



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta
Katedra aplikované fyziky a techniky

Bakalářská práce

Měření tvrdosti materiálů se zaměřením
na měření tvrdosti kovových materiálů
dynamickou metodou
pomocí mobilního tvrdoměru DHT-100

Vypracoval: Karel Koch
Vedoucí práce: PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.

ANOTACE

V úvodu práce je popsána problematika měření tvrdosti dynamickou metodou se zaměřením na přístroj DHT-100. V další části je uveden vývoj zkoušek tvrdosti. V praktické části je provedeno porovnání s ostatními metodami a vypracování metodické části pro měření s přístrojem DHT-100.

Klíčová slova:

Leeb, Brinell, Rockwell, Vickers, tvrdost, dynamická metoda, DHT-100, UCI

ABSTRACT

During introduction this work describes dynamic method of hardness measurement particularly with focus on DHT-100 hardness tester. In the next part, history and development of hardness testing is being mentioned. Practical part of this work is dedicated to comparison of dynamic method with other known methods of hardness testing. Aim of this work was also to create work instructions for usage and measurements done by DHT-100 hardness tester. The work instructions are being described and introduced in practical part as well.

Keywords:

Leeb, Brinell, Rockwell, Vickers, hardness, dynamic method, DHT-100, UCI

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu, která je uvedena v textu.

V Českých Budějovicích dne 29.dubna 2013

Karel Koch

Na úvod bych velice rád poděkoval panu PeadDr. Bedřichu Veselému, Ph.D. za pomoc a odborné vedení při psaní mé bakalářské práce. Dále za jeho trpělivost a cenné rady, které mi dopomohly dovést tuto práci k úspěšnému konci.

Obsah

Úvod.....	7
Cíl práce	8
1. Principy měření tvrdosti	9
1.1 Zkouška tvrdosti podle Leeba (Equotip).....	9
1.1.1 Kompenzace naměřených hodnot podle směru měření (vliv gravitace) ..	10
1.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella	11
1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	14
1.3.1 Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	17
1.4 Zkouška tvrdosti podle Rockwella	18
1.5 Zkouška tvrdosti podle Shore-ho skleroskopu	20
1.6 Ultrazvuková metoda měření tvrdosti UCI	22
2. Nejvhodnější druhy měření v laboratorním prostředí pedagogické fakulty JU..	24
3. Podrobný návod na měření s tvrdoměrem DHT-100	27
3.1 Příslušenství tvrdoměru	27
3.2 Příprava vzorku na testování	28
3.3 Popis DHT-100	28
3.4 Postup měření s tvrdoměrem	30
3.5 Práce se softwarem	35
4. Měření tvrdosti tenkých kovových vrstev tvrdoměrem DHT-100	37
5. Postup měření tvrdosti kovových materiálů tvrdoměrem DHT-100	38

5.1	Postup měření vzorek A:	38
5.2	Postup měření mikrotvrdosti vzorek B:.....	40
Závěr	.....	42
Seznam použité literatury	.....	44
Seznam obrázků	.....	45
Seznam vzorců	.....	47
Seznam tabulek	.....	48
Seznam příloh	.....	48

Úvod

Tvrдост je jedna z mechanických vlastností materiálů, která se vyjadřuje jako odpor proti vnikání zkušebního tělesa do povrchu materiálu. Zkoušky tvrdosti jsou rozděleny na zkoušky vrypové, vnikací a odrazové. Závisí na nich celá řada technologických vlastností technických materiálů, jako je obrobitelnost, tažnost, kujnost, svařitelnost atp.

První porovnávací zkoušky tvrdosti byly zkoušky vrypové. Dosud nejběžnějšími způsoby měření jsou vtlačování tělíska (kulička, jehlan a kužel). Předchůdcem dynamických zkoušek byla odrazová zkouška, užívaná především při testování tvrdosti (prokalenosti) ložiskových tělísek (kuličky, jehlany a válečky).

Ještě do nedávné doby se měřila tvrdost klasickými metodami, a to například Vickers, Brinell, Rockwell. Všechny tyto metody jsou z první poloviny dvacátého století, a proto už nedostačují v mobilnosti a rychlosti.

V současnosti podmínil rozvoj elektroniky a digitální techniky vznik celé řady nových měřicích metod a technik zpracování naměřených dat. Jedná se především o metody, které jsou rychlé, jednoduché pro obsluhu a daná zařízení jsou mobilní. Mobilita umožňuje měření jak přímo při výrobním procesu, tak v provozních podmínkách strojů mimo výrobní závody a měřicí laboratoře.

Nové metody též umožňují měření na neupravených površích odlitků, či výkovků. Dále mobilita zařízení umožňuje měření na velkých výrobcích, které nelze přemístit do měřicí laboratoře, případně situovat pod měřicí přístroj. Dále tyto metody umožňují měřit pomocí relativně malých sond v jinak jen velmi obtížně dostupných místech. Ovšem i tato měření mají svá specifická omezení (například polohu měřicí sondy, nároky na zkušenost obsluhy, kalibrace přístroje a znalost relativních nepřesností v porovnání s klasickými metodami

Cíl práce

Práce je zaměřena na měření tvrdosti dynamickou metodou. Ze zadání vyplývají tyto dílčí cíle práce:

- Přehledně utřídit zásady správného měření tvrdosti kovových materiálů mobilními tvrdoměry
- Popsání principu ve stupnicích tvrdosti HV, HB, HS, HRC, HRB
- Výběr nejfrekventovanějších a nejvhodnějších druhů měření v laboratorních podmínkách pedagogické fakulty se zaměřením na dynamické měření tvrdosti dle Leeba, pomocí přístroje DHT-100
- Porovnat naměřené výsledky s výsledky získanými jinými metodami
- Popsání měření tvrdosti tenkých kovových vrstev dynamickými metodami tvrdoměrem DHT-100
- Popsání principu dynamické ultrazvukové metody měření tvrdosti UCI - Ultrasonic Compact Impedance
- Seznámení se podrobně s měřicím přístrojem DHT-100
- Instalace a důkladné seznámení se se softwarem k připojení tvrdoměru DHT-100 k PC
- Vypracování přehledného a srozumitelného textu, který bude použitelný jako metodický návod pro postup měření tvrdosti přístrojem DHT-100
- Sestavení charakteristických typů úloh pro měření tvrdosti přístrojem DHT-100 na pedagogické fakultě a následné uvedení postupu a způsobu zpracování tohoto zadání

1. Principy měření tvrdosti

1.1 Zkouška tvrdosti podle Leeba (Equotip)

Autor:	Dietmar Leeb
Představení:	1975, Švýcarsko Proceq SA
Vnikací těleso:	Kulička ze slinutých karbidů
Měřený materiál:	Spíše větší obrobky bez oxidů, barviv, maziv a povlaků

Leebův tvrdoměr byl navržen na začátku sedmdesátých let minulého století jako alternativa k těžkopádným a mnohdy složitým tvrdoměrům. První Leebův tvrdoměr se na trhu objevil pod označením Equotip, tento výraz je dodnes považován za synonymum k Leebovu tvrdoměru.

Dietmar Leeb ke svému tvrdoměru definoval i vlastní jednotku tvrdosti hodnoty Leeb. Hodnota tvrdosti podle Leeba se vypočítá jako poměr rychlosti vnikacího tělesa před dopadem V_r a rychlosti po dopadu V_a na testovaný vzorek. Tudíž každý kdo používá dynamickou metodu na měření tvrdosti, využívá jednotky Leeb. Avšak jen malá část uživatelů používá jednotku HL, proto musí být jednotka snadno konvertována do specifických stupnic (HV, HB, HRC, HRB, HS). Proto převodní křivky jsou uloženy a automaticky přepočítávány v měřícím zařízení.

$$HL = \frac{V_r}{V_a} 1000 \quad (1)$$

Princip měření, spočívá ve vystřelení kuličky směrem k měřenému vzorku, přičemž kulička naráží definovanou rychlostí (kinetickou energií). Náráz deformuje povrch a vnikací těleso ztrácí část své energie. Velikost ztráty energie je větší, čím větší je deformace povrchu, tudíž čím je měkkší materiál. Vnikací kulička je vyrobena ze slinutých karbidů nebo diamantu u velmi tvrdých materiálů. V pouzdru vnikací kuličky je umístěn permanentní magnet, který indukuje napětí při průchodu cívkou ve spodní

části sondy, toto napětí je úměrné rychlosti. Tudíž měření rychlosti kuličky probíhá bezkontaktně.

1.1.1 Kompenzace naměřených hodnot podle směru měření (vliv gravitace)

Dopadové hlavice využívá k pohonu vnikacího tělesa pružinu. Během letu tělesa, ve kterém je obsažen permanentní magnet, dochází ke generování signálu v cívice umístěné na konci dopadové hlavice. Po dopadu se těleso odráží, generuje se druhý signál a je vypočítána tvrdost materiálu jako poměr napětí indukovaného v cívice. Na přesnost měření má velký vliv směr měření, neboť při měření z boku nebo ze spodní části je výsledek nepřesný vlivem tíhového zrychlení (gravitace). Kompenzovat směr měření lze třemi způsoby:

1. Opravou naměřených hodnot dle tabulek, tento způsob je nepřesný, pomalý a celkově zdrojem chyb.
2. Zadáním směru měření manuálně přímo do přístroje, toto nastavení musíme provést před každou změnou směru měření.
3. Automatické detekce směru měření při průletu vnikacího tělesa cívkou a automatická kompenzace změny směru.

Při samotném měření musíme dbát na určité náležitosti, aby měření bylo provedeno bez chyb a tedy co nejpřesněji.

- Na měření, lze použít 7 dopadových hlavice, přičemž minimální tloušťka testovaného materiálu činí 3mm.
- Vzdálenost měření od kraje materiálu minimálně 5mm.
- Hmotnost měřeného materiálu se doporučuje 5kg a více, 2-5kg s pevnou podporou a méně než 2kg s vazební pastou.
- Drsnost měřeného povrchu RA 10
- Měřený materiál bez povrchové úpravy, koroze, maziv atd.

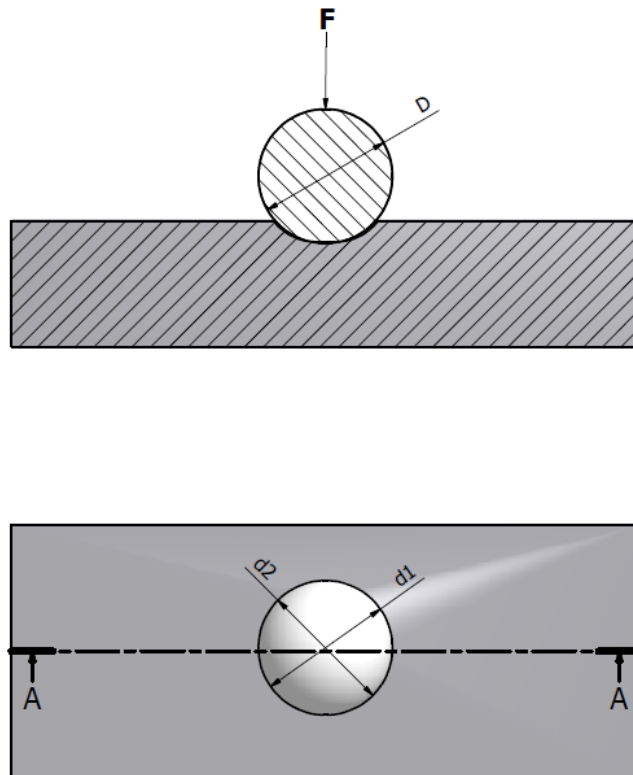
1.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Autor:	Johan August Brinell (1848-1925)
Představení:	1900, výstaviště Paříž
Okolní teplota:	10-35°C
Vnikací těleso:	Kalená a leštěná kulička (HBS), slinuté karbidy (HBW)
Měřený materiál:	Minimálně desetinásobek hloubky vtisku

Brinellův tvrdoměr je vyráběn v rozmanitých velikostech i provedeních. Od laboratorních masivních přístrojů, až po malé mobilní přístroje použitelné v terénu, nebo všude tam, kde není prostor nebo laboratoř.

Princip měření spočívá ve vtlačování kalené a leštěné kuličky o průměru D do měřeného materiálu působením síly F , která směřuje kolmo k měřenému materiálu po určitou dobu a následnému změření průměru vtisku d .

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi \cdot D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \frac{F [N]}{D, d [mm]} \quad (2)$$



Obrázek 1 Princip měření Brinell [1]

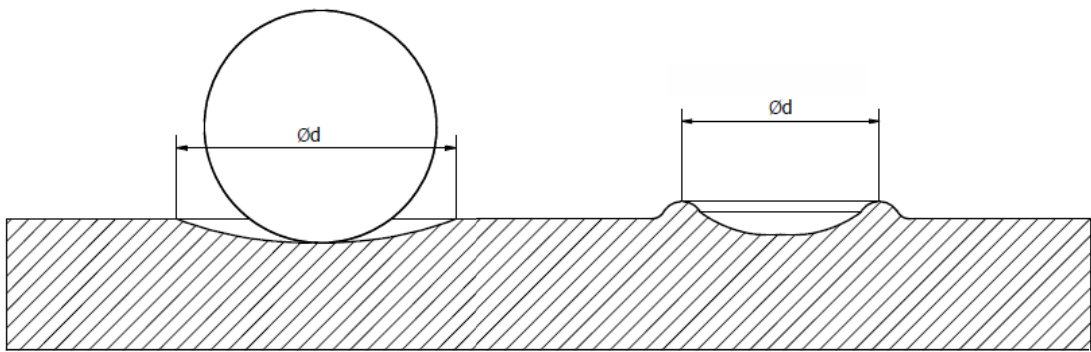
Normální podmínky zkoušky jsou $D = 10\text{mm}$, $F = 29430\text{N}$ (3000kp), doba zatížení od 10 do 15s. Při těchto podmínkách se tvrdost zapíše číselnou hodnotou a za číslo písemně HB. Např. 130HB. Při odlišných podmínkách měření se za písmeny HB uvádějí podmínky zkoušky v hierarchickém pořadí: průměr kuličky [mm], velikost zatížení [kp] a doba působení[s]. Např. 150HB 5/550/25.

Při samotném měření musíme dbát na určité náležitosti, aby měření bylo provedeno bez chyb a tedy co nejpřesněji.

- Na měření lze použít 5 velikostí kuliček a to 10; 5; 2,5; 2; a 1mm, při čemž musí být tloušťka materiálu při nejmenším desetinásobek hloubky vtisku, aby nedošlo ke změření tvrdosti také podložky, na které máme měřený materiál umístěn.
- Průměr kuličky volíme tak, aby průměr vtisku d byl v rozmezí $0,25 \div 0,6D$.
- Vzdálenost měření od kraje materiálu minimálně $2,5d$ a vzdálenost sousedního středu vtisku ke středu vtisku musí být minimálně $4d$.

- Průměr vtisku se měří pomocí mikroskopu s přesností $\pm 0,25\%$ D ve dvou vzájemně kolmých směrech a spočítáme aritmetický průměr obou měření. Rozdíl mezi hodnotami nesmí být větší než 5% menšího z nich.

Nevýhodou této zkoušky je, že se nedá použít na velké tvrdosti materiálů, a z toho důvodu nemáme jednotnou stupnici tvrdosti od nejtvrděších po nejměkčí dle Brinella. Další nevýhoda spočívá v kruhových vtiskách, které se obtížně měří a navíc mohou být ovlivněny vznikem valu u zpevněných materiálů, nebo naopak vtažením okraje u nezpevněných materiálů.



Obrázek 2 Nezpevněný a zpevněný materiál [1]

Výhodou této zkoušky je, že nevyžaduje příliš čistý a upravený povrch a není citlivá na otřesy okolí. Vnikací těleso je nahraditelné a levné. Brinellův princip je jediná možnost, jak změřit tvrdost šedé litiny.

1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

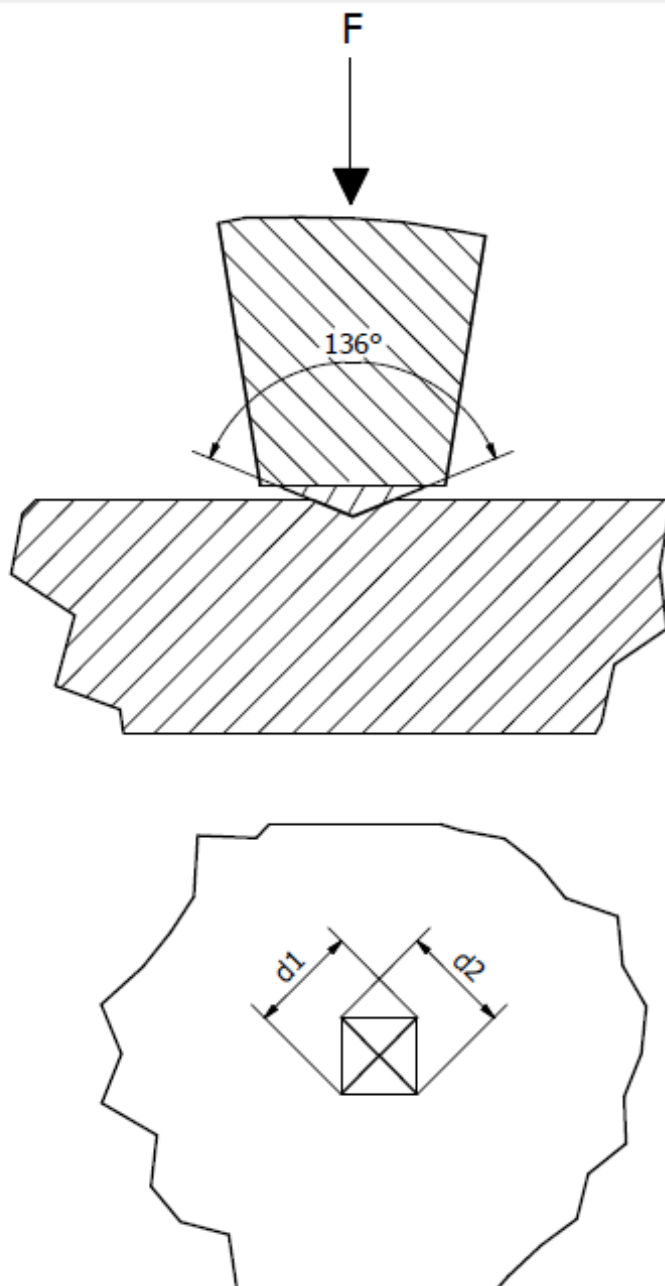
Autor:	Robert L. Smith a George E.
Představení:	1921, Vickers Ltd.
Okolní teplota:	10-35°C
Vnikací těleso:	Diamantový pravidelný čtyřboký jehlan
Měřený materiál:	Tloušťka minimálně 1,2d u železa, jiné materiály 1,5d

Vickersova metoda pochází z Anglie, kde ji zkonstruovali ve firmě Vickers Ltd. Proto je tahle metoda v Evropě známá pod označením Vickers, zatímco v Americe pod názvem diamond pyramid hardness test.

Zkouška Vickersova je postavena na totožném principu jako zkouška Brinellova. Pouze místo kuličky je do materiálu vtlačován diamantový vyleštěný pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami jehlanu $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Tento úhel je navržen tak, aby při samotném měření docházelo co k nejmenšímu tření, a tím k co nejmenšímu ovlivnění výsledku.

Tvrdot podle Vickerse definujeme jako poměr zkušebního zatížení F k ploše povrchu vtisku, který se popisuje jako pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou s úhlopříčkami d_1 a d_2 a s vrcholovým úhlem. Ten se shoduje se úhlem vnikacího tělesa.

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2} \frac{F [N]}{d [mm]} \quad (3)$$



Obrázek 3 Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse [1]

Normální podmínky zkoušky jsou $F = 294\text{N}$ (30kp), doba zatížení od 10 do 15s. Při těchto podmínkách se tvrdost zapíše číselnou hodnotou a za číslo uvedeme označení Hv (například 380HV). Při odlišných podmínkách měření se za písmeny HV uvádějí podmínky zkoušky v hierarchickém pořadí: zatížení [kp], doba působení [s] - např. 275 HV 15/25.

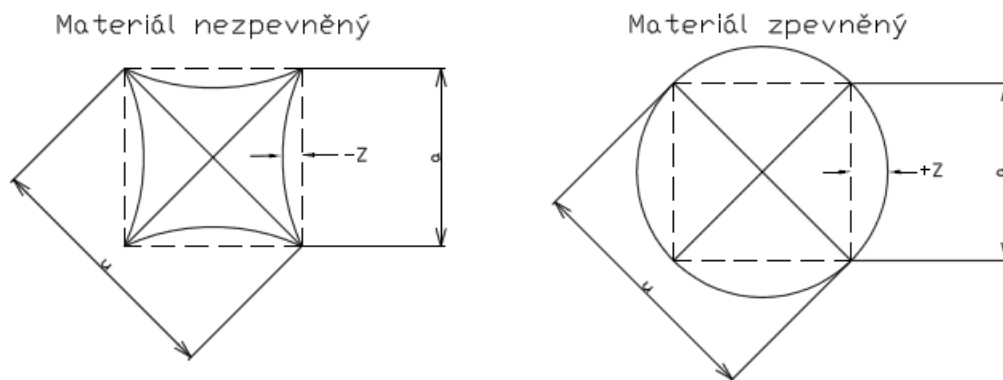
Při samotném měření musíme dbát na určité náležitosti, aby měření bylo provedeno bez chyb a tedy co nejpřesněji.

- Tloušťka měřeného materiálu musí být u železa minimálně 1,2d v jiných případech 1,5d.
- Zatížení musí působit plynule, bez chvění a rázů.
- Vzdálenost od kraje materiálu nebo kraje sousedního vtisku ke středu vtisku musí být minimálně 2,5d.
- Úhlopříčky vtisku se měří pomocí mikroskopu s přesností $\pm 0,001\text{mm}$, pro výpočet se používá aritmetický průměr obou délek úhlopříček. Rozdíl mezi délkou úhlopříček nesmí být větší než 5%.
- Přesnost výsledků závisí na hladkosti měřeného povrchu.

Výhodou této metody je, že se poměr hodnot tvrdosti shoduje se skutečnými poměry tvrdosti. Což znamená, že kov s tvrdostí 100HV má dvakrát větší tvrdost, než náleží kovu s tvrdostí 50HV. Proto jako jediná metoda má stupnici tvrdosti od nejměkčích kovů až po nejtvrďší. Další výhodou je relativně malé i mělké vtisky po diamantu, a tím nepříliš poškozená funkční plocha materiálu.

Nevýhodou je zde stejně jako u předchozí metody deformace vtisků u nezpevněných nebo zpevněných materiálů. V těchto případech se hodnota úhlopříček upravuje a pro výpočet použijeme výraz:

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{(d \pm z\sqrt{2})^2} \frac{F [N]}{d [mm]} \quad (4)$$



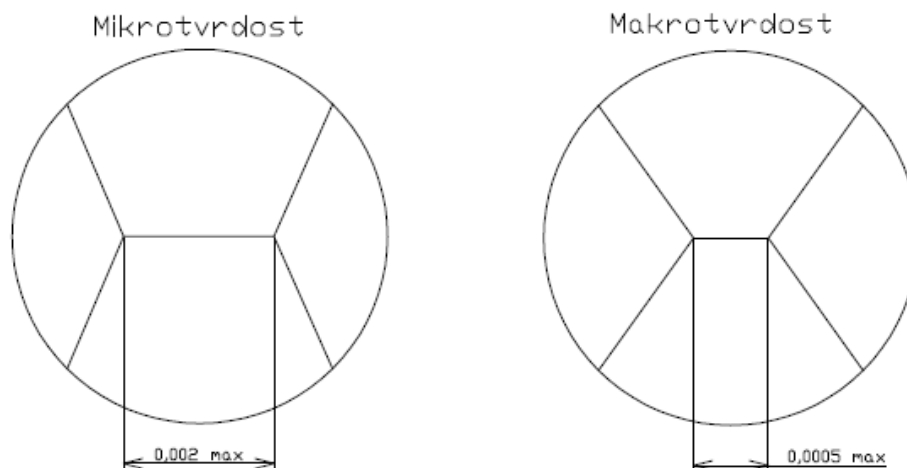
Obrázek 4 Deformace okrajů HV [1]

1.3.1 Zkouška mikrotvrdomosti podle Vickerse

Vickersova zkouška se využívá hlavně na zkoušky v laboratořích a je vhodná také na měření tvrdosti tenkých vrstev (cementovaných nebo nitridovaných).

Při měření mikrotvrdomosti se využívá totožného tvaru vnikacího tělesa, nicméně délka společné hrany mezi protilehlými stěnami jehlanu nesmí překročit 0,0005 mm. Zatížení F je v závislosti na tloušťce měřeného materiálu v rozmezí od 0,0098N do 4,905N. Vzdálenost vtisku od okraje musí být nejméně 1,5 krát úhlopříčky vtisku, od sousedícího vtisku to musí být minimálně dvojnásobek úhlopříčky většího vtisku.

$$HV = \frac{1855 \cdot F}{d^2} \frac{F [cN]}{d [\mu m]} \quad (5)$$



Obrázek 5 Hroty vnikacího tělesa HV [1]

1.4 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

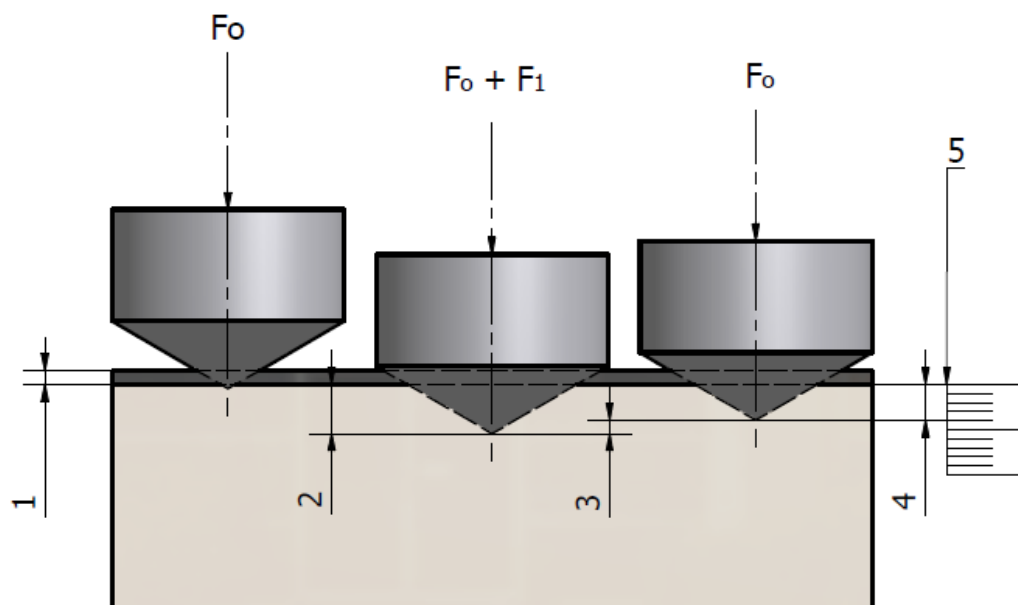
Autor:	Hugh M. Rockwell a Stanley P. Rockwell
Představení:	1919, USA
Okolní teplota:	10-35°C
Vnikací těleso:	Diamantový kužel nebo kalená ocelová kulička
Měřený materiál:	Tloušťka minimálně desetinásobek hloubky vtisku

Zkouška Rockwellova je postavena na totožném principu jako zkouška Ludwíkova, pouze ze změnou indektoru a menšího zatížení. Ludwíkova zkouška se neujala, ale napomohla bratrům Rockwelloým, aby sestrojili metodu, která se používá dodnes.

Princip měření spočívá v rozdílů vtláčování tělesa s diamantovým kuželem o vrcholovém úhlu $120 \pm 0,5^\circ$ se zaobleným poloměrem 0,2mm (pro stupnice C, A, N) nebo kalené ocelové kuličky o průměru 1,5875mm 1/16" (pro stupnice B, T) mezi dvěma stupni zatížení (předběžné F_0 a celkové F_1).

Při samotném měření položíme měřený materiál kolmo k vnikacímu tělesu a bez rázů se zatíží předběžným zatížením F_0 čímž vyrovnáváme nerovnosti materiálů. Nastavíme počáteční polohu a plynule 2 až 8 sekund přidáváme zatížení F_1 . Po zpomalení ručičky na hloubkoměru se F_1 odlehčí a výsledek se odečte na stupnici hloubkoměru, aniž by se odstranilo F_0 . Čím bude měřený materiál tvrdší, tím mělčí bude vtisk. A poté bude indikátor tvrdosti ukazovat větší hodnotu. Dbáme na určité náležitosti, a to například, aby měření bylo provedeno bez chyb a tedy co nejpřesněji.

- Tloušťka měřeného materiálu musí být minimálně desetinasobkem e .
- Zatížení musí působit pomalu a bez rázů.
- Vzdálenost od kraje materiálu nebo středu sousedního vtisku ke středu vtisku musí být minimálně 3mm u stupnice A, C, E, 2mm u stupnice T a 1mm u stupnice N.
- Přesnost výsledků ± 2 jednotky HR u kužele a ± 3 jednotky u kuličky.



Obrázek 6 Princip měření tvrdosti podle Rockwella HRC [1]

Rockwellova metoda umožňuje využít různá zatížení viz Tabula 1. Obecně platí to, že pro měkké materiály využíváme vnikací těleso - kuličku.

Označení	Tvar Indektoru	Zatížení [N]		
		F_0	F_1	$F_0 + F_1$
HRA	Kužel	98	490	588
HRC	Kužel	98	1373	1471
HRB	Kulička	98	883	980
HRN	Kužel	29,4	117,7	147,1
HRT	Kulička	29,4	268,4	294,2
			419,9	441,3

Tabulka 1 Rockwellovy metody {1}

Výhodou této zkoušky je, že nevyžaduje příliš čistý a upravený povrch. Je rychlá pohodlná, proto se používá hlavně v kalírnách a při cementování.

Nevýhoda spočívá v nepřesnosti, která je větší než u jiných metod.

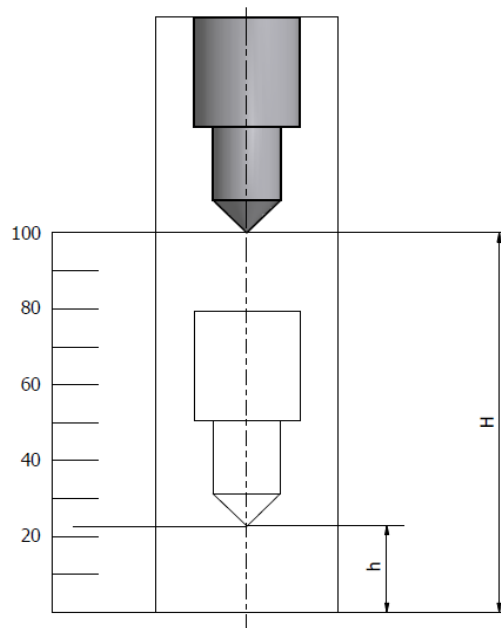
1.5 Zkouška tvrdosti podle Shore-ho skleroskopu

Autor:	Shore
Představení:	1900
Vnikací těleso:	Válcové těleso zakončené diamantem
Měřený materiál:	Hladký bez nerovností

Zkouška Shore-ho skleroskopu je dynamická metoda postavena na principu jako odrazu tělesa o hmotnosti m , které padá z výšky h na povrch měřeného materiálu. V tomto případě tedy dostaneme energii $E_1 = m \cdot g \cdot H$ (6). Část energie se spotřebuje

na elastickou a plastickou deformaci povrchu vzorku a zbytek energie způsobí elastický odraz tělíška.

Skleroskop je složen ze skleněné kalibrované trubky, ve které se pohybuje válcové těleso o hmotnosti $m = 2,5\text{g}$. Těleso je zakončeno kulovitě zabroušeným diamantem a padá volně z výšky $H = 254\text{mm}$ (10"). Trubka je opatřena stupnicí, na které se odečítají výšky odrazu pomocí lupy.



Obrázek 7 Shoreův skleroskop [1]

Při samotném měření musíme dbát na určité náležitosti, a to na takové, aby měření bylo provedeno bez chyb a tedy co nejpřesněji.

- Měřený materiál musí být hladký a bez povrchových vad
- Dopadové těleso nesmí dopadnout dvakrát na stejné místo, dále dochází ke zpevnění materiálu na místě dopadu.
- Skleroskop musí být při měření vždy kolmo k měřenému materiálu

Rozlišuje dvě stupnice měření skleroskopem:

- HSC

hmotnost dopadového tělesa: 2,5g

padací výška: 254mm

$$HSC = \frac{10^4 \cdot h_2}{65 \cdot h_1} \frac{h_2 [mm] \text{ výška odrazu}}{h_1 [mm] \text{ padací výška}} \quad (7)$$

- HSD

hmotnost dopadového tělesa: 36,2g

padací výška: 19mm

$$HSD = \frac{140 \cdot h_2}{h_1} \frac{h_2 [mm] \text{ výška odrazu}}{h_1 [mm] \text{ padací výška}} \quad (8)$$

Nevýhodou této metody je, že empirická stupnice skleroskopu přímo udává hodnotu tvrdosti. Tato metoda je značně nespolehlivá.

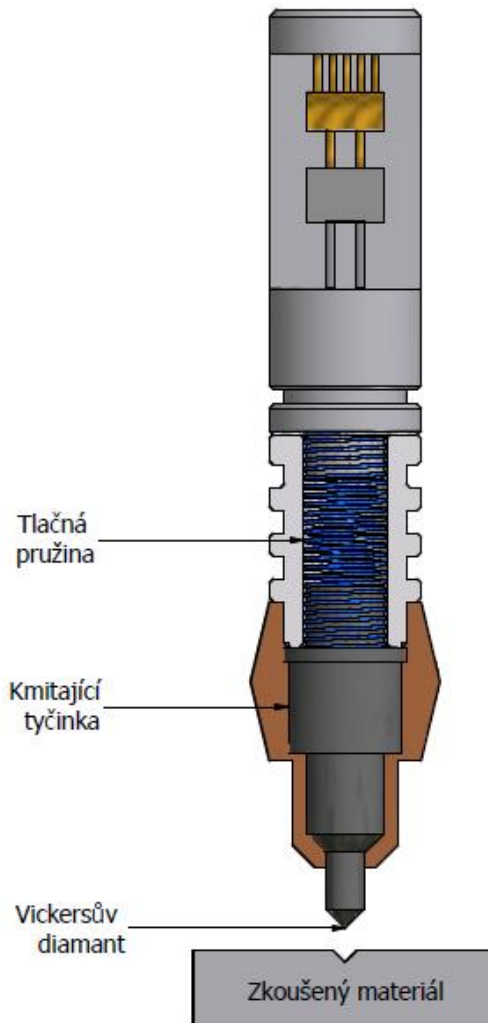
Výhoda metody spočívá v rozměrech a manipulaci.

1.6 Ultrazvuková metoda měření tvrdosti UCI

Vnikací těleso: Vickersův diamant

Měřený materiál: Homogenní, min. tloušťka 2-3 mm, min. hmotnost 0,3kg

Ultrasonic Contact Impedance neboli UCI je ultrazvuková metoda měření tvrdosti využívající diamantový indiktor podobný tomu, který je využíván v klasickém testu mikro tvrdosti u Vickerse.



Obrázek 8 Princip ultrazvukové metody měření tvrdosti UCI [1]

Princip měření spočívá na kmitání indektoru, který má určitou frekvenci (cca 70kHz). Dojde-li ke kontaktu mezi zkoušeným materiálem a indentorem, změní se frekvence kmitů v závislosti na tvrdosti zkoušeného materiálu, a to dle vztahu:

$$\Delta f = E \cdot \sqrt{A} \quad (9)$$

Δf : změna frekvence

A: plocha vpichu

E: efektivní modul pružnosti

Frekvence závisí na velikosti vpichu, tudíž čím měkčí materiál bude zkoušen, tím větší bude vpich a tím větší změna frekvence. Tohle platí pouze v případě, ve kterém

považujeme Youngův modul pružnosti E za konstantní. Budeme-li chtít měřit materiál s rozdílným E , je nutné přístroj kalibrovat na příslušný modul pružnosti, jelikož přístroj převádí hodnoty právě ze změny frekvence.

Výhoda metody spočívá v tom, že můžeme měřit všemi směry a ne pouze jedním, jak bylo zvykem u starších metod. Za další značnou výhodu považujeme to, že po měření zůstává jen velmi malý vpich, a proto se metoda může používat už na hotové výrobky nebo na měření tenkých vrstev.

Nevýhodou této metody je, že se hodí spíše na větší tvrdosti materiálů.

2. Nejvhodnější druhy měření v laboratorním prostředí pedagogické fakulty JU

Ve školní laboratoři si budeme vybírat spíše jednodušší druhy měření, jelikož se zde máme naučit správnému zacházení s přístrojem, ale hlavně samotnému měření. Složitější měření, které ke správnému výsledku potřebuje kompenzování a eliminování extrémů, broušení povrchů, měření nad hlavou aj., necháme na odborné pracovníky v profesionálních laboratořích. V našem případě tedy nemůžeme a nebudeme používat nehomogenní materiály (výkovky, vylitky atp.).

Nejvhodnější a nejfrekventovanější měření v laboratořích pedagogické fakulty by mělo být:

- a) Měření kalené oceli
- b) Měření hliníku
- c) Měření mědi
- d) Měření mikrovrstvy

Porovnání výsledků na kalené ocelové kostce, která měla sloužit jako razník na hliníkový plech. Vzorek byl povrchově upraven broušením. Spolupracoval jsem se dvěma firmami, které mají laboratoř na tvrdost kovů. Vždy jsou provedeny tři měření a uveden průměr:

DHT-100

1. 57,3
2. 56,7
3. 57,5

57,2 HRC



Obrázek 9 Dynamický tvrdoměr DHT-100 [2]

Mitutoyo DT20 Durotwin plus

1. 58
2. 57,5
3. 57,5

57,6 HRC



Obrázek 10 Mitutoyo DT20 Durotwin plus [3]

Ge MIC 10 UCI

1. 57,1
2. 59,1
3. 57,5

57,7 HRC



Obrázek 11 Ge MIC 10 UCI [4]

Proceq Equo tip 2

1. 57,1
2. 56,9
3. 56,7

56,9 HRC



Obrázek 12 Proceq Equo tip 2 [5]

Dynamický tvrdoměr DHT-100 byl porovnán se třemi tvrdoměry, a to klasickou metodou Rockwell od společnosti Mitutoyo, ultrazvukovou metodou UCI od

společnosti GE a dynamickou metodou od společnosti Proceq. Všechny naměřené hodnoty byly v rozmezí tolerance, tudíž přístroj DHT-100 měří přesně a není zapotřebí i u relativně levného přístroje dělat porovnávací křivku s tabulkou.

3. Podrobný návod na měření s tvrdoměrem DHT-100



Tvrdoměrem DHT-100 je určována tvrdost dle Leeba. Měření spočívá ve vystřelení indektoru (kulička ze slinutých karbidů) směrem k měřenému vzorku, přičemž indektor naráží definovanou rychlostí (kinetickou energií).

Hodnota tvrdosti dle Leeba se vypočítá jako poměr rychlosti vnikacího tělesa před dopadem V_r a rychlosti po dopadu V_a na testovaný vzorek.

Obrázek 14 Souprava na měření tvrdosti DHT-100 [6]

$$HL = \frac{V_r}{V_a} 1000 \quad (1)$$

Avšak jen malá část uživatelů používá jednotku HL, proto před samotným měřením lze nastavit jiné stupnice tvrdosti (HV, HB, HRC, HRB, HS). Ovšem při spuštění tvrdoměru je implicitně nastavena stupnice HL.

3.1 Příslušenství tvrdoměru

Přístroj DHT-100 je přenosný dynamický tvrdměř, jehož komponenty jsou následující:

1. Přístroj DHT-100
2. Rázová hlavice D
3. Rázová hlavice C
4. Čistící kartáčky a malé podpůrné prstence
5. Kalibrovací etalon
6. Software a propojovací kabel

7. Příručka CZ/AN

8. 2x Baterie AAA

3.2 Příprava vzorku na testování

Při testování vzorku nad 5kg není potřeba žádná dodatečná podpora. Ale u tenkých a konzolových vzorků s hmotností nad 5kg ji (podporu) upevníme tak, aby nedošlo k deformaci při působení sil. Vzorky s hmotností pod 2kg musíme upevnit s podporou vážící více jak 5kg. Hmotnost vzorku nesmí být menší než 100g a tloušťka minimálně 5mm. Tloušťka u tvrzené vrstvy minimálně 0,8mm. Testovaný vzorek by neměl být magnetický.

Povrch vzorku musí být před zkouškou hladce vyčištěn, přičemž drsnost by neměla přesáhnout $R_a > 2\mu\text{m}$. Dále povrch musí být čistý bez koroze či olejového povlaku, barev atp.

Přístroj pracuje s přesností $\pm 0,5\%$.

3.3 Popis DHT-100

Přístroj se skládá ze šesti tlačítek, dvou zdířek a jednoho monochromatického displeje.



Zapnout/Vypnout



Listování v menu/Tisk dat



Listování v menu/Podsvícení



Smazat

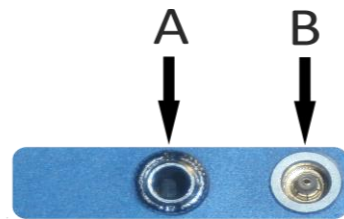


Opětovné načtení



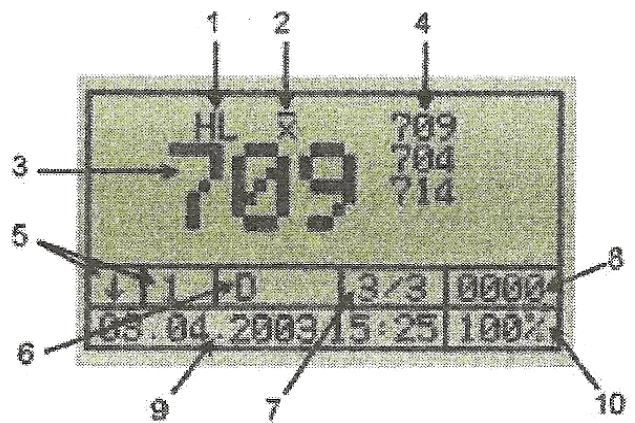
Menu/Potvrzení

- A. Připojení datového kabelu k PC
- B. Připojení rázové hlavice



Obrázek 15 Zdíčky na připojení kabelů [6]

1. Stupnice tvrdosti
2. Symbol průměru
3. Průměrná hodnota
4. Změřené hodnoty
5. Směr měření
6. Typ rázové hlavice
7. Číslo měření/průměr
8. Pozice v paměti
9. Datum a čas
10. Ukazatel baterie



Obrázek 16 Displej přístroje DHT-100 [7]

3.4 Postup měření s tvrdoměrem

1. Podle povahy zkoušeného materiálu připojíme požadovanou rázovou hlavici.

Druhů hlavic je celkem sedm, avšak ve škole máme k dispozici pouze dvě:

D – Standartní dopadová hlavice.

DC – Zmenšená hlavice D, která je určená do stísněných prostor (díry atp.)

DL – Hlavice určená do stísněných prostor (úzké rýhy atp.)



Obrázek 17 Výběrové dopadové hlavice [8]

D+15 – Hlavice určená na měření v drážkách atp.

C – Hlavice na měření tenkých vrstev nebo součástek citlivých na náraz





G – Hlavice určená na měření odlitků a výkovků



Obrázek 18 Výběrové dopadové hlavice [8]

Materiál	D	DC	D+15	C	G	DL
Ocel	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Nástrojová ocel	✓	✓	✓			✓
Nerezová ocel	✓	✓				
Šedá litina GG	✓	✓			✓	
Litina GGG	✓	✓			✓	
Litý hliník	✓	✓				
Mosaz	✓	✓				
Bronz	✓	✓				
Měď	✓	✓				




Tabulka 2 Možnosti měření rázových hlavic {2}

2. Zapneme přístroj DHT-100 .
3. Stiskem klávesy  se dostaneme do menu, kde můžeme listovat pomocí tlačítek   v nabídce přístroje:
 1. MEASUREMENT (Měření)

2. IMPACT DEVICE (Rázová hlavice)
3. DIRECTION (směr)
4. AVERAGE TIMES (Průměrný čas)
5. MATERIAL (Materiál)
6. SCALE (Stupnice tvrdosti)
7. TOLERANCE (Tolerance)
8. DATE AND TIME (Datum a čas)
9. LOCATION (Umístění v paměti)
10. MEMORY (Paměť)
11. PRINT (Tisk)
12. CALIBRATION (Kalibrace)
13. DEFAULT (Výchozí nastavení)

3.1 Po stisku klávesy  na MEASUREMENT se vrátíme z menu do režimu měření.




3.2 Pod položkou IMPACT DEVICE najdeme na výběr ze sedmi rázových hlavíc,

pomocí tlačítek   vybereme vhodnou hlavici na měření a potvrdíme klávesou .

3.3 Pod položkou DIRECTION najdeme na výběr z pěti směrů měření a opět potvrdíme

3.4 Pod položkou AVERAGE TIMES najdeme výběr počtu měření od 2-8, ze kterých nám přístroj vypočítá průměr.

3.5 Pod položkou MATERIAL najdeme na výběr z 9 materiálů, listujeme pomocí

  a výběr provedeme pomocí 

1. STEEL (ocel)
2. TOOL STEEL (Nástrojová ocel)
3. STAINLESS (Nerezová ocel)
4. GREY CAST IRON (Šedá litina)
5. CAST IRON GGG (Litina)

6. CAST ALUMINIUM (Litý hliník)

7. BRASS (Mosaz)

8. BRONZE (Bronz)

9. COPPER (Měď)

3.6 Pod položkou SCALE najdeme na výběr ze 7 stupnic tvrdosti.

3.7 Pod položkou TOLERANCE najdeme na výběr ze dvou stupnic tolerance, pomocí



zvyšujeme hodnoty, klávesa



slouží k posunování mezi řádky a

sloupci. Následný výběr provedeme pomocí



LOWER LIM. 110 HL (K průměru napíše L, když bude hodnota menší než 110)

UPPER LIM. 700 HL (K průměru napíše H, když bude hodnota menší než 700)

3.8 Pod položkou DATE AND TIME najdeme nastavení data a času, pomocí



zvyšujeme hodnoty, klávesa



slouží k posunování mezi řádky, výběr

provedeme pomocí



3.9 Pod položkou LOCATION najdeme - kam se má v paměti měření uložit, pomocí



zvyšujeme hodnoty, klávesa



slouží k posunování mezi řádky,

výběr provedeme pomocí



. Na výběr máme paměť na 1250 hodnot, od 0 do 1249.

3.10 Pod položkou MEMORY najdeme tři možnosti výběru, klávesa




slouží k posunování mezi řádky, výběr provedeme pomocí




1. AUTO STORE (Automatické uložení a posunutí pozice v paměti o +1)
2. CLOSE STORE (Měření není uloženo)

3. CLEAR MEMORY (Smazání paměti, určíme rozsah výmazu)

3.11 Pod položkou PRINT najdeme dvě řady čísel sloužící pro tisk sekvence

hodnot, klávesa  slouží k posunování mezi řádky a klávesa  slouží



k zvyšování hodnot, výběr provedeme pomocí  .


START LOC. 0000

END LOC. 0005

Vytiskne sekvenci hodnot od 0 až po 5, dohromady 6 měření.

3.12 Pod položkou CALIBRATION najdeme tři řady čísel sloužící pro kalibraci

přístroje, klávesa  slouží k posunování mezi řádky a klávesa 

slouží k zvyšování hodnot, výběr provedeme pomocí  .

CAL. RANGE HL: ± 99 (Kalibrační rozsah)

AVG. DATE 780 (Průměr měření)

CAL. DATE ± 00 (Kolik přidáme k průměru měření)

3.13 Položkou DEFAULT se nám vrátí tovární nastavení přístroje.



Nejdříve jednoduše uchopíme dopadovou hlavici a posuneme horní část trubky dopředu a zpět, tím dochází k natáhnutí pružiny. Nyní je dopadová hlavice připravena k použití.

Obrázek 19 Práce s hlavicí [9]



Dále přiložíme dopadovou hlavici na místo, kde budeme měřit a přidržíme ji za spodní část hlavice.

Obrázek 20 Práce s hlavicí [9]

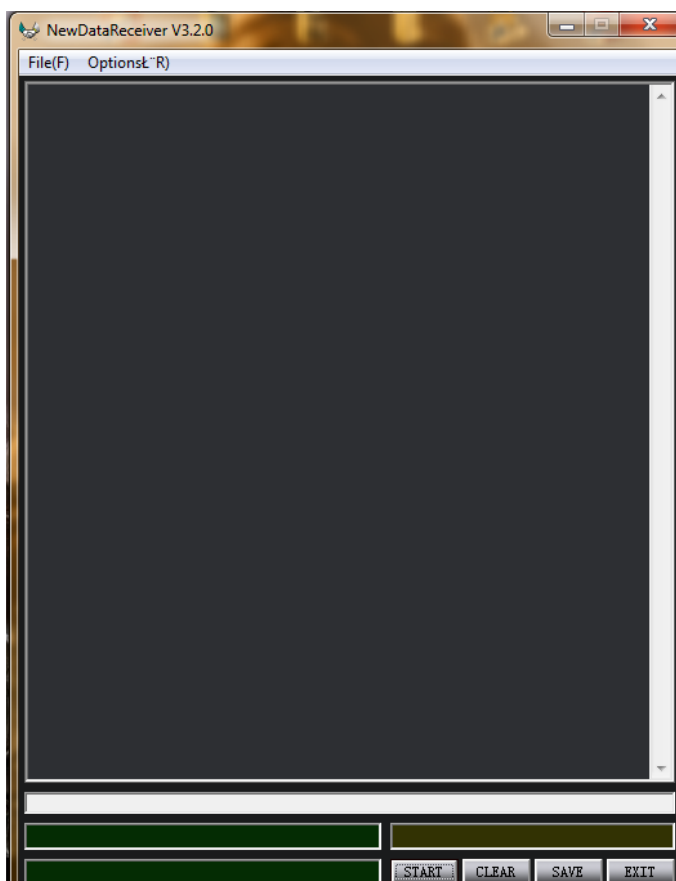


Hlavici stále přidržujeme ve spodní části a druhou rukou zmáčkne tlačítko na vrcholu hlavice, čímž odjistíme tělísko, které naráží na testovaný vzorek. Změřený údaj se okamžitě zobrazí na přístroji.

Obrázek 21 Práce s hlavicí [9]

3.5 Práce se softwarem

K přístroji je k dispozici software, který slouží k jednoduchému nahrání dat z přístroje DHT-100 do počítače a uložení do textových či tabulkových procesorů.



1. Připojíme datový kabel k přístroji DHT-100 do již zmiňované zdířky, druhý konec připojíme do počítače (sériový port RS-232).
2. Na počítači spustíme program New-DataReceiver



Obrázek 22 Ikona [10]

Obrázek 23 Prostředí programu [10]

3. Po spuštění programu:

Program má dvě nabídky FILE, kde najdeme uložení, ukončení programu a OPTIONS, které slouží na nastavení komunikace. Ve spodní části programu jsou čtyři tlačítka, START slouží ke spuštění komunikace, CLEAR smaže data na obrazovce, SAVE uloží data a EXIT vypne program.

a) Vybereme aktivní port, na kterém máme připojený datový kabel:

Options -> Serial Port -> Open Comm()

b) Nastavíme přenosovou rychlost mezi počítačem a tvrdoměrem:

Options -> Serial BaudRate -> 2400 bps

c) Po těchto dvou krocích je program připraven přijmout data. Na tvrdoměru tedy provedeme měření, nebo vyvoláme starší měření z paměti a stiskneme tlačítko tisk



Do programu se vypíše data:

@ U DHT-100 - Název přístroje (Program lze využít na více přístrojů)

U OPER:

MAT: 1 - Měřený materiál

DIR: 1 - Směr měření

IMPACT:D - Rázová hlavice

2013.03.16 21:06 - Datum a čas měření

LOCATION: 0001 - Uloženo v paměti na místě

NO. HL - Číslo měření a jednotka

1 322

2 255

3 386

AVG 321 - Průměrná hodnota z měření

END OF PRINT - Ukončení tisku

d) Po stisku tlačítka SAVE, lze data uložit do čtyř formátů pro případnou další práci v počítači (.xls, .doc, .rtf, .txt).

4. Měření tvrdosti tenkých kovových vrstev tvrdoměrem DHT-100

Většina tvrdoměrů má problém s měřením tenkých kovových vrstev. U tvrdoměru DHT-100 jako i u většiny dynamických tvrdoměrů je tento problém řešen pomocí rázové hlavice C s menší dynamikou úderu (Zhruba $\frac{1}{4}$ rázové energie rázové hlavice typu D).



Avšak i tahle rázová hlavice má určitá omezení a náležitosti, které musí být splněny pro co nejpřesnější výsledek měření. Hlavicí typu C se dají měřit tvrzené povrchy, povlaky, nátěry, tenké komponenty i náchylné na rázy. Velké problémy jsou při měření tenkostěnných trubek, které se při nárazu dopadového tělíska rozvibrují, a měření je nepřesné.

Obrázek 13 Rázová hlavice C [6]

Samozřejmostí je minimálně ještě jednou měření opakovat, abychom vykompenzovali případné chyby v měření. Měření nesmíme provádět dvakrát na stejném místě, neboť i zde dochází k hutnění materiálu, a tím i k nepřesnostem v měření.

Samotné měření probíhá totožně jako u klasického měření s dopadovou hlavicí typu D, odlišnosti jsou pouze ve vzorku, u kterého musí být splněny všechny podmínky a náležitosti ke správnosti naměřených hodnot.

- Minimální váha vzorku 1,5kg, na pevné podpoře 0,5kg a s vazební pastou 0,02kg
- Minimální tloušťka s vazební pastou 1mm a 0,2mm u tvrzené vrstvy
- Maximální drsnost povrchu dle ISO je N5
- Maximální tvrdost měřeného materiálu 1000HV

5. Postup měření tvrdosti kovových materiálů tvrdoměrem DHT-100

5.1 Postup měření vzorek A:

Tento text slouží pouze pro správné a bezchybné měření vzorku, nejedná se o komplexní návod, proto je před prací s přístrojem nutné si přečíst návod.

1. Z ochranného kufříku vyjmeme přístroj DHT-100, vložíme do něj dvě baterie AAA (po skončení měření baterie opět vyndáme). K přístroji připojíme rázovou hlavici typu D, konektor hlavice se připojuje do horní zdičky na pravé straně přístroje.
2. Do spodní zdičky na pravé straně přístroje připojíme datový kabel, který bude zároveň připojen k počítači do sériového portu RS-232.
3. Přístroj zapneme červeným tlačítkem a počkáme, až naběhne do základní obrazovky.
4. Zmáčkne tlačítko menu a nastavíme rázovou hlavici typu D. Směr měření bude svislý, měření budeme opakovat třikrát, jako materiál vybereme kalenou ocel, jednotku měření vybereme Vickerse HV a přejdeme k měření.
5. Měřený vzorek umístíme na laboratorní stůl.
6. Rázovou hlavici uchopíme za spodní gumovou část a za horní pohyblivou. Horní část přitáhneme ke spodní a opět vrátíme zpět, tím jsme natáhli pružinu vně rázové hlavice.
7. Rázovou hlavici umístíme kolmo na měřený materiál, hlavici přidržujeme za spodní gumovou část a druhou rukou zmáčkne tlačítko v horní části hlavice, čímž odjistíme dopadové tělísko.
8. Bod číslo sedm provedeme třikrát a přístroj nám vypíše průměrnou hodnotu. Budeme dávat pozor, abychom neprovedli měření dvakrát na stejném místě, neboť dochází ke ztuhnutí materiálu při nárazu indektoru.
9. Na počítači spustíme program New-DataReceiver, vybereme aktivní port a nastavíme přenosovou rychlost na 2400bps.
10. Na přístroji zmáčkne tlačítko pro tisk, které je vyobrazeno jako šipka dolů. Do programu se nahrají data, a ty posléze importujeme do tabulkového procesoru a vytvoříme porovnávací tabulku.

11. Vzor tabulky pro zápis měření:

Vzorek	Materiál	DHT – 100				HPO – 10			
		1.	2.	3.	×	d_1	d_2	d	HV

Tabulka 3 Vzorová tabulka {3}

Úlohy:

1. U daného materiálu zjistit tvrdost HV
2. Porovnat naměřené data s tvrdoměrem HPO 10, který je součástí laboratoře pedagogické fakulty Jihočeské univerzity.

5.2 Postup měření mikrotvrdosti vzorek B:

Tento text slouží pouze pro správné a bezchybné měření vzorku, nejedná se o komplexní návod, proto je před prací s přístrojem nutné si přečíst návod.

1. Z ochranného kufříku vyjmeme přístroj DHT-100, vložíme do něj dvě baterie AAA (po skončení měření baterie opět vyndáme). K přístroji připojíme rázovou hlavici typu C, konektor hlavice se připojuje do horní zdičky na pravé straně přístroje.
2. Do spodní zdičky na pravé straně přístroje připojíme datový kabel, který bude zároveň připojen k počítači do sériového portu RS-232.
3. Přístroj zapneme červeným tlačítkem a počkáme, až naběhne do základní obrazovky.
4. Zmáčkne tlačítko menu a nastavíme rázovou hlavici typu C. Směr měření bude svislý, měření budeme opakovat třikrát, jako materiál vybereme ocel, jednotku měření vybereme Vickerse HL a přejdeme k měření.
5. Měřený vzorek umístíme na laboratorní stůl.
6. Rázovou hlavici uchopíme za spodní gumovou část a za horní pohyblivou. Horní část přitáhneme ke spodní a opět vrátíme zpět, tím jsme natáhli pružinu vně rázové hlavice.
7. Rázovou hlavici umístíme kolmo na měřený materiál, hlavici přidržujeme za spodní gumovou část a druhou rukou zmáčkne tlačítko v horní části hlavice, čímž odjistíme dopadové tělísko.
8. Bod číslo sedm provedeme třikrát a přístroj nám vypíše průměrnou hodnotu. Budeme dávat pozor, abychom neprovedli měření dvakrát na stejném místě, neboť dochází ke zhutnění materiálu při nárazu indektoru.
9. Na počítači spustíme program New-DataReceiver, vybereme aktivní port a nastavíme přenosovou rychlost na 2400bps.
10. Na přístroji zmáčkne tlačítko pro tisk, které je vyobrazeno jako šipka dolů. Do programu se nahrají data, a ty posléze importujeme do tabulkového procesoru a vytvoříme tabulku.

Úlohy:

1. U daného materiálu zjistit tvrdost HL
2. Porovnat rozdíly v měření rázovou hlavicí typu D a C.

Závěr

V bakalářské práci jsem se zaměřil především na vypracování metodiky a teorie pro laboratorní měření tvrdosti kovových materiálů dynamickou metodou se zaměřením na přístroj DHT – 100. V následující části porovnávám tímto přístrojem získané hodnoty s ostatními hodnotami naměřenými pomocí jiných metod, které jsou v dnešní době považovány za standard. Toto porovnání bylo však velmi náročné, neboť dynamická metoda na rozdíl např. od Vickerse měří pouze vrchní vrstvu materiálu (nevtlačuje tělísko pod povrch). Dalším problémem byla neochota firem spolupracovat při porovnávání výsledků. Nakonec jsem měl možnost porovnat výsledky z tvrdoměru DHT-100 se třemi různými metodami ve dvou velkých firmách Siemens Industrial Turbomachinery (UCI, Dyna) a Emerson Climate Technologies (Rockwell). Všechny přístroje se musely před měřením kalibrovat, aby byl výsledek co nejpresnější. Samotné měření už probíhalo bez problémů a všechny výsledky se vešly do tolerance při porovnání s přístrojem DHT-100. Výsledky ale ovlivnila především povaha měřeného materiálu. Např. kdyby nebyl měřený vzorek dostatečně homogenní, jistě by rozdíly v tvrdosti byly podstatně výraznější.

Instalace software k přístroji DHT – 100 provázely od začátku samé komplikace, program vyžaduje nestandardní knihovny, které je potřeba doinstalovat. Další problém nastal v komunikaci mezi počítačem a přístrojem DHT-100. Bylo zapotřebí pokročilé nastavení sériových portů. Jako problém, který jsem nevyřešil, bych uvedl nesmyslné znaky, které program vypisuje při začátku komunikace s přístrojem. Ovšem tyto znaky jsou snadno smazatelné a nekomplikují použitelnost softwaru.

Podařilo se analyzovat a utřídit obecně platné zásady pro měření tvrdosti a do jisté míry provést komparaci (porovnání) hodnot tvrdosti ve stupnicích HL, HV, HB, HS, HRC, HRB.

V rámci práce bylo vybráno nejvhodnější měření pro laboratoř kovo PF JU za použití přístroje DHT-100.

V práci je srozumitelně a názorně popsáno dynamické měření tvrdosti tenkých kovových vrstev za pomoci rázové hlavice s menší dynamikou úderu.

Dále se nám podařilo nastínit základní principy dynamické ultrazvukové metody měření tvrdosti UCI.

Jsem přesvědčen, že daný metodicky pojatý text bude dobře použitelný ve vyučovací praxi v laboratoři kovo – pedagogické fakulty JU.

Seznam použité literatury

BENEDIKT, V., KOVAŘÍK, R., SKÁLOVÁ, J. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1.

Internetové zdroje:

Potenciální energie [online]. 2013 [cit. 2013-07-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Potenci%C3%A1ln%C3%AD_energie.

Shore - zkouška tvrdosti dle Shorea[online]. 2012 [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-shore.htm>.

Měření tvrdosti. Dostupné z: <http://www.testima.eu/prilohy/174/tvrdost.pdf>.

PORTABLE HARDNESS TESTING – PRINCIPLES AND APPLICATIONS. [online]. 2002 [cit. 2002-06]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/ecndt02/109/109.htm>.

Měření tvrdosti [online]. 2011 [cit. 2011-04-18]. Dostupné z: <http://www.merenitvrdosti.cz/tvrdost.html>.

Měření odlitků dynamickou metodou [online]. 2002 [cit. 2002-06-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-tvrdosti-odlitku-dynamickou-metodou.html>.

Tipy a pravidla měření tvrdosti [online]. 2013 [cit. 2013]. Dostupné z: http://www.struers.cz/default.asp?top_id=5&main_id=156&sub_id=225&doc_id=917&admin_language=19.

Přenosný tvrdoměr DHT-100 [online]. Dostupné z: <http://www.merenitvrdosti.cz/prenosny-tvrdomer-dht-100.html>.

JECH, V. Základní přehled metod měření tvrdosti kovů a povlaků. *Občasník Povrcháři* [online]. 2010 [cit. 2010-06]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201005_povrchari.pdf.

Seznam obrázků

[1] Vlastní tvorba obrázků v programu Autodesk Inventor

- Obrázek 1 Princip měření Brinell
- Obrázek 2 Nezpevněný a zpevněný materiál
- Obrázek 3 Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse
- Obrázek 4 Deformace okrajů HV
- Obrázek 5 Hroty vnikacího tělesa HV
- Obrázek 6 Princip měření tvrdosti podle Rockwella HRC
- Obrázek 7 Shoreův skleroskop
- Obrázek 8 Princip ultrazvukové metody měření tvrdosti UCI

[2] Obrázek 9 Dynamický tvrdoměr DHT-100

Portable Hardness Tester (DHT-100) [online]. Dostupné z: <http://www.made-in-china.com/showroom/sky19811230/product-detailfoYxaLMrjbAE/China-Portable-HardnessTester-DHT-100-.html>.

[3] Obrázek 10 Mitutoyo DT20 Durotwin plus

Rockwell Hardness Testing Equipment [online]. Dostupné z: http://www2.mitutoyo.de/fileadmin/user_upload/pdf/prospekte/0ENGLISH/haerteprefgeraete_en/Hardnesstesting_Equipment_PRE1101.pdf.

[4] Obrázek 11 Ge MIC 10 UCI

MIC 10 UCI Hardness Tester [online]. Dostupné z: <http://www.ge-mcs.com/en/hardness-testing/uci/mic-10.html>.

[5] Obrázek 12 Proceq Equo tip 2

Equotip [online]. Dostupné z: <http://www.corvib.com/Equotip/equotip.htm>.

[6] Vlastní obrázky - fotografie

- Obrázek 13 Rázová hlavice C
- Obrázek 14 Souprava na měření tvrdosti DHT – 100
- Obrázek 15 Zdíčky na zapojení kabelů

[7] Obrázek 16 Displej přístroje DHT-100 – obrázek okopírován ze stručného návodu, který je součástí soupravy na měření tvrdosti

[8] Obrázek 17, 18 Výběrové dopadové hlavice

Přenosný tvrdoměr DHT-100 [online]. Dostupné z:
<http://www.merenitvrlosti.cz/prenosny-tvrdomer-dht-100.html>.

[9] Obrázek 19, 20, 21 Práce s hlavicí

Leeb Hardness – Rebound Technique [online]. Dostupné z:
<http://www.proceq.com/?id=111>

[10] Vlastní tvorba obrázků print screen

- Obrázek 22 Ikona
- Obrázek 23 Prostředí programu

Seznam vzorců

(1) Hodnota tvrdosti dle Leeba

PORTABLE HARDNESS TESTING – PRINCIPLES AND APPLICATIONS. [online]. 2002 [cit. 2002-06]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/ecndt02/109/109.html>.

(2) Hodnota tvrdosti dle Brinella

BENEDIKT, V., KOVAŘÍK, R., SKÁLOVÁ, J. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1. 94. s.

(3) Hodnota tvrdosti dle Vickerse

BENEDIKT, V., KOVAŘÍK, R., SKÁLOVÁ, J. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1. 99. s.

(4) Úprava uhlopříček u deformace vtisku dle Vickerse

BENEDIKT, V., KOVAŘÍK, R., SKÁLOVÁ, J. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1. 101. s.

(5) Hodnota mikrotvrdosti dle Vickerse

BENEDIKT, V., KOVAŘÍK, R., SKÁLOVÁ, J. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1. 103. s.

(6) Výpočet potenciální energie

Potenciální energie [online]. 2013 [cit. 2013-07-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Potenci%C3%A1ln%C3%AD_energie.

(7) Měření skleroskopem ve stupnici HSC

Shore - zkouška tvrdosti dle Shorea[online]. 2012 [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-shore.htm>.

(8) Měření skleroskopem ve stupnici HSD

Shore - zkouška tvrdosti dle Shorea[online]. 2012 [cit. 2012]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-shore.htm>

(9) Frekvence ultrazvukové metody UCI

Měření tvrdosti. Dostupné z: <http://www.testima.eu/prilohy/174/tvrdost.pdf>.

Seznam tabulek

{1} Tabulka 1 Rockwellovy metody

BENEDIKT, V., KOVAŘÍK, R., SKÁLOVÁ, J. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1. 105. s.

{2} Tabulka 2 Možnosti měření rázových hlavic – tato tabulka je vyjmuta ze stručného návodu, který je součástí soupravy na měření tvrdosti

{3} Tabulka 3 Vzorová tabulka – vlastní tvorba tabulky

Seznam příloh

Příloha 1 Tvrdost srovnávací tabulka

Tvrdots srovnání [online]. 2013 [cit. 2013-21.02] Dostupné z :
http://en.wikipedia.org/wiki/Hardness_comparison

Příloha 1

Tvrdoost srovnávací tabulka

Podle Brinella HB (10 mm Kulový, 3000 kg zatížení)	Vickers HV (120 kg)	Rockwell C HRC (120 ° kuželky 150 kg)	Rockwell B HRB (1/16 "kulové 100kg)	Leeb HLD ^[1]
800	-	72	-	857
780	1220	71	-	850
760	1170	70	-	843
745	1114	68	-	837
725	1060	67	-	829
712	1021	66	-	824
682	940	65	-	812
668	905	64	-	806
652	867	63	-	799
626	803	62	-	787
614	775	61	-	782
601	746	60	-	776
590	727	59	-	770
576	694	57	-	763
552	649	56	-	751
545	639	55	-	748
529	606	54	-	739
514	587	53	120	731
502	565	52	119	724
495	551	51	119	719
477	534	49	118	709
461	502	48	117	699
451	489	47	117	693
444	474	46	116	688
427	460	45	115	677
415	435	44	115	669
401	423	43	114	660
388	401	42	114	650
375	390	41	113	640
370	385	40	112	635
362	380	39	111	630
351	361	38	111	621
346	352	37	110	617
341	344	37	110	613
331	335	36	109	605
323	320	35	109	599
311	312	34	108	588
301	305	33	107	579

293	291	32	106	572
285	285	31	105	565
278	278	30	105	557
269	272	29	104	550
261	261	28	103	542
258	258	27	102	539
249	250	25	101	530
245	246	24	100	526
240	240	23	99	521
237	235	23	99	518
229	228	22	98	510
224	221	21	97	505
217	217	20	96	497
211	213	19	95	491
208	209	18	94	485
203	201	17	94	482
200	199	16	93	478
196	197	15	92	474
191	190	14	92	468
187	186	13	91	463
185	184	12	91	461
183	183	11	90	459
180	177	10	89	455
175	174	9	88	449
170	171	7	87	443
167	168	6	87	439
165	165	5	86	437
163	162	4	85	434
160	159	3	84	430
156	154	2	83	425
154	152	1	82	423
152	150	-	82	420
150	149	-	81	417
147	147	-	80	413
145	146	-	79	411
143	144	-	79	408
141	142	-	78	405
140	141	-	77	404
135	135	-	75	397
130	130	-	72	390
114	120	-	67	365