



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

SOUČASNÉ TRENDY V METODÁCH MĚŘENÍ TVRDOSTI

PRESENT TRENDS OF METHODS FOR HARDNESS MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ BRZOBOHATÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. SIMONA POSPÍŠILOVÁ, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Brzobohatý

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Současné trendy v metodách měření tvrdosti

v anglickém jazyce:

Present Trends of Methods for Hardness Measurement

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S rozvojem přístrojové techniky, nových materiálů (nanomateriálů), častějších aplikací nejrozličnějších povrchových vrstev na materiálech se v praxi objevují nové metody a přístupy měření či hodnocení tvrdosti. Tato práce bude vypracována formou literární rešerše českých i zahraničních pramenů, které se zabývají právě současnými trendy v měření tvrdosti, mikrotvrdosti či nanotvrdosti. V práci bude popsána i tzv. universální tvrdost a její výhled do budoucna.

Cíle bakalářské práce:

Cílem této práce je nastudování dané problematiky a vypracování literární rešerše.

Seznam odborné literatury:

- [1] Studijní opora: Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů – dostupné na: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/index.htm>
- [2] Studijní opora: Zkoušení materiálů a výrobků – dostupné na: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/Index.html>
- [3] Veles, P.: Mechanické vlastnosti a zkoušení kovů, SNTL, Praha, 1985, str. 297 – 320
- [4] Boyer, H. E.: 1987. Hardness Testing. ASM, Metals Park, Ohio,
- [5] Pešek, L.: Nová ISO norma na stanovení mechanických vlastností povlaků pomocí instrumentované indentační zkoušky tvrdosti, LMV2005
- [6] ČSN EN ISO 6506 – 1, 2, 3 Zkouška tvrdosti dle Brinella
- [7] ČSN EN ISO 6507 – 1, 2, 3 Zkouška tvrdosti dle Vickerse
- [8] ČSN EN ISO 6508 – 1, 2, 3 Zkouška tvrdosti dle Rockwella
- [9] ASTM A10 38 Ultrazvuková metoda měření tvrdosti

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Simona Pospíšilová, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 19.10.2009

L.S.

prof. RNDr. Jaroslav Cihlář, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Cílem práce je vytvořit přehled současných metod v oblasti měření tvrdosti a podrobněji některé metody popsat. Práce se nejprve zabývá zástupci standardních a léty prověřených metod měření a vyhodnocování tvrdosti, které nachází uplatnění i dnes. Dále jsou zde uvedeny metody, které se objevily v časech nedávných, a zdali budou opravdu životaschopné, ukáže až čas.

Klíčová slova

tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost, univerzální tvrdost, přenosný tvrdoměr

Abstract

Purpose of this thesis is created view of present methods of hardness measurement and to describe them in more detail. Firstly this thesis deals with representatives of standard and for many years used methods of hardness measurement and hardness evaluation which are used today, too. Secondly this thesis is focused on modern methods, and their successful working experience is question of time.

Key words

hardness, microhardness, nanohardness, universal hardness, portable hardness tester

Bibliografická citace

BRZOBOHATÝ, T. *Současné trendy v metodách měření tvrdosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Simona Pospíšilová, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma Současné trendy v metodách měření tvrdosti jsem vypracoval samostatně s použitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

28.5.2010

.....
Tomáš Brzobohatý

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí práce Ing. Simoně Pospíšilové, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení práce.

Obsah

Úvod	6
Cíle práce	7
1. Dělení metod měření tvrdosti	8
2. Standardní metody měření makrotvrdosti	9
2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella (ČSN EN ISO 6506)	9
2.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507)	12
2.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella (ČSN EN ISO 6508)	13
3. Měření mikrotvrdosti a nanotvrdosti	16
3.1. Měření mikrotvrdosti	16
3.1.1 Charakteristika měření mikrotvrdosti	16
3.1.2 Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse	16
3.1.3 Zkouška mikrotvrdosti dle Berkoviče	17
3.1.4 Zkouška mikrotvrdosti dle Knoop	18
3.2 Měření nanotvrdosti	19
4. Univerzální tvrdost	21
5. Přenosné tvrdoměry	22
5.1 Rozdělení přenosných tvrdoměrů	22
5.2 Tvrdoměry využívající dynamickou metodu	22
5.2.1 Poldi kladívko	22
5.2.2 Tvrdoměry využívající dynamicko-plastickou odrazovou metodu	23
5.2.3. Tvrdoměry využívající dynamicko-elastickou odrazovou metodu	25
5.3 Tvrdoměry využívající ultrazvukovou metodu (ASTM A1038)	26
5.4 Tvrdoměry využívající optickou metodu	27
Závěr	29
Seznam použité literatury	30
Seznam použitých zkratk	31
Seznam obrázků a tabulek	32

Úvod

Tvrlost je jednou ze základních charakteristik jakéhokoliv konstrukčního i nekonstrukčního materiálu. Obecně známá definice tvrdosti říká, že tvrdost je schopnost materiálu odolávat vniknutí cizího tělesa do vlastního materiálu.

Měření tvrdosti má ve strojírenském průmyslu (a nejen v něm) po desetiletí až staletí svou nezastupitelnou roli. Prvním odvětvím, kde našly zkoušky tvrdosti uplatnění, byla mineralogie. Tvrší minerál zanechává v měkčím vryp. Na základě tohoto jevu sestavil rakouský mineralog Friedrich Mohs na konci 18. století první stupnici tvrdosti. Jednalo se o tabulku deseti minerálů seřazených podle tvrdosti od nejměkčího mastku až po nejtvrší diamant.

Vývoj měření tvrdosti materiálů zažil velký rozvoj v první polovině 20. století. V tomto období vznikají dodnes hojně používané metody, jako například metody podle Vickerse, Brinella nebo Rockwella. V současnosti vznikají moderní způsoby měření, které vychází právě z metod vzniklých ve zmíněném období.

Tyto moderní metody měření tvrdosti jsou logickou odpovědí na požadavky, které si současný trend vývoje v průmyslových odvětvích žádá. Neustálé zmenšování a současně snaha o ekonomicky výhodnou výrobu běžně užívaných produktů, ať už z oboru elektrotechniky nebo třeba strojírenství, klade vyšší požadavky na kvalitu materiálů, ale zároveň také na rozměry součástí. Neschopnost, dříve standardních metod měření tvrdosti, podávat objektivní výsledky při měření tenkých vrstev materiálu tak dala vzniknout metodám měření mikro a nanotvrdosti. Ekonomické aspekty výroby zase vyžadují co nejflexibilnější způsoby získávání informací a jejich vyhodnocení. Tato potřeba vedla ke vzniku přenosných tvrdoměrů, využívajících nových technologií jako TIV (Through Indenter Viewing-pohled "skrz" diamant), UCI (Ultrasonic Contact Impedance-ultrazvuková kontaktní impedance), které nahrazují těžkopádné stojanové přístroje.

Cíle práce

Téma bakalářské práce je zaměřeno na studium metod měření tvrdosti.

Cílem práce je nejprve se seznámit se současnými standardními a moderními metodami v oblasti měření tvrdosti, mikrotvrdosti a nanotvrdosti. Dále tyto metody nejen prostudovat z dostupné literatury, ale i pomocí norem ČSN EN ISO. Na základě takto získaných znalostí pak vypracovat literární rešerši.

Literární rešerše by měla obsahovat přehled metod měření tvrdosti, užívaných v současné době a vysvětlit principy standardních zkoušek tvrdosti, mikrotvrdosti a nanotvrdosti, univerzální tvrdosti a principy funkce některých typů přenosných tvrdoměrů.

1. Dělení metod měření tvrdosti

Metody měření tvrdosti lze dělit podle více kritérií.

1. Podle principu zkoušky:

- Vtiskové metody*: Normalizovaný geometrický útvar - indentor (např. jehlan, kulička), obvykle z kalené oceli nebo slinutých karbidů, je vtlačován do zkoušeného materiálu. Tvrdost je vyhodnocována podle plochy nebo hloubky vtisku ve zkoušeném materiálu.
- Vrypové metody*: Vychází z principu Mohsovy zkoušky tvrdosti minerálů. Prakticky nejsou příliš využívány z důvodu velké nepřesnosti. Vyhodnocuje se šířka vrypu, který zanechá zkušební diamantové těleso na vyleštěném zkoušeném materiálu. Na principu vrypových zkoušek se dnes testují jiné parametry materiálu než tvrdost, např. testy adhezivně-kohezivního chování-Scratch test, apod.
- Odrazové metody*: Při odrazových metodách je standardně vyhodnocována výška nebo úhel odrazu normalizovaných zkušebních těles od zkoušeného povrchu. Užívají se ke zkoušení velmi tvrdých materiálů nebo plastů a pryží.
- Kyvadlové metody*: Nejsou příliš využívány. Kyvadlo s kuličkou na konci naráží do zkoušeného materiálu, kde zvětšuje předem vytvořený vtisk. Měří se úbytek kinetické energie kyvadla.

2. Podle využívaného typu deformace:

- Metody využívající plastickou deformaci (destruktivní)*: Po provedení zkoušky zůstává na zkoušeném materiálu trvalý vtisk. Tyto zkoušky proto nejsou příliš vhodné ke zkoušení hotových výrobků.
- Metody využívající elastickou deformaci (nedestruktivní)*: Při provádění těchto metod se u zkoušeného materiálu uplatňuje pouze elastická složka deformace, takže po ukončení zkoušky není materiál poškozen. Tyto metody lze proto používat i ke zkoušení hotových výrobků.

3. Podle rychlosti působení zatěžující síly:

- Statické metody*: Jedná se o velmi přesné metody. Síla působí na zkušební těleso s malou rychlostí. Mohou využívat plastické nebo elastické deformace.
- Dynamické metody*: Nejsou tak přesné jako statické metody. Síla působí na zkušební těleso relativně vysokou rychlostí. Stejně jako metody statické využívají plastické nebo elastické deformace zkoušeného materiálu.

4. Podle velikosti zátěžné síly:

- makrotvrdost*: Většinou se měří tvrdost většího objemu materiálu. Zachytí se tím celková průměrná tvrdost několika strukturních složek materiálu současně. Síly využívané při měření jsou vyšší než 2 N (zkouška tvrdosti při nízkém zatížení) nebo nad 30 N (standardní zkouška tvrdosti).
- mikro a nanotvrdost*: Dá se měřit tvrdost pouze určité strukturní složky, povlaků, tenkých vrstev a tenkých materiálů apod. Síly působící na zkušební tělesa dosahují hodnot nižších než 2N.

2. Standardní metody měření makrotvrdosti

2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella (ČSN EN ISO 6506)

Tuto zkoušku tvrdosti vynalezl v roce 1900 Švédský metalurg Johan August Brinell. Jedná se o zkoušku vtiskovou, která využívá plastické deformace zkoušeného materiálu za působení statické síly.

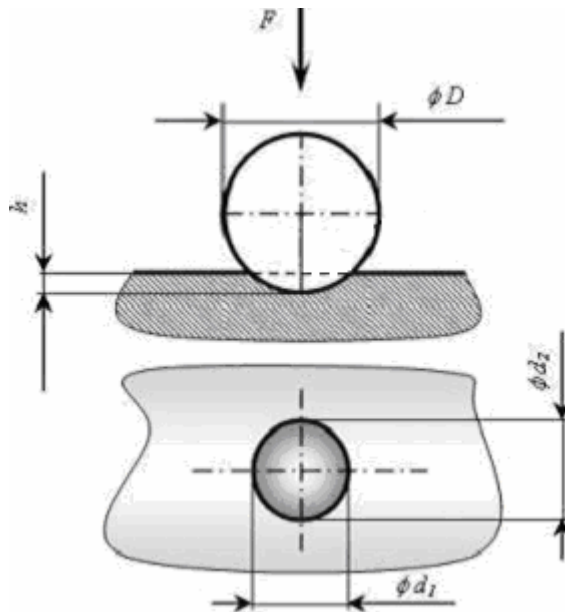
Princip zkoušky je takový, že leštěná kulička ze slinutých karbidů je vtlačována do zkoušeného materiálu (obr.1 [1]). Metoda s užitím kuličky ze slinutých karbidů je označována HBW. Dříve se též užívala kulička z kalené oceli (HBS), tu už dnes norma [2] nepřipouští. Průměr kuličky je dán tloušťkou materiálu. Zkoušený materiál by měl být alespoň 10x tlustší než je průměr kuličky. Povrch zkoušeného materiálu určený k provedení zkoušky musí být hladký rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a mazadel. Na protilehlé straně zkoušeného materiálu nesmí být po provedení zkoušky patrná deformace. Povolená rozmístění bodů na vzorku pro provedení zkoušky udává norma [2]. Obvykle používané průměry kuliček jsou: 1 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm. Závislost velikosti kuličky a zatížení je obvykle volena podle tabulky 1 [2]. Zkušební zatížení se pohybují v rozmezí $9,807 \div 29,42 \cdot 10^3$ N. Doba pro dosažení zkušebního zatížení se pohybuje od 2 do 8 sekund. Zkušebním zatížením je působeno 10 až 15 sekund, v případě jiné doby působení zkušebního zatížení se tato doba v sekundách zapisuje na konec značení tvrdosti za lomítko. Značení tvrdosti pro daná zkušební zatížení a průměry kuliček jsou uvedena v tabulce 2 [2].

Tab. 1 Závislost velikosti použité kuličky a zkušebního zatížení

Materiál	Předpokládaná tvrdost HBW	Poměr zatížení k průměru kuličky $0,102F/D^2$
Ocel	do 650	30
Litina Nutno užít kuličky s průměrem: 2,5mm, 5mm, 10mm	<140	10
	≥140	30
Měď a její slitiny	<35	5
	35 až 200	10
	>200	300
Lehké kovy a jejich slitiny	<35	2,5 nebo 5
	35 až 80	10 nebo 15
	>80	10 nebo 15
Olovo, Cín		1

Tab. 2 Značení tvrdosti pro dané podmínky měření tvrdosti podle Brinella

Značka tvrdosti	Průměr kuličky D [mm]	Poměr zatížení k průměru kuličky $0,102.F/D^2$ [N/mm ²]	Nominální hodnota zkušebního zatížení F[N]
HBW 10/3 000	10	30	29420
HBW 10/1 500	10	15	14710
HBW 10/1 000	10	10	9807
HBW 10/500	10	5	4903
HBW 10/250	10	2,5	2452
HBW 10/100	10	1	980,7
HBW 5/750	5	30	7355
HBW 5/250	5	10	2452
HBW 5/125	5	5	1226
HBW 5/62,5	5	2,5	612,9
HBW 5/25	5	1	245,2
HBW 2,5/187,5	2,5	30	1839
HBW 2,5/62,5	2,5	10	612,9
HBW 2,5/31,25	2,5	5	306,5
HBW 2,5/15,625	2,5	2,5	153,2
HBW 2,5/6,25	2,5	1	61,29
HBW 1/30	1	30	294,2
HBW 1/10	1	10	98,07
HBW 1/5	1	5	49,03
HBW 1/2,5	1	2,5	24,52
HBW 1/1	1	1	9,807



Obr. 1 Princip zkoušky podle Brinella [1]

Výsledná tvrdost materiálu se určí dle vztahu 1 [2]. Tvrdost se zapisuje jako HBW.

$$HBW = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

kde: HBW...tvrdost dle Brinella

F...zkušební zatížení [N]

D...průměr vtlačované kuličky [mm]

d... aritmetický průměr vtisku z průměrů d_1 a d_2 [mm]

Z hlediska automatizace procesu měření je výhodnější vyhodnocovat tvrdost z hloubky vtisku. Hodnota takto získané tvrdosti se označuje HBT a získá se ze vztahu 2 [3].

$$HBT = \frac{0,102F}{\pi D h} + k_1 + k_2 \quad (2)$$

kde: HBT...tvrdost dle Brinella

F...zkušební zatížení [N]

D...průměr vtlačované kuličky [mm]

h...hloubka vtisku [mm]

k_1 ...korekční konstanta tvrdoměru

k_2 ...korekční konstanta materiálu

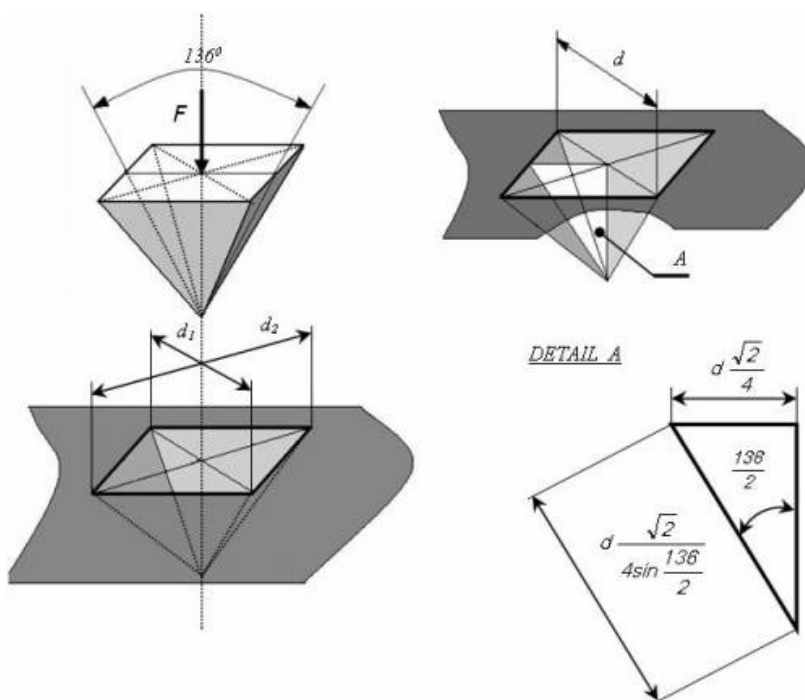
Pro Brinellovu metodu je typické, že plocha vtisku je relativně velká, díky čemuž lze výhodně zkoušet materiály s heterogenní strukturou. Tato zkouška je převážně vhodná ke zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů.

2.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507)

Vickersova zkouška tvrdosti je stejně jako Brinellova zkouškou vtiskovou, při které dochází k plastické deformaci zkoušeného materiálu se staticky působící silou na zkušební těleso.

Jako autoři metody jsou označováni R.L. Smith a G.E. Sandland, kteří metodu vyvinuli v roce 1922. Název metoda získala podle firmy Vickers, ve které byl zkonstruován první tvrdoměr pro tuto metodu.

Principiálně je zkouška podobná zkoušce Brinellově. Jako indentor se namísto kuličky používá pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem $136^\circ \pm 0,5^\circ$ vyrobený z diamantu. Postup zkoušky a geometrie indentoru je k vidění na obrázku 2 [1]. Zkušební silou je působeno 10 až 15 sekund. Tohoto zatížení je nutné dosáhnout v průběhu 2 až 8 sekund, při nízkém zatížení až 10 sekund. Pro úpravu povrchu platí stejná pravidla jako u zkoušky podle Brinella. Po provedení zkoušky, taktéž jako u Brinellovy zkoušky, nesmí být známky deformace na protilehlé straně. Podmínky pro rozmístění vpichů na vzorku udává norma [4].



Obr. 2 Princip zkoušky podle Vickerse [1]

Při zkoušce se užívají zatížení z tabulky 3 [4]. Číslo za označením HV, ve sloupci symbol, udává zatížení v kilogramech. V případě že je zatížením působeno jinou dobu, než je výše zmíněno, zapisuje se tento čas v sekundách za lomítko za symbol tvrdosti a zatížení. Podle použitého zatížení se Vickersova zkouška tvrdosti dělí na [4]:

- Zkoušku tvrdosti podle Vickerse
- Zkoušku tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení
- Zkoušku mikrotvrdosti podle Vickerse (bude blíže popsána v kapitole 3.1.2)

Tab. 3 Značení tvrdosti a normovaná zatížení pro zkoušku tvrdosti a zkoušku tvrdosti při malém zatížení podle Vickerse

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při malém zatížení	
Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F[N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F[N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903
HV 30	294,2	HV 1	9,807
HV 50	490,3	HV 2	19,61
HV 100	980,7	HV 3	29,42
Lze použít zatížení vyšší než 980,7N			

Výsledná tvrdost označovaná jako HV se zjišťuje z poměru zatěžující síly vůči ploše povrchu vtisku po odlehčení, viz vztah 3 [4].

$$HV = 0,102 \frac{2F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

kde: HV...tvrdost dle Vickerse

F...zkušební zatížení [N]

d...aritmetický průměr úhlopříček d_1 a d_2 [mm]

Vickersovou metodou měření tvrdosti lze měřit materiály tvrdé i měkké. Výhodou je, že vtisk do materiálu je poměrně malý, takže je možné v některých případech testovat i hotové produkty. Zkouška není vhodná ke zkoušení materiálů s hrubozrnnou a nehomogenní strukturou.

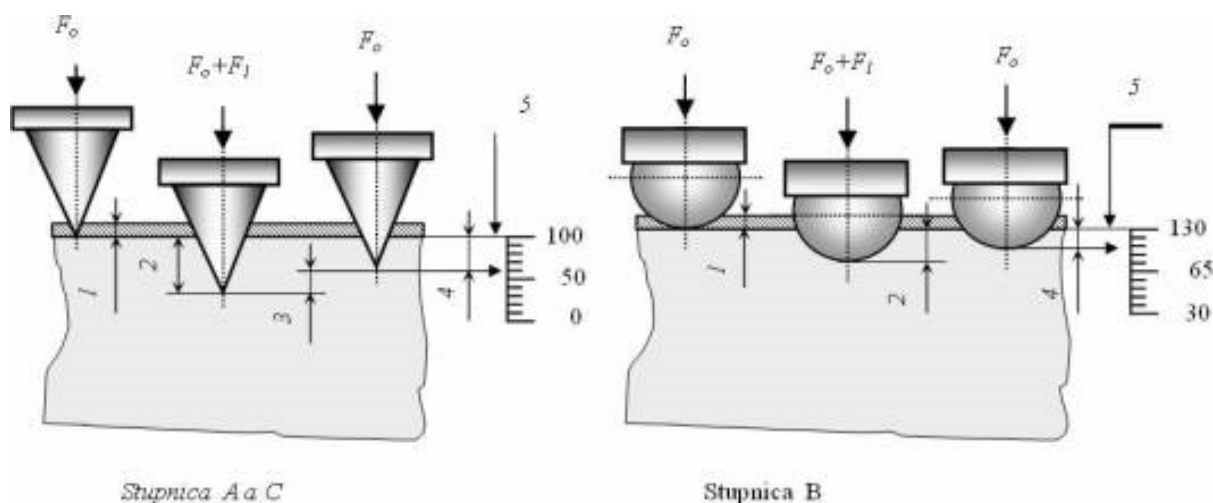
2.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella (ČSN EN ISO 6508)

Rockwellova zkouška je zkouškou vtiskovou, využívající plastické deformace za působení statické síly.

Stejně jako obě výše uvedené metody, i Rockwellova zkouška tvrdosti datuje svůj vznik do první poloviny 20. století. Patent byl udělen Hugh M. a Stanley P. Rockwellovým roku 1919.

Základní princip vtlačování indentoru do zkoušeného materiálu je obdobný jako u výše uváděných metod. Schématicky je vyobrazen na obr. 3 [1]. Avšak stejně jako modifikace Brinelovy metody HBT, je i u metody Rockwellovy tvrdost vyhodnocována z hloubky vtisku

v měřeném materiálu. Tato metoda navíc využívá narozdíl od metod Brinell a Vickers předběžného zatížení F_0 . Pod tímto zatížením působí indentor na materiál (po dobu maximálně 3 sekund) a vytváří vtisk o hloubce **1**, teprve poté je zatížení zvýšeno o přídatné zatížení F_1 , které prohloubí vtisk o hloubku **2**, na celkové zkušební zatížení F (doba náběhu zatížení z F_0 na F je v rozmezí 1 až 8 sekund). Následuje 4 ± 2 s výdrž na zkušebním zatížení a poté následuje pokles zátěžné síly z hodnoty F na F_0 za snížení hloubky o **3**. Tvrdost je vyhodnocována po odlehčení z hloubky vtisku **4** (normou [5] též označované h).



Obr. 3 Princip zkoušky tvrdosti podle Rockwella [1]

Požadavky na úpravu povrchu jsou obdobné jako u výše uvedených metod. Taktéž požadavky na rozmístění bodů na zkoušeném tělese pro provedení zkoušky udává norma [5].

Narozdíl od výše zmíněných metod povoluje Rockwellova zkouška 2 geometrické tvary indentorů. Prvním je kulička, vyráběna z oceli nebo tvrdokovu, o možných průměrech 1,5875 mm nebo 3,175 (rozměry byly původně v palcích: 1/16“ nebo 1/8“). Druhým možným vnikajícím tělesem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°. Vzhledem k existenci více možných indentorů a různých velikostí zátěžných sil existuje několik možných způsobů značení tvrdosti (tab. 4 [5]). Taktéž pro různé způsoby měření existuje více možných vztahů pro konečné vyhodnocení tvrdosti (4,5,6) [5].

$$HRA, HRC, HRD = 0,100 - \frac{h}{0,002} \quad (4)$$

$$HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK = 0,130 - \frac{h}{0,002} \quad (5)$$

$$HRN, HRT = 0,100 - \frac{h}{0,001} \quad (6)$$

kde: HRx...tvrdost dle Rockwella

h...hloubka vtisku po odlehčení (hloubka **4**) na F_0 [mm]

Tab. 4 Stupnice tvrdosti a jim odpovídající zatížení, indentory a rozsah použití

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Indentor (průměr [mm])	F_0 [N]	F_1 [N]	F [N]	Rozsah měření
A	HRA	diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 – 88 HRA
B	HRB	kulička (1,5875)	98,07	882,6	980,7	20 – 100 HRB
C	HRC	diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 – 70 HRC
D	HRD	diamantový kužel	98,07	882,6	980,7	40 – 77 HRD
E	HRE	kulička (3,175)	98,07	882,6	980,7	70 – 100 HRE
F	HRF	kulička (1,5875)	98,07	490,3	588,4	60 – 100 HRF
G	HRG	kulička (1,5875)	98,07	1373	1471	30 – 94 HRG
H	HRH	kulička (3,175)	98,07	490,3	588,4	80 – 100 HRH
K	HRK	kulička (3,175)	98,07	1373	1471	40 – 100 HRK
15 N	HR15N	diamantový kužel	29,42	117,7	147,1	70 – 94 HR15N
30 N	HR30N	diamantový kužel	29,42	264,8	294,2	42 – 86 HR30N
45 N	HR45N	diamantový kužel	29,42	441,3	441,3	20 – 77 HR45N
15 T	HR15T	kulička (1,5875)	29,42	117,7	147,1	67 – 93 HR15T
30 T	HR30T	kulička (1,5875)	29,42	264,8	294,2	29 – 82 HR30T
45 T	HR45T	kulička (1,5875)	29,42	411,9	441,3	1 – 72 HR45T
U stupnic užívajících jako indentor kuličku, se značka tvrdosti doplní o „S“ při použití ocelové kuličky nebo o „W“ při použití kuličky z tvrdokovu.						

Metoda měření tvrdosti podle Rockwella má široké uplatnění při měření kovových i nekovových materiálů. Její největší výhodou oproti metodám Vickers a Brinell je především v její rychlosti, protože není potřeba měřit parametry vtisku. Přístroje určené k měření tvrdosti dle Rockwella udávají přímo hodnotu tvrdosti, je proto možné tuto metodu relativně snadno zautomatizovat.

3. Měření mikrotvrlosti a nanotvrlosti

3.1. Měření mikrotvrlosti

3.1.1 Charakteristika měření mikrotvrlosti

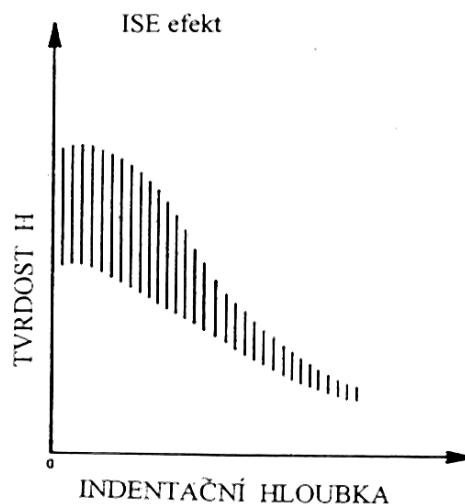
Principy zkoušek mikrotvrlosti se příliš neliší od měření makrotvrlosti, ale užívá se nižších hodnot zatížení. Jako hranice mezi měřením makro a mikrotvrlosti je dle [4] považována hodnota 2N. Mikrotvrlost je měřena převážně na metalografických výbrusech a to především z důvodů vysokých nároků kladených na úpravu povrchu. Povrch vzorku není obvykle vhodné upravovat mechanickým leštěním, které způsobuje deformační zpevnění povrchové vrstvičky kovu. K úpravě povrchu je proto vhodné užít elektrolytické a chemické leštění. Měření mikrotvrlosti lze užít například pro zjišťování tvrdosti povrchových vrstev. Běžnými způsoby měření makrotvrlosti totiž nelze měřit tvrdost (povrchových vrstev apod.) tak, aby výsledek zkoušky nebyl ovlivněn tvrdostí základního materiálu. Oblast užití, ale také zahrnuje například: měření malých nebo tenkých součástí, měření tvrdosti strukturních složek fází, hodnocení svarových spojů, aj.

3.1.2 Zkouška mikrotvrlosti dle Vickerse

Podstata zkoušky, stejně jako indentor, jsou shodné jako u Vickersovy zkoušky makrotvrlosti (obr. 2 [1]). Zatížení užívaná při této zkoušce, a k nim adekvátní symboly tvrdosti, uvádí tabulka 5 [3]. Na rozdíl od Vickersovy zkoušky makrotvrlosti je hodnota mikrotvrlosti ovlivněna velikostí zátěžné síly, tedy i hloubkou vtisku, tzv. ISE (Indentation Size Effect-vliv velikosti vtisku) efekt (obr. 4 [6]). Ten je způsoben tím, že při užívání malých zátěžných sil je velikost vpichu výrazně ovlivněna elastickou deformací. Při odlehčení indentoru se vlivem elastické deformace vpich zmenší. Při zkouškách makrotvrlosti jsou vpichy relativně velké a zmenšení je vůči velikosti vpichu zanedbatelné. Naopak při zkouškách s užitím malých zatížení vznikají malé vpichy, u kterých je velikost zmenšení v porovnání s velikostí vpichu relativně velká. V porovnání hodnot získaných při měření makrotvrlosti a mikrotvrlosti pak pro stejný vzorek platí, že hodnoty získané měřením mikrotvrlosti budou vyšší než hodnoty získané měřením makrotvrlosti.

Tab. 5 Zkušební zatížení a symboly tvrdosti pro zkoušku mikrotvrlosti dle Vickerse

Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F[N]
HV 0,01	0,09807
HV 0,015	0,1471
HV 0,02	0,1961
HV 0,025	0,2425
HV 0,05	0,4903
HV 0,1	0,9807



Obr. 4 ISE efekt [6]

Pro určení výsledné mikrotvrlosti je využíváno vztahu 7[7].

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (7)$$

kde: HV...mikrotvrdot podle Vickerse

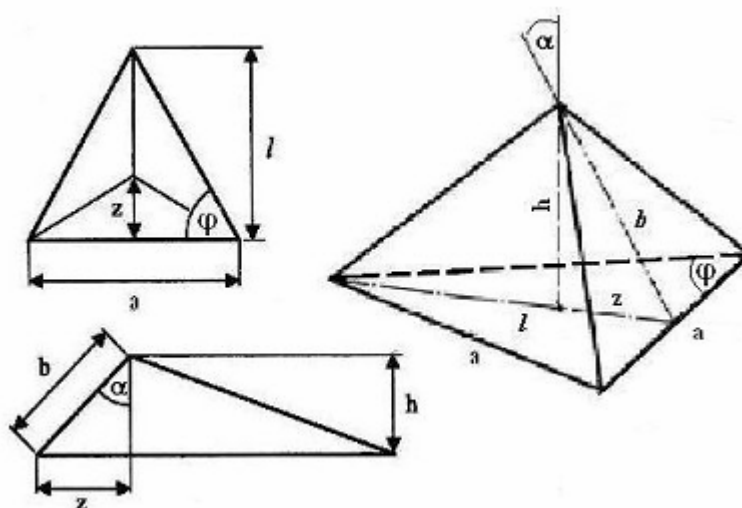
F...zkušební zatížení [N]

d... průměrná úhlopříčka vtisku [mm]

Měření Vickersovou metodou je vhodné k měření menších pravidelných ploch. Oproti metodě pro měření makrotvrlosti vyžaduje metoda měření mikrotvrlosti pro zjištění hodnot přesnější a nákladnější vybavení.

3.1.3 Zkouška mikrotvrlosti dle Berkoviche

Podstata a průběh této zkoušky je totožný s Vickersovou zkouškou. Rozdíl je však ve vnikacím tělese. Výroba pravidelného čtyřbokého jehlanu pro Vickersovu zkoušku je poměrně náročná, především v dodržení sbíhavosti hran. Indentor pro Berkovichovu zkoušku představují nepravidelný trojboký jehlan z diamantu (obr.5 [8]).



Obr. 5 Berkovichův indentor [8]

Původní Berkovichův indentor měl úhel mezi výškou l a bočními stěnami $65,03^\circ$. Dnes se též užívá modifikovaného Berkovichova indentoru kde má tento úhel hodnotu $65,27^\circ$. Hodnota tvrdosti je určena vztahem 8 [8].

$$H_{CH} = 1570 \cdot \frac{W}{l^2} \quad (8)$$

kde: H_{CH} ...mikrotvrdomosti podle Berkoviche

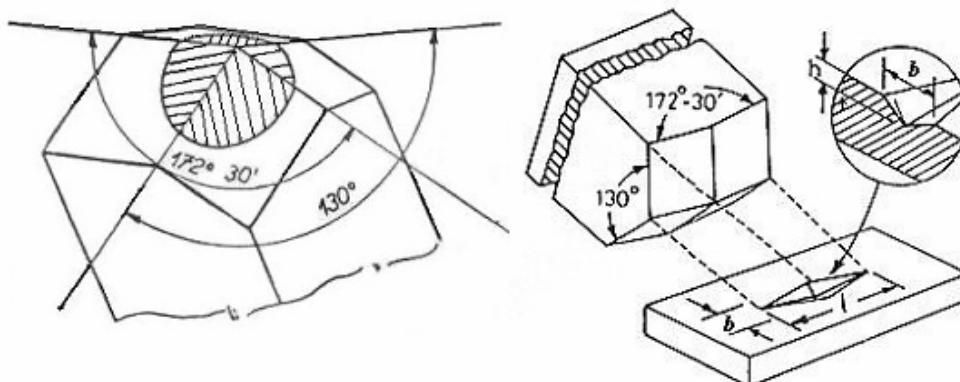
Wzkušební zatížení [N]

lvýška trojúhelníku změřená na vtisku [mm]

Berkovichův indentor je užíván na zkoušky velmi malých objektů.

3.1.4 Zkouška mikrotvrdomosti dle Knoop

Princip zkoušky je stejný jako u Vickersovy a Berkovichovy metody. Opět je rozdíl pouze v indentoru (obr. 6 [8]), který byl vyvinut roku 1939 jako alternativa k Vickersovu diamantu.



Obr. 6 Knoopův indentor [8]

Hodnota tvrdosti je určena podle vztahu 9 [9].

$$HK = 0,102 \cdot \frac{F}{c \cdot l^2} \quad (9)$$

kde: HK...mikrotrvdost dle Knoopu

F...zkušební zatížení [N]

c....geometrická konstanta indentoru, pro geometricky ideální indentor

c = 0,07028

l....velikost delší úhlopříčky vtisku [mm]

Považujeme-li indentor za geometricky ideální, vztah 9 [9] se zjednoduší na vztah 10 [10].

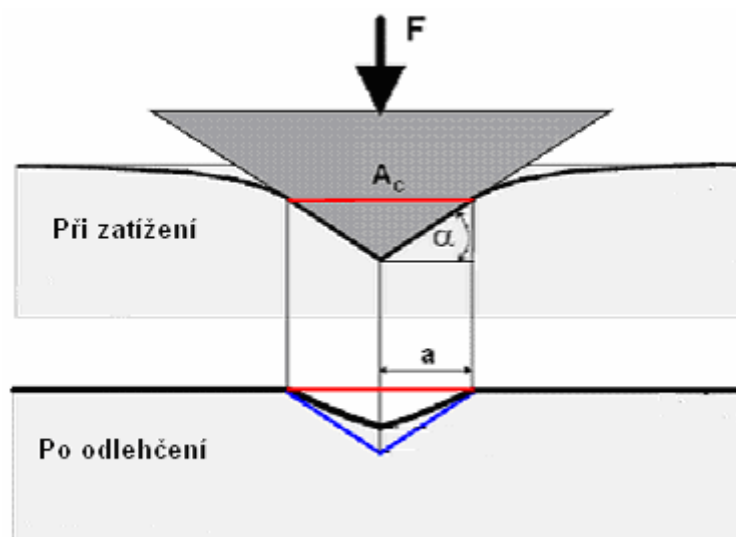
$$HK = 1,451 \cdot \frac{F}{l^2} \quad (10)$$

Knoopova zkouška mikrotrvdosti byla vyvinuta speciálně pro měření tenkých plechů a křehkých materiálů. Užívá se též k měření tvrdosti drátků a v mineralogii.

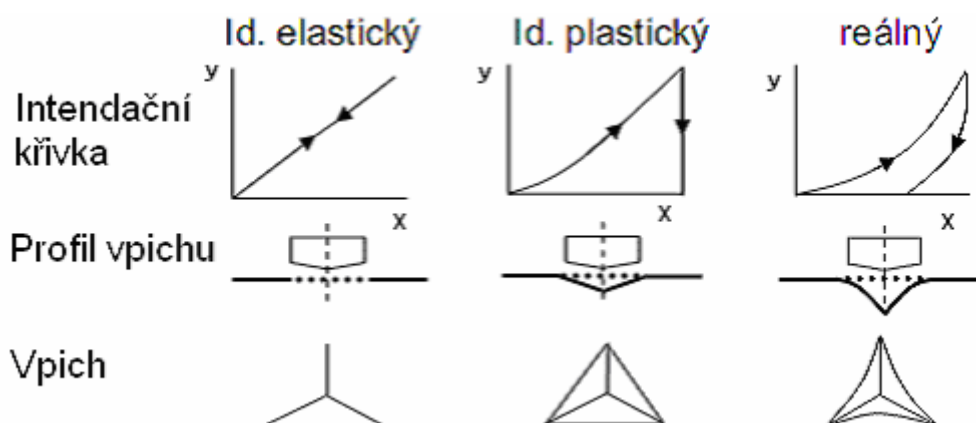
3.2 Měření nanotvrdosti

Při měření nanotvrdoti se užívá stejných postupů jako při měření mikrotrvdosti. Zatížení se však pohybují v ještě nižších hodnotách, a to až 1nN. Hloubky vtisků se pak mohou dostat až k hodnotě 0,1 nm. Jako nanoindentor je nejčastěji používán Berkovichův jehlan, který se dá relativně snadno vybrousit do bodové špičky. Při zkoušce prováděné Berkovichovým diamantem dochází u vzorku současně k plastické i elastické deformaci. Z hlediska vyhodnocování výsledků je výhodnější, aby k plastické a elastické deformaci docházelo postupně. Toho lze dosáhnout použitím nanoindentoru ve tvaru kuličky, při jehož aplikaci dochází nejprve k elastické a potom k plastické deformaci. Problém však je, že nanoindentory jsou vyráběny z diamantu a vyrobit kuličku z tohoto materiálu je velmi obtížné, což je důvod globálního preferování Berkovichova jehlanu. Jeho výroba je nepoměrně jednodušší.

Jak bylo zmíněno, v průběhu zkoušky dochází po zatížení u zkoušeného materiálu k plastické i elastické deformaci. Po odlehčení zůstává v materiálu vlivem plastické deformace vtisk (obr. 7 [11]).



Obr. 7 Profil vtisku při a po zatížení [11]



Obr. 8 Závislost nanoindentčních křivek a vpichu na charakteru materiálu [11]

Výsledkem zkoušky jsou tzv. intendační křivky, které udávají závislost velikosti síly (osa y) a hloubky vtisku (osa x) viz obr. 8 [11]. Jak je z obrázku 8 [11] patrné, vpich do ideálně elastického materiálu po odlehčení v podstatě zaniká, v případě ideálně plastického materiálu naopak zůstává stejný jako při zatížení. Intendační křivka reálného materiálu zahrnuje vliv elastické i plastické deformace. Pod zatížením vzniká vtisk, který se po odlehčení zmenší o přetvoření vzniklé vlivem elastické deformace, zatímco přetvoření vzniklé mechanismem plastické deformace zůstává. To je možné vidět také na obrázku 7 [11], kde vtisk naznačený modře zahrnuje obě složky deformace (při zatěžování) a vtisk naznačený černě je už výsledný vtisk zmenšený o přetvoření vlivem elastické deformace (po odlehčení).

Měření nanotvrdosti se v současné době užívá ke zjišťování tvrdosti tenkých povrchových vrstev, hodnocení povrchových úprav výrobků a měření tvrdosti fází materiálu. Taktéž je možné jej využít k zjišťování mechanických vlastností materiálu (elasticko-plastické, lomové nebo únavové).

4. Univerzální tvrdost

Na konci 20. století vznikla jako reakce na mnoho různých metod k měření tvrdosti tzv. **univerzální tvrdost**. Ta se měla rychle rozšířit a nahradit běžné metody a zavést jednotné značení tvrdosti. Zatím tomu tak není.

Zkouška se nikterak neliší od běžných způsobů měření tvrdosti. Vnikající těleso je vtlačováno do povrchu zkoušeného materiálu. Indentor je pravidelný čtyřboký jehlan s úhlem 136° mezi protilehlými stranami.

„Univerzální tvrdost je definována jako podíl zkušební síly F a plochy $A(h)$ vtisku vypočítané z hloubky vtisku pod zatížením“ [3, str. 14].

Měření probíhají v rozmezí 2N až 1000N v oblasti makrotvrdosti a pod hodnotu 2N až hloubku vtisku 0,0002mm v oblasti mikrotvrdosti.

Hodnota tvrdosti se určí dle vztahu 11 [3].

$$HU = \frac{F}{26,43 \cdot h^2} \quad (11)$$

kde: HU....hodnota univerzální tvrdosti

F...zkušební zatížení [N]

h...hloubka vtisku [mm]

Při značení se za značkou HU uvádí hodnota zkušební síly, po případě se za lomítko uvádí další podmínky měření, jsou-li odlišné od normy. Samotná hodnota tvrdosti se zapisuje za rovnítko, které následuje po uvedení údajů o podmínkách měření a zatížení.

Metodou univerzální tvrdosti lze taktéž zjistit některé elasticko-plastické vlastnosti materiálu.

5. Přenosné tvrdoměry

5.1 Rozdělení přenosných tvrdoměrů

Z důvodu větší flexibility měření je v současné době lepší využít přenosných tvrdoměrů. Na rozdíl od laboratorních zařízení mají kompaktní rozměry a lze jimi proto vybavit pracovníky přímo ve výrobě. Přenosné tvrdoměry uvedené v této práci lze rozdělit na:

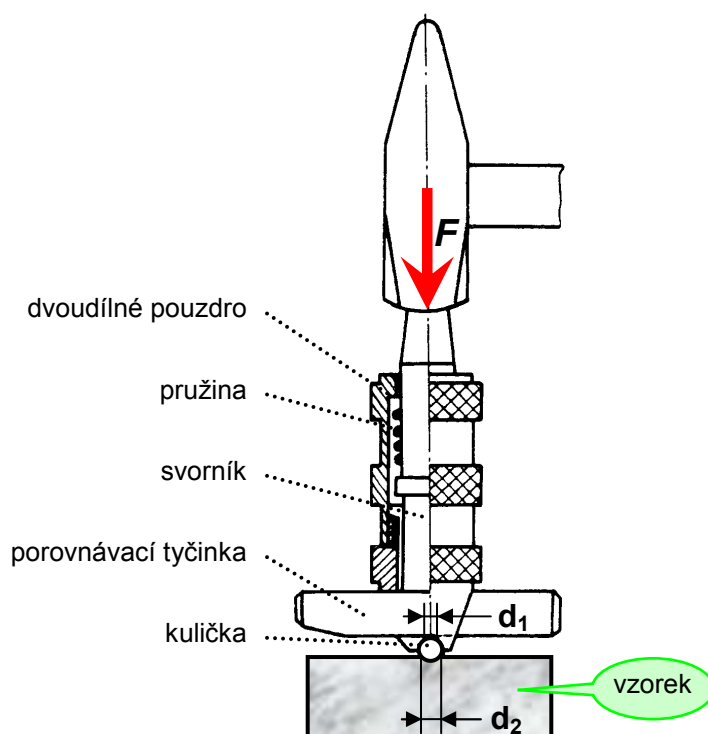
- a) tvrdoměry využívající dynamickou metodu
- b) tvrdoměry využívající ultrazvukovou metodu (UCI)
- c) tvrdoměry využívající optickou metodu (TIV)

5.2 Tvrdoměry využívající dynamickou metodu

5.2.1 Poldi kladívko

Poldi kladívko je možné považovat za průkopníka v oblasti přenosných tvrdoměrů. Jeho název je odvozen od hutních závodů Poldi Kladno, kde bylo vyvinuto.

Poldi kladívko využívá dynamickou metodu s využitím plastické deformace materiálu. Přístroj funguje na jednoduchém principu (obr. 9 [7]). Do samotného těla kladívka je vsunut kovový etalon. Ten se nachází nad indentorem, kterým je Brinellova kulička o průměru 10mm. Kladívko s etalonem se přiloží na povrch zkoušeného materiálu a do kladívka se shora udeří kladivem. V etalonu zůstává vtisk o průměru d_1 a ve zkoušeném materiálu vtisk o průměru d_2 .



Obr. 9 Schéma zkoušky Poldi kladívkem [7]

Tvrdotost zkoušeného materiálu se odečítá z tabulek na základě velikostí průměrů d_1 a d_2 a je značena HB POLDI. Tvrdotost udávaná v tabulkách platí pro etalon s mezí pevnosti

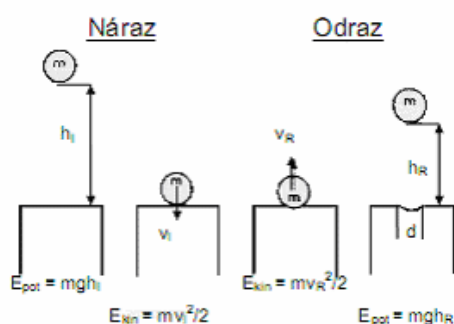
$R_m = 686,5 \text{ MPa}$ [7]. Je-li na etalonu uvedena jiná pevnost koriguje se tvrdost uvedená v tabulkách koeficientem k . Pro ten platí vztah 12 [7].

$$k = \frac{R_m}{686,5} \quad (12)$$

Velkou výhodou tohoto tvrdoměru je skutečnost, že při jeho použití se nepoužívá žádného normalizovaného zatížení a práce s ním je velmi jednoduchá, stejně jako konstrukce samotného zařízení. Údaje o tvrdosti materiálu získané pomocí Poldi kladívka nejsou příliš přesné, takže Poldi kladívko je vhodné spíše pro porovnávací zkoušky.

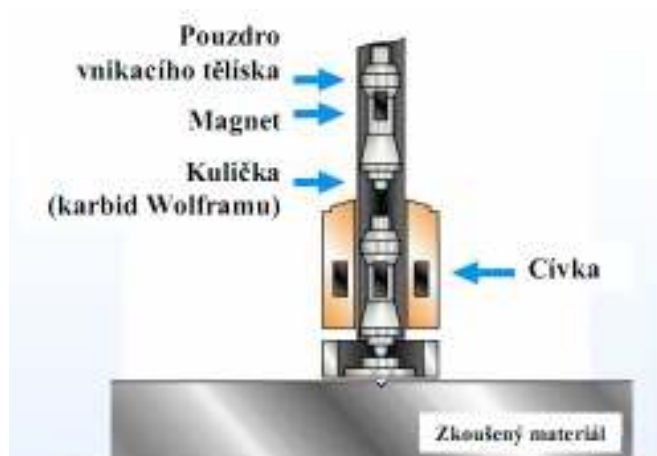
5.2.2 Tvrdoměry využívající dynamicko-plastickou odrazovou metodu

Tvrdoměry užívající dynamickou odrazovou metodu fungují na základě energetické bilance vnikajícího tělesa obr. 10 [12]. Vystřelené těleso vytváří po nárazu na zkoušeném materiálu plastickou deformaci, čímž ztrácí část své energie. U měkčích materiálů vlivem větších plastických deformací po nárazu tělesa, dochází u tělesa k větší ztrátě energie než u materiálů tvrdších.



Obr. 10 Základní princip dynamické zkoušky tvrdosti (d =průměr vpichu, E_{pot} =potenciální energie, E_{kin} =kinetická energie) [12]

Indentorem je kulička ze slinutých karbidů, popřípadě z diamantu. Kulička je vystřelena pružinou. Pro určení tvrdosti je nutné znát rychlosti před a po dopadu. Rychlosti se zjišťují pomocí magnetické indukce, kdy v kuličce je zabudován permanentní magnet a v sondě přístroje cívka (viz obr. 11 [12]). Rychlost je pak zjišťována z velikosti indukovaného napětí.



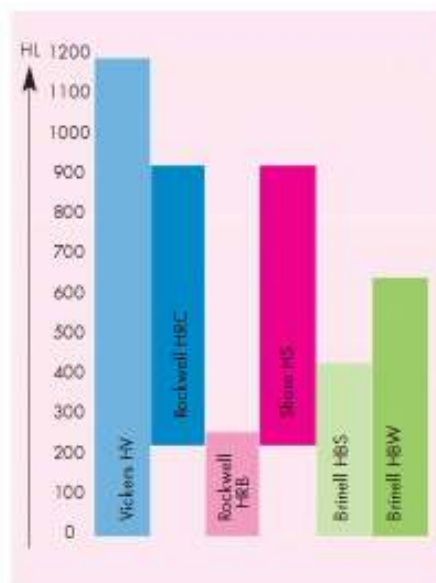
Obr. 11 Řez sondou dynamicko-plastického odrazového tvrdoměru [12]

Získaná hodnota tvrdosti, je tzv. tvrdost dle Leeba a je definována vztahem 13 [12].

$$HL = \frac{v_R}{v_1} \cdot 1000 \quad (13)$$

kde: HL...tvrdost dle Leeba
 v_R ... rychlost po dopadu
 v_1 ...rychlost před dopadem

Výhodou Leebovy tvrdosti je, že zahrnuje celé spektrum tvrdostí (obr. 12 [13]), takže přístroje mohou převádět tvrdost z Leebovy tvrdosti na hodnoty běžně užívaných tvrdostí (HV, HB, HRC, atd.). Přesnost přístrojů se pohybuje v rozmezí $\pm 1 \%$ až $\pm 15 \%$.



Obr. 12 Spektrum tvrdostí [13]

Tvrdoměry využívající dynamickou odrazovou metodu jsou vhodnější spíše pro měření měkkých materiálů jako jsou hliník nebo měď, ale také k měření šedé nebo tvárné

litiny. Tyto tvrdoměry jsou vyráběny jsou například firmami Innovatest (obr. 13 [13]) nebo Krautkramer (obr. 15[12]).



Obr. 13 Přenosný tvrdoměr Innovatest TH-170 [13]



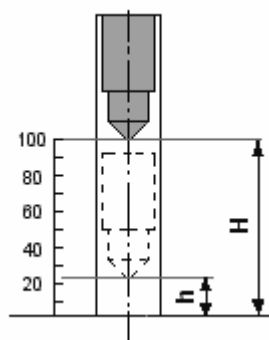
Obr. 14 Přenosný tvrdoměr Krautkramer Dynapocket [12]

5.2.3. Tvrdoměry využívající dynamicko-elastickou odrazovou metodu

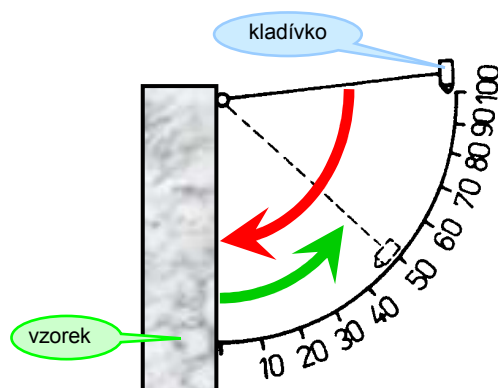
Rozdíl mezi dynamicko-plastickou a dynamicko-elastickou odrazovou metodou spočívá pouze ve způsobu odebrání energie dopadajícímu tělesu. Zatímco u dynamicko-plastické metody dochází po dopadnutí tělesa k elasticko-plastické deformaci zkoušeného materiálu, u dynamicko-elastické metody dojde sice k plastické deformaci taktéž, ale je tak malá, že v porovnání s elastickou ji můžeme zanedbat. Energii tělesu, tak v podstatě odebírá pouze mechanismus elastické deformace.

Nejznámějšími tvrdoměry pracujícími na principu dynamicko-elastické odrazové metody jsou **Shoreho skleroskop** (pro horizontální měření) a **Duroskop** pro vertikální měření.

Při měření se skleroskopem (obr. 15 [14]) se zjišťuje výška **h**, kam se odrazí těleso po dopadu na zkoušený materiál. U duroskopu (obr. 16 [7]) se zase měří úhel kmitu kladívka po odrazu. Původní hodnoty výšky a úhlu jsou označeny hodnotou 100 **Shs**, což je označení tvrdosti dle Shoreho.



Obr. 15 Princip funkce skleroskopu [14]



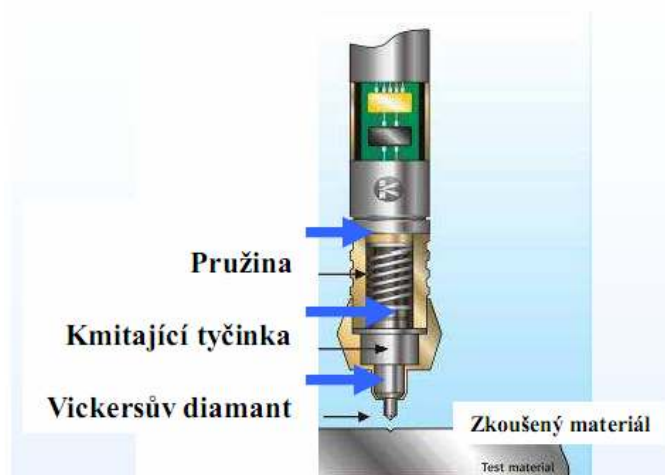
Obr. 16 Princip funkce duroskopu [7]

Nárazové těleso je obvykle zakončeno kulovou plochou, pro skleroskop norma udávána hmotnost tělesa 2,5g.

Výsledky zkoušek provedených skleroskopem a duroskopem jsou značně nepřesné.

5.3 Tvrdoměry využívající ultrazvukovou metodu (ASTM A1038)

Ultrazvuková metoda měření tvrdosti (UCI) je moderní způsob měření tvrdosti. Funkce tvrdoměru (obr. 17 [12]) je založena na indentoru (vickersův diamant), který kmitá určitou frekvencí (přibližně 70kHz). Při kontaktu mezi indentorem a zkoušeným materiálem se frekvence kmitů změní v závislosti na tvrdosti materiálu podle vztahu 14 [12].



Obr. 17 Řez sondou ultrazvukového tvrdoměru [12]

$$\Delta f = E \cdot \sqrt{A} \quad (14)$$

kde: Δf ...změna frekvence

A.....plocha vpichu

E.....Youngův modul pružnosti

Ze vztahu 14 je patrné, že změna frekvence závisí na velikosti vpichu, což v praxi znamená, že čím měkčí materiál bude zkoušen, tím větší bude vpich a tím větší bude změna frekvence. Toto ovšem platí pouze tehdy, považujeme-li Youngův modul pružnosti za konstantní. V případě, že budeme měřit materiál s rozdílným E je nutné přístroj kalibrovat právě na tento modul pružnosti, protože přístroj převádí hodnoty tvrdosti právě ze změny frekvence.

UCI tvrdoměry mohou aplikovat zatížení o minimální hodnotě 1 N, takže se vytváří jen velmi malý vpich a proto je možné je použít i na testování hotových produktů nebo tenkých vrstev. Všeobecně se hodí spíše k měření tvrdších materiálů s dobře upraveným povrchem (R_a 1,6 a lepší).

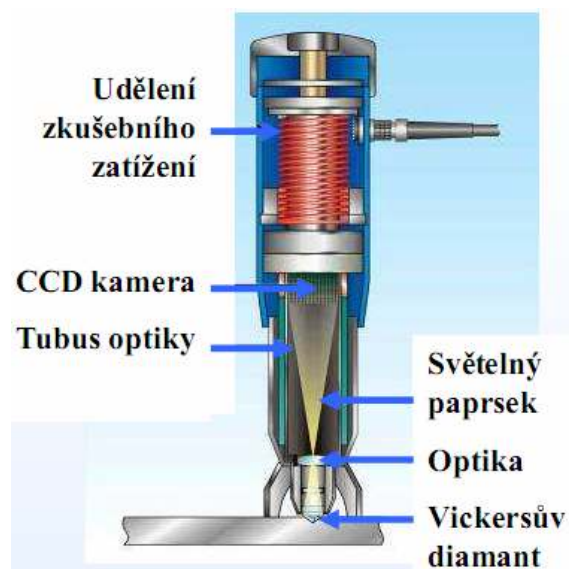
5.4 Tvrdoměry využívající optickou metodu

Princip technologie TIV spočívá ve spojení standardní zkoušky tvrdosti podle Vickerse a užití moderních optických technologií. Přístroj samotný se skládá z měřicí sondy a panelu s obrazovkou, spojených vodiči viz obr.18 [12].



Obr. 18 Optický tvrdoměr [12]

Měřicí sonda (obr. 19 [12]) je opatřena indentorem (Vickersův diamant), optickou soustavou a monochromatickou CCD (Charge-Coupled Device-zařízení s vázanými náboji) kamerou. CCD kamera snímá přes optickou soustavu vpich a v reálném čase se tak na displeji panelu zobrazuje oblast okolo vpichu. Zkušební zatížení je uděleno ručně. Dosáhne-li zatížení požadované hodnoty, přístroj zastaví na displeji obraz. Díky kontrastu vyhodnotí přesně oblast vpichu a automaticky spočte délku úhlopříček. Z té následně vypočte hodnotu tvrdosti dle Vickerse, přístroje jsou však schopny zobrazovat tvrdost i v jiných jednotkách.



Obr. 19 Řez sondou TIV tvrdoměru [12]

Oproti UCI tvrdoměrům je výhodou TIV tvrdoměrů především absence potřeby kalibrace na měření různých materiálů. Navíc lze touto metodou měřit jinak obtížně měřitelné vzorky, jako např. tenkostěnné trubky (tloušťka stěny cca 1,5mm) nebo tenkostěnné výlisky do tloušťky stěny 0,2mm. Stejně jako UCI tvrdoměry vyžaduje lepší úpravu povrchu zkoušeného materiálu (R_a 1,6 a lepší).

Závěr

Vývoj v oblasti měřicí techniky přinesl v posledních letech nové možnosti měření a vyhodnocování tvrdosti. Obecně by se dalo říct, že tyto nové metody jsou vylepšením standardních metod měření, které jsou známy již léta. Vylepšení se týkají především v provedení přístrojů, které mohou být nyní mnohem mobilnější a umožňují tak měření i v pracovních podmínkách s relativně vysokou přesností a následným okamžitým automatizovaným vyhodnocením měření.

Při porovnání přenosných tvrdoměrů využívající dynamicko-plastickou odrazovou metodu, TIV tvrdoměry a UCI tvrdoměry docházíme k závěru, že všechny tři typy mají vůči sobě výhody i určité nevýhody.

V případě dynamicko-plastického odrazového tvrdoměru je určitě výhodou, že nevyžaduje tak pečlivou úpravu povrchu jako zbylé dva typy a je vhodný především k měření hrubozrnných materiálů. Nevýhodou pak je skutečnost, že minimální tloušťka měřeného materiálu musí být minimálně 10-15 mm.

Jak TIV, tak UCI tvrdoměry lze užít ke zkoušení tenkých materiálů. V případě UCI tvrdoměru je minimální tloušťka měřeného materiálu 2-3 mm, případě TIV tvrdoměru není minimální tloušťka materiálu ani stanovena. Oba typy tvrdoměru jsou přesnější než dynamicko-plastický odrazový tvrdoměr, TIV tvrdoměr lze použít i jako náhradu stabilního tvrdoměru. Nevýhodou obou typů tvrdoměru je především požadavek na dobrou přípravu povrchu.

Schopnost v současnosti lépe analyzovat i velmi malé vpichy dovoluje užívat minimálních zatížení a měřit tak tenké vrstvy nebo materiály. Nezastupitelnou roli při měření mikrotvrdosti hraje Vickersův indentor, který má širokou oblast využití. Jako snadněji vyrobitelnou alternativu k Vickersovu diamantu lze použít Berkovichův indentor, který je také nejužívanějším indentorem pro měření nanotvrdosti. Pro měření mikrotvrdosti extrémně tvrdých materiálů je nejvýhodnější užití Knoopova indentoru.

I přes vznik nových metod a možností, nehrozí standardním metodám zánik. Díky své přesnosti mají stále nezastupitelnou roli při měření v laboratorních podmínkách, kde pro měření materiálů s homogenní strukturou je vhodnější Vickersova metoda, zatímco k měření materiálů s heterogenní strukturou se více hodí metoda Brinellova. Jako univerzální se jeví metoda podle Rockwella, která má navíc i výhodu v rychlém vyhodnocení výsledku zkoušky odečtením hodnoty tvrdosti přímo na přístroji.

Principy zkoušek dříve používaných k měření tvrdosti se nyní uplatňují i v oblastech zkoušení jiných vlastností materiálu - Scratch test, Mercedes test.

Jako dobrý nápad se zdá být univerzální tvrdost, avšak nahrazení všech běžně užívaných metod tvrdosti jednou, a globálně ji zavést, je zřejmě příliš ambiciózní a ve výsledku neuskutečnitelná myšlenka.

Seznam použité literatury

1. *MatNet* [online]. c2006 [cit. 2010-03-29]. Skúšky tvrdosti. Dostupné z WWW: <<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>>.
2. ČSN EN ISO 6506 – 1 Zkouška tvrdosti dle Brinella
3. BÍLEK, K., LUDVÍK, Š., LUDVÍK, J. *Zkoušky tvrdosti* [online]. 2002 [cit. 2010-04-12]. Dostupné z WWW: <www.metrotest.cz/zkousky_tvrdosti.pdf>
4. ČSN EN ISO 6507 – 1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse
5. ČSN EN ISO 6508 – 1 Zkouška tvrdosti dle Rockwella
6. *Mikrotrvdost a ultramikrotrvdost pevných látek a tenkých vrstev* [online]. 2002 [cit. 2010-04-12]. <<http://amper.ped.muni.cz/~fyzika/navratil/mikrot~1.ppt>>.
7. Studijní opora: Zkoušení materiálů a výrobků – dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/Index.html>>
8. DUŠEK, J. *Tvrđost, mikrotrvdost, nanotrvdost-čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. 165 s. Disertační práce na přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity v Brně. Vedoucí disertační práce Prof. RNDr. Vladislav Navrátil, CSc.
9. *National Physical Laboratory* [online]. 1999 [cit. 2010-04-12]. Knoop Hardness. Dostupné z WWW: <<http://www.npl.co.uk/engineering-measurements/mass-force-pressure/hardness/knoop-hardness>>.
10. Studijní opora: Hodnocení mikrotrvdosti struktur materiálů – dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/index.htm>>
11. BLÁHOVÁ, O., SAVKOVÁ, J. *Nanoindentačné merania tenkých vrstiev- princípy, metódy, vplyvy* [online]. 2006 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.kme.zcu.cz/download/seminar/savkova_nanoindentace_25_10_2006.pdf>
12. *Testima - přístroje a metody pro nedestruktivní kontrolu materiálů a součástí* [online]. 2006 [cit. 2010-04-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.testima.eu/>>.
13. *CV Instruments* [online]. c2009 [cit. 2010-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.cvi-europe.com/>>.
14. *Converter* [online]. c2002 [cit. 2010-04-18]. Shore - zkouška tvrdosti dle Shorea. Dostupné z WWW: <<http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-shore.htm>>.
15. VELES, P.: *Mechanické vlastnosti a zkúšanie kovov*, SNTL, Praha, 1985, str. 297 – 320
16. ASTM A1038 Ultrazvuková metoda měření tvrdosti

Seznam použitých zkratek

TIV	Through Indenter Viewing-pohled "skrz" diamant
UCI	Ultrasonic Contact Impedance-ultrazvuková kontaktní impedance
ISE	Indetation Size Effect-vliv velikosti vtisku
CCD	Charge-Coupled Device-zařízení s vázanými náboji

Seznam obrázků a tabulek

- Obr. 1 Princip zkoušky podle Brinella [1]
Obr. 2 Princip zkoušky podle Vickerse [1]
Obr. 3 Princip zkoušky tvrdosti podle Rockwella [1]
Obr. 4 ISE efekt [6]
Obr. 5 Berkovičův indentor [8]
Obr. 6 Knoopův indentor [8]
Obr. 7 Profil vtisku při a po zatížení [11]
Obr. 8 Závislost nanoindentčních křivek a vpichu na charakteru materiálu [11]
Obr. 9 Schéma zkoušky Poldi kladívkem [7]
Obr. 10 Základní princip dynamické zkoušky tvrdosti (d =průměr vpichu, E_{pot} =potenciální energie, E_{kin} =kinetická energie) [12]
Obr. 11 Řez sondou dynamicko-plastického odrazového tvrdoměru [12]
Obr. 12 Spektrum tvrdostí [13]
Obr. 13 Přenosný tvrdoměr Innovatest TH-170 [13]
Obr. 14 Přenosný tvrdoměr Krautkramer Dynapocket [12]
Obr. 15 Princip funkce skleroskopu [14]
Obr. 16 Princip funkce durokopu [7]
Obr. 17 Řez sondou ultrazvukového tvrdoměru [12]
Obr. 18 Optický tvrdoměr [12]
Obr. 19 Řez sondou TIV tvrdoměru [15]

- Tab. 1 Závislost velikosti použité kuličky a zkušebního zatížení
Tab. 2 Značení tvrdosti pro dané podmínky měření tvrdosti podle Brinella
Tab. 3 Značení tvrdosti a normovaná zatížení pro zkoušku tvrdosti a zkoušku tvrdosti při malém zatížení podle Vickerse
Tab. 4 Stupnice tvrdosti a jim odpovídající zatížení, indentory a rozsah použití
Tab. 5 Zkušební zatížení a symboly tvrdosti pro zkoušku mikrotvrdosti dle Vickerse