rôzne materiály (železné a neželezné kovy, teflón, sklo) bez potreby dodatočnej kalibrácie (meranie uhlopriečok sa vykonáva pri skúšobnom zaťažení, presnosť merania nie je ovplyvňovaná odpružením materiálu). Meranie je nezávislé na geometrii a hmotnosti objektu, možno merať aj malé tenké súčiastky.

Nakoľko vpich možno v priebehu merania sledovať na obrazovke, obsluha môže priamo odhadnúť kvalitu merania alebo spoľahlivosť nameranej hodnoty. Akýkoľvek vplyv na proces vnikania Vickersovho diamantu, spôsobený napr. kvalitou povrchu alebo mikroštruktúrou materiálu možno okamžite rozoznať a vziať do úvahy pri vyhodnocovaní merania.

Všeobecné odporúčania na výber tvrdomeru

Pri výbere vhodného tvrdomeru musí mať budúci užívateľ jasnú predstavu a odpoveď na štyri základné otázky:

- Aké typy materiálov bude kontrolovať – homogénnej alebo nehomogénnej štruktúry?
- Bude merať tvrdosť malých výrobkov, súčiastok s malou hmotnosťou (do cca 5 kg) alebo veľkorozmerné diely?
- Bude merať tenké materiály, prípadne merať povrchové vrstvy?
- Aká bude dostupnosť a minimálny rozmer meranej plochy (pôjde napr. o meranie tvrdosti na pätách malých ozubených kolies)?

Prístroj pracujúci na princípe dynamického merania tvrdosti sa volí v prípadoch:

- merania nehomogénnych materiálov (typu liatiny),
- merania štruktúrne hrubozrnných materiálov,
- merania hliníkových odliatkov a jeho zliatin,
- merania masívnych dielcov (o hmotnosti viac ako cca 5 kg),
- precízneho merania v stupnici tvrdosti SH (Shore).

Prístroj pracujúci na princípe statického merania tvrdosti sa volí v prípadoch:

- merania homogénnych materiálov (napr. ocelí),
- merania malých dielcov (s hmotnosťou menšou ako cca 5 kg),
- merania na ťažko dostupných miestach a malých plochách,
- merania v inom smere ako vertikálnom dole,
- merania zakrivených plôch s malým polomerom krivosti, resp. guľových plôch,
- merania tenkých dielcov, resp. vrstiev,
- priameho precízneho merania pevnosti materiálov,
- precízneho merania s využitím motorických sond, resp. presného merania s pomocou pevného uchytienia v statívoch (napr. merania ojníčnych hriadeľov a pod.).

Záver

Mnohí užívatelia si iste pamätajú na časy, kedy jediným použiteľným spôsobom merania tvrdosti prenosnými prístrojmi v teréne bolo Poldi kladívko. Dnešný trh už ponúka široký výber prístrojov, vhodných na meranie v prevádzke, v ťažko dostupných miestach a navyše s podporou digitálnej techniky a prepojením s výpočtovou technikou. Ide napr. o:

- prístroj firmy GE Inspection Technologies využívajúci úplne nový spôsob elektronického priebežného snímania parametrov, merania a vyhodnocovania tvrdosti **TIV** (**T**hrough **I**ntender **V**iewing – „pohľad cez diamant“) s optickým meraním uhlopriečok vpichu v procese jeho vytvárania, s automatickým vyhodnotením a zobrazením výsledku merania priamo v stupnici HV,
- špičkový moderný prenosný prístroj merajúci metódou **UCI** (**U**ltrasonic **C**ontact **I**mpedance) založenou na princípe závislosti zmeny vlastnej rezonančnej frekvencie skúšobnej sondy od veľkosti plochy otláčku, pričom prístroj môže pracovať vo veľkom meracom rozsahu (cca 20 až 1740 HV).

K dispozícii je aj veľký výber prenosných prístrojov na meranie tvrdosti materiálu dynamickou metódou, ktorá sa využíva hlavne na meranie tvrdosti dielov s vysokou hmotnosťou a materiálov štruktúralne nehomogénnych (odliatky, hutnícke výrobky).