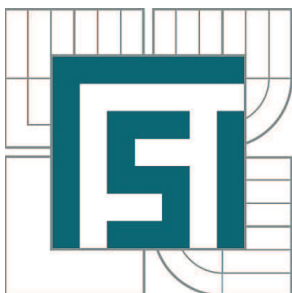


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MĚŘENÍ TVRDOSTI KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

HARDNESS MEASUREMENT OF METAL MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ TRČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Trčka

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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:

Měření tvrdosti kovových materiálů

v anglickém jazyce:

Hardness measurement of metal materials

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování literární studie zaměřené na měření tvrdosti kovových materiálů s rozborem významu pro strojírenskou praxi. Součástí práce bude i popis, odzkoušení, kalibrace a nastavení měřicího zařízení fy.Zwick.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na měření tvrdosti. Součástí práce bude i praktické měření na tvrdoměru fy.Zwick.

Seznam odborné literatury:

1. BÍLEK, K., Š. LUDVÍK a J. LUDVÍK. Zkoušky tvrdosti [online].2002 [cit. 2010-04-12]. Dostupné z WWW:<www.metrotest.cz/zkousky_tvrlosti.pdf>
2. Studijní opora: Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů – dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/index.htm>>
3. BLÁHOVÁ, O. a J. SAVKOVÁ. Nanoindentačné merania tenkých vrstev - 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>
4. VELES, P. Mechanické vlastnosti a zkúšanie kovov, SNTL, Praha, 1985, str. 297–320.
5. FOREJT, M, A. HUMÁR, M. PÍŠKA a L. JANÍČEK. Experimentální metody [online]. Brno. 2003 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf>.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

TRČKA Tomáš: Měření tvrdosti kovových materiálů.

Tvrdost je mechanická vlastnost každého kovového materiálu, která ovlivňuje jeho chování. Existuje mnoho metod měření. Každá má své výhody, nedostatky a možnosti použití. Nejznámější jsou zkoušky dle Brinella, Vickerse a Rockwella. Novější metody s přenosnými tvrdoměry jsou UCI, TIV a dynamická metoda dle Leebe. Zkoušky probíhají mechanickým tlakovým zatížením pomocí vnikacího tělesa (indentoru) z tvrdšího materiálu než samotný zkoušený materiál. Experimentální měření bylo provedeno na třech typech výměnných břitových destiček ze slinutých karbidů o rozdílných jmenovitých tvrdostech pomocí metody Vickers při zatížení 10 kp a 30 kp. Největší hodnota tvrdosti byla naměřena u destičky SMG02 a to 1988 HV10.

Klíčová slova: slinuté karbidy, indentor, Vickers, Knoop, UCI, TIV, Rockwell, Brinell

ABSTRACT

TRČKA Tomáš: Hardness measurement of metal materials.

The hardness is the mechanical property of each metal material that affects his behaviour. There are many methods of measurement. Each method has its advantages, shortcomings and possibilities of use. The best known tests are according to Brinell, Vickers and Rockwell. The newer methods with portable hardness tester are UCI, TIV and the dynamic method by Leeb. The tests are carried out by mechanical pressure load using the impact body (indenter) of the harder material than the test material. The experimental measurement was executed on the three types of cutting inserts with different nominal hardness made from cemented carbides using the Vickers method with the load of 10 kp and 30 kp. The highest value of hardness was measured on the cutting insert SMG02 - 1988 HV10.

Keywords: cemented carbides, indenter, Vickers, Knoop, UCI, TIV, Rockwell, Brinell

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TRČKA, Tomáš. *Měření tvrdosti kovových materiálů*. Brno, 2015. 33s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření. Vedoucí práce doc. Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 29.5.2015

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph. D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce a panu Vojtěchu Řiháčkovi za pomoc při experimentální části. Dále chci poděkovat společnosti VYDONA s.r.o. za poskytnutý materiál a celé rodině a blízkým za podporu během studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

| | |
|--------------------------------------|----|
| ÚVOD | 8 |
| 1 ROZBOR SOUČÁSTÍ | 9 |
| 2 MĚŘENÍ TVRDOSTI | 10 |
| 2.1 Jehlan | 12 |
| 2.1.1 Metoda Vickers | 12 |
| 2.1.2 Metoda Knoop | 14 |
| 2.1.3 Ultrazvuková metoda –UCI | 16 |
| 2.1.4 Optická metoda – TIV | 18 |
| 2.1.5 Metoda Berkovič | 20 |
| 2.2 Kulička | 21 |
| 2.2.1 Metoda Brinell | 21 |
| 2.2.2 Kladívko Poldi | 24 |
| 2.2.3 Metoda Leeb | 25 |
| 2.3 Kulička a kužel | 28 |
| 2.3.1 Metoda Rockwell | 28 |
| 3 EXPERIMENT | 31 |
| 4 ZÁVĚRY | 33 |

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

ÚVOD [2], [6], [11], [13], [28]

Díky novým technologiím a materiálům se dokáží vyrábět stále modernější, lehčí, tvarově složitější a propracovanější součásti.

Nepostradatelným materiálem jsou kovy. Součásti z tohoto materiálu musí splňovat určité požadavky, ať už z hlediska estetičnosti, rozměrového provedení, spolehlivosti, tak zejména z hlediska bezpečnosti a funkčnosti dané součásti. Výroba a zpracování kovových součástí vyžaduje stále nové suroviny či recyklovaný materiál a proto je zefektivnění využití navržených součástí zcela důležité. Tento trend, snižování výrobních nákladů a zvyšování



Obr. 1 Tvrdoměr Brinell [2]

požadavků na kvalitu, lze docílit poznáním jejich mechanických vlastností a chování při různých podmínkách zatěžování, které je odlišné pro různé materiály především z důvodu rozdílném chemického složení a morfologie dané slitiny. Mechanické vlastnosti se určují pomocí stejnojmenných zkoušek, které mohou být mimo měření tvrdosti také zkouška tahem či rázem v ohybu.

Zkouška tvrdosti se provádí ve většině případů přímo na zkoušeném tělese a není proto nutné vyrábět zvláštní zkušební vzorek, jelikož základní požadavek je minimální porušení povrchu, což dnešní tvrdoměry dokáží splnit. Proto se s ohledem na velikost a funkčnost součásti většinou jedná o zkoušky nedestruktivní, což je hlavně z ekonomického hlediska velmi vhodná vlastnost. Dva velikostně rozdílné typy tvrdoměrů jsou na obrázcích 1 a 3.

Povrch zkoušeného materiálu se při zkoušce mechanicky zatěhuje tlakem vnikacího tělíska z tvrdšího materiálu než samotný zkoušený materiál. Jeden z nejpoužívanějších vnikacích tělísek je na obrázku 2. Výsledek tlakového působení indentoru se kvantitativně vyjádří jako výsledná tvrdost. Existují odlišné metody měření, kdy každá má své určité výhody pro dané podmínky. Měření tvrdosti je pro strojírenství nesmírně důležité.



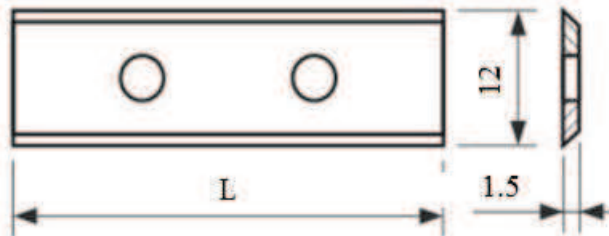
Obr. 2 Indentor dle Vickerse [6]



Obr. 3 Přenosný tvrdoměr (metoda Leeb) [13]

1 ROZBOR SOUČÁSTÍ [3], [9], [27]

Zkoumanými součástmi jsou výměnné břitové destičky (VBD), které se staly nepostradatelným prvkem pro strojírenské nástroje. Po znehodnocení - zejména otupení - mohou být měněny novými stejného druhu a tělo nástroje přitom zůstává nepoškozené. Navíc tělo nemusí být z kvalitního materiálu jako bez výměnných břitových destiček, jelikož sám se na řezném procesu nepodílí a tím se nemusí použít nástrojová ocel, což má za příčinu nižší konečné výdaje. Celý obráběcí nástroj se tak skládá z těla a výměnných břitových destiček.



Obr. 1.1 Schéma VBD [27]

Existují také břitové destičky, které se pájí přímo na těla fréz., ale jejich broušení je možno pouze přímo s tělem nástroje, a tím při každém ztupení destiček musí být celý nástroj poslán na broušení.



Obr. 1.2 Falcovací fréza [9]

VBD, které se podrobí měření tvrdosti, slouží k obrábění měkkých materiálů, zvláště dřeva. Vyrábí se různé délky, šířky 12 mm, tloušťky 1.5 mm, se dvěma břity a dvěma otvory pro upevnění do frézovací hlavy, viz obr. 1.1. Jsou vhodné zejména na hoblovací hlavy fréz, z důvodů frézování rovinných ploch, jelikož nemají žádný tvarový profil. Se společným použitím VBD čtvercového profilu, lze měřené destičky použít do falcovací hlavové frézy, kterou je možno vidět na obr. 1.2. Falcovací frézy jsou určeny pro frézování rovinných ploch a osazení.

Měřeny budou 3 typy VBD ze slinutých karbidů, z nichž každá má určitou jmenovitou tvrdost a s tím i spojenou strukturu a chemické složení:

- SMG02 - svými vlastnostmi je vhodná pro obrábění dřevotřísky a polotvrdých vláknitých desek až vysoce zhuštěných desek díky submikronové zrnitosti a nízkému obsahu kobaltu
- MG18 - dává mimořádnou houževnatost. Díky tomu lze vybrousit ostří s vysokým úhlem. Je nejvhodnější zejména pro měkké dřevo
- KCR08 – svou univerzálností vhodná téměř pro všechny typy dřeva, zejména však pro dřevo tvrdé.

Z těchto doporučení je možné vypořádat orientační tvrdost destiček. Měla by narůstat s rostoucími požadavky na obráběný materiál. Ale právě s rostoucí tvrdostí materiálu všeobecně klesá jeho houževnatost. Stává se křehčím.

Metody, které nemají pro měření tvrdosti slinutých karbidů a kovů žádný význam, nebudou dále rozebírány. Jedná se o metody Shoreho – Skleroskop a Durosop, kterými se měří tvrdosti pryží a plastů, a Martenze u vrypové zkoušky v případě měření minerálních látek.

2 MĚŘENÍ TVRDOSTI [11], [12], [18], [19], [25], [28], [31], [32]

Tvrdoost lze definovat jako odolnost materiálu proti deformacím jeho povrchu vyvolané vnikáním cizího, geometricky daného tělesa do jeho povrchu. Jedná se tedy o vlastnost každého materiálu.

Na měření mají vliv nejrůznější faktory. Zejména pružné vlastnosti měřeného materiálu (modul pružnosti v tahu 'E', modul pružnosti ve smyku 'G' a modul objemové roztažnosti 'K') a plastické vlastnosti měřeného materiálu (deformačního zpevnění). Dva zmíněné faktory právě vyjadřují odpor proti vnikání cizího tělesa a jsou souhrnem mnoha činitelů, z nichž nejdůležitější jsou:

- drsnost povrchu - je zcela důležitá při měření mikrovrdoosti a poté zejména nanotvrdoosti. Drsnost - měřítko hodnocení povrchu - závisí na přípravě povrchu zkoušeného materiálu. Její hodnota by měla být co nejmenší pro maximální přesnost měření. Nedostatek v podobě vysokého čísla drsnosti lze částečně kompenzovat metodou či silou, která zajistí velký vtisk indentoru do zkušebního tělesa
- substruktura – definovaná typem krystalické mřížky, vazby mezi atomy a mřížkovými poruchami (vakance, interstice, dislokace a dále plošně či prostorové poruchy)
- mikrostruktura - definovaná hlavně velikostí zrna, morfologickou nerovnoměrností (heterogenitou), nerovnovážeností struktury, množstvím a tvarem příměsí. Právě velikost zrna říká, jaká metoda a velikost vtisku bude nejlepší
- vnitřní napětí – závisí na fázových přeměnách, nerovnoměrném ochlazování či tváření samotného materiálu bez následujícího normalizačního žhání
- teplota měřeného materiálu - zásadním způsobem ovlivňuje veškeré mechanické vlastnosti materiálu. Tyto změny v mechanických vlastnostech mají zásadní dopad na výslednou naměřenou tvrdoost. Od určitých hodnot teplot, v závislostech na typu materiálu, se mění struktura a tudíž i jeho vlastnosti.

Měření se provádí rozdílnými metodami a existuje více kritérií, podle kterých lze měření tvrdoosti rozdělit. Liší se materiálem a tvarem vnikajícího tělesa, velikostí použitého zatížení, způsobem vyčíslení samotné tvrdoosti zkoušeného materiálu a prováděním zkoušky. Rozdělení metod měření tvrdoosti tedy není naprosto jednoznačně dané. V zásadě platí, že jednotlivé metody je možno současně zařadit do více kategorií podle různých hledisek.

Nejpoužívanějším materiálem indentoru je diamant vzhledem k jeho vysokému modulu pružnosti. To má své opodstatnění v přesnosti měření, kdy se indentor deformuje jen velmi nepatrně. Jiný použitelný materiál indentoru v případě měření tvrdoosti tvrdokovu není možný.

Jedno z nejrozšířenějších kritérií rozdělení zkoušek je podle rychlosti zatěžování na statické nebo dynamické, které se dají dále dělit podle typu deformace zkoušeného povrchu na elastické nebo plastické. Velice rozšířené, jak v technické praxi, tak ve výzkumu, jsou zkoušky statické pro svojí přesnost, jednoduchost a reprodukovatelnost. U statických zkoušek se indentor vtačuje klidnou silou ve směru kolmém ke zkoušenému povrchu, zatímco u dynamických metod indentor proniká do zkoumaného povrchu rázem vedeným kolmo, proto se někdy těmto metodám říká také rázové zkoušky. Statický tvrdoměr lze vidět na obrázku 2.1.

Další rozdělení zkoušek tvrdoosti je možné podle principu provádění zkoušky na vnikací, odrazové a vrypové. U vnikacích metod je cizí těleso vtačováno do zkoušeného povrchu materiálu pod určitou zatěžující silou. Tvrdoost u vnikacích metod

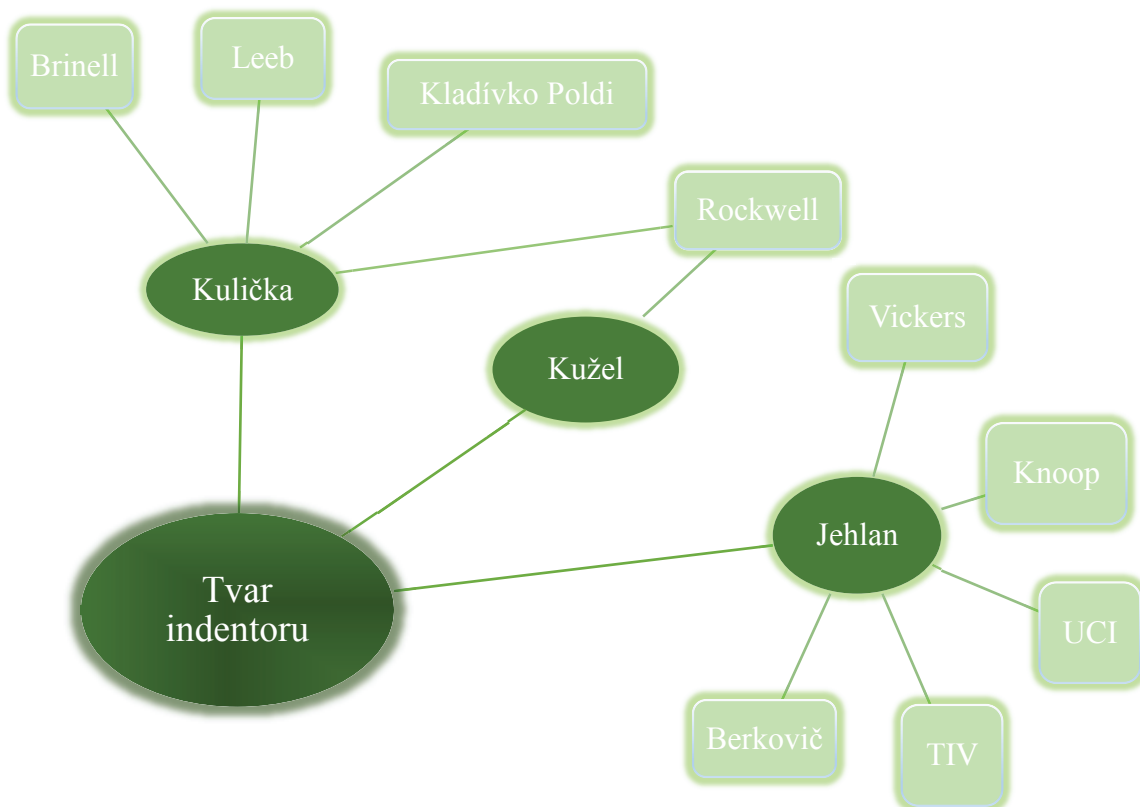


Obr. 2.1 Statický tvrdoměr [12]

je definována jako poměr mezi použitým zatížením a plochou průmětu vtisku (metody Brinell, Vickers, Knoop) nebo u metody Rockwell je tvrdost určována z trvalé hloubky vtisku přímo na tvrdoměru. Odrazové zkoušky jsou založeny na ztrátě energie během kontaktu zkušebního tělesa od měřené plochy.

Zkoušky tvrdosti nemusí být pouze prováděny na stacionárních tvrdoměrech, ale i na přenosných tvrdoměrech, o které zájem bezesporu roste. Mají nezastupitelnou roli měření v průmyslové výrobě a to ze dvou hlavních důvodů. Pro ověření, zda danému výrobku o určitém materiálu odpovídá jeho tvrdost nebo v druhém případě o zjištění vlastnosti z hlediska tvrdosti nového materiálu. Přenosné tvrdoměry mohou být ovlivněny mnoha vlivy a jejich výsledná tvrdost může být velmi přibližná a tak je nutné tyto nepřesnosti eliminovat. Při jejich eliminování se dají očekávat velice přesné vyhodnocení výsledné tvrdosti. Avšak dnes už jsou tyto přenosné zařízení pro měření tvrdosti velmi dobře automatizované a tím chyby eliminované s výjimkou struktury a opracování povrchu, což přístroj nedokáže rozpoznat. Přenosné tvrdoměry fungují ve třech základních principech pomocí ultrazvuku, dynamických účinků a pomocí optické metody. Výhodou u prvních dvou jmenovaných metod je poměrně malý vpich, což umožňuje měření nejružnějších vrstev; rychlost měření; ale zase se zde projevuje výrazný vliv elastických deformací, které se musejí eliminovat kalibrováním přístroje a to pro každý materiál zvlášť. Přenosné tvrdoměry se staly jedním z pilířů měření tvrdosti, jelikož jsou pro průmysl velice důležité a jejich možnosti jsou v současnosti nezastupitelné.

Z důvodu opakovatelnosti stejných tvarů indentorů u stacionárních a přenosných tvrdoměrů, bylo zvoleno rozdělení měření tvrdosti kovových materiálů podle tvaru vnikacího tělesa, který je obvykle jednoduchého geometrického tvaru. Pro každý tvar se sledovala jednoduchost a reprodukovatelnost jejich výroby či optimální využití vlastností materiálu. Takové rozdělení metod je na obrázku 2.2.



Obr. 2.2 Rozdělení metod podle tvaru indentoru

2.1 Jehlan [7]

Jehlan je nejpoužívanějším tvarem indentoru při měření tvrdosti. Používá se jako 4-boký i jako 3-boký.

Vnikacího těleso 4-bokého tvaru jehlanu (pyramidy) respektuje tvar krystalu diamantu a tak i jeho maximální tvrdost. Volbou tohoto tvaru se také sledovala možnost stanovování tvrdosti nezávislé na velikosti použité zkušební síly (podobnost vtisků). Nejpřednějším představitelem je Vickers. Další metody, jako UCI, TIV aj., byly vyvinuty a zdokonaleny právě na základě této metody.

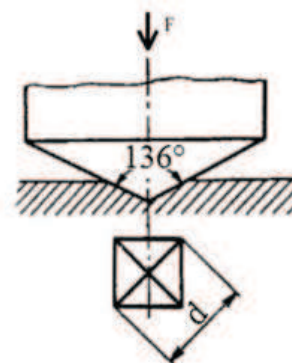
Třiboký jehlan, v praxi ne zcela moc rozšířený, se používá při měření tvrdosti Berkovičovou metodou, která má uplatnění při měření mikrotvrdosti a při dalším snižování zátěžné síly nanotvrdosti.

Specifický je indentor ve tvaru rohu krychle, který je hodně ostrý. Díky tomu vyvolá velké napětí a deformaci v okolí vtisku. Toho se právě využívá u křehkých materiálů, kdy v okolí vtisku vzniknou měřitelné trhlinky, pro určení lomové houževnatosti.

2.1.1 Metoda Vickers [11], [18], [25], [28], [32], [33]

Historie metody sahá do 30.let 20.století, kdy byla popsána Smithem a Sandlandem. Na tento impuls byl zkonstruován a vyroben tvrdoměr pro tuhle metodu ve firmě Vickers.

Podstata metody je ve vtlačování diamantového vnikacího tělesa, který má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a s daným vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami $136^\circ \pm 0.5^\circ$, do povrchu měřeného materiálu pod zátěžnou rovnoměrnou silou 'F' po danou dobu, viz obr. 2.3. Aby hodnota tvrdosti dle Vickerse byla co nejbližší hodnotám změřených níže uvedenou metodou Brinell a aby tření mezi indentorem a materiálem co nejméně ovlivňovalo samotné měření, je indentor vyroben právě s úhlem 136° . Výsledné vtisky by měly být pravidelné čtyřhranné. Pravidelnost vtisku může být ovlivněna řadou faktorů, kde jeden z nejčastějších je drsnost povrchu a morfologie materiálu. Zkušební zatěžující síla se pohybuje v rozmezí 0.01 N (1 gp) až 981 N (100 kp) a plná síla je aplikovaná po dobu 10-15 s. Jednotka p (pound) je dnes už nepoužívaná jednotka síly, ale pro tvrdost se stále používá.



Obr. 2.3 Schéma metody [32]

Vickersova tvrdost má označení 'HV', vyjadřuje se bezrozměrně a je dána:

$$HV = \frac{0,102 \cdot F}{A_p} \quad (2.1)$$

kde: F - zatěžující síla [N]
A_p - plocha vtisku [mm²]

Z uvedeného vzorce (2.1) je zřejmé, že hodnota tvrdosti má povahu napětí.

Plocha povrchu vtisku se stanoví:

$$A_p = \frac{d^2}{2 \cdot \cos 22^\circ} = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{1,8544} \quad (2.2)$$

kde: d - střední hodnota úhlopříčky vtisku [mm] vyjádřená jako:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

kde: d₁, d₂ - délky úhlopříček vtisku [mm]

Po dosazení plochy 'A_p' do vzorce (2.1) se dostane konečný výpočtový vztah:

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2} \quad (2.3)$$

Pro stanovení výsledné tvrdosti se v praxi nepoužívá výpočet, ale tabulky, kde podle délky střední hodnoty úhlopříčky 'd', měřené po odtížení, a použité zatěžující síly 'F' se odečte uvedená tvrdost. Délky úhlopříček se na rovném povrchu nesmí lišit o více, než 5 % střední hodnoty.

Metoda teoreticky nezávisí na velikosti zatěžující síly, protože všechny vtisky jsou navzájem geometricky podobné v určitém rozsahu zatěžujících sil, kdy se naměří stejné hodnoty 'HV'. Tento jev vyjadřuje Kickův zákon podobnosti:

$$F = a \cdot d^2 \quad (2.4)$$

kde: a - konstanta závislá jen na měřeném materiálu a na tvaru indentoru

Pro indentor používaný u jmenované metody je:

$$a = \frac{F}{d^2} = \text{konstant} \quad (2.5)$$

Vztah (2.5) se dosadí do vztahu (2.34) a tím se potvrdí Kickův zákon pro metodu Vickers:

$$HV = 0,189 \cdot a = \text{konstant} \quad (2.6)$$

Zákon však neplatí u velmi malých zátěžných sil, při měření nanotvrdosti, kdy síly jsou závislé na naměřené hodnotě 'HV' vlivem velikosti odpružení resp. vlivem deformačního zpevnění měřeného materiálu.

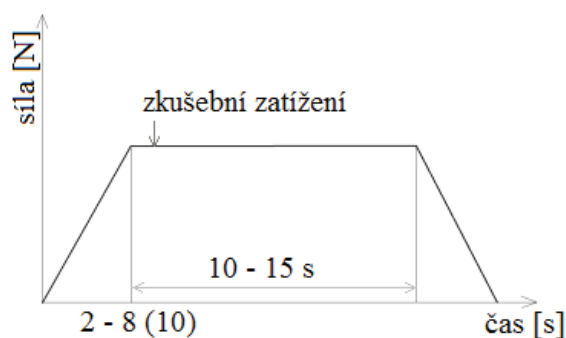
Zatěžující síly mohou být různě velké a jsou klasifikovány do třech oblastí, viz tab. 2.1. Jaká zatěžující síla se zvolí, záleží na tloušťce měřeného materiálu a na jeho předpokládané tvrdosti, přičemž tloušťka vzorku musí být nejméně 1,5 násobek délky úhlopříčky a na protilehlém povrchu vzorku nesmí být vidět stopy způsobené prováděním zkoušky. Vzdálenost středů dvou sousedních vtisků musí být nejméně 3 násobek velikosti úhlopříčky, což platí pro ocel, litinu a měděné slitiny. U lehkých kovů musí být velikost větší. Další podmínkou je, aby vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku byla nejméně 2,5 násobek velikosti úhlopříčky pro ocel a minimálně 3 násobek velikosti úhlopříčky pro cín a lehké kovy. U zkoušek prováděných na zakřivených plochách se používají opravné součinitele, které jsou uvedeny v normě. Novější tvrdoměry automaticky počítají se součiniteli při zadání průměru zakřivené plochy.

Tab. 2.1 Členění metody

| zkušební zatížení [N] | symbol tvrdosti | označení |
|-------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| F ≥ 49.03 | ≥HV 5 | zkouška tvrdosti |
| 1.961 ≤ F < 49.03 | HV 0.2 až < HV 5 | zkouška tvrdosti při nízkém zatížení |
| 0.09807 ≤ F < 1.961 | HV 0.01 až HV < 0.2 | zkouška mikrotvrdosti |

Povrch u zkoušeného materiálu musí být pro zkoušku hladký a rovný, bez okují a zcela odmaštěný. Tato příprava povrchu se provádí, aby se co nejvíce omezila změna vlastností povrchové vrstvy například broušením, ohřevem a leštěním povrchu. Konečná úprava povrchu musí umožnit bezproblémové stanovení délky obou měřených úhlopříček vtisku. Arbitrážní teplota, při které se zkouška provádí, musí být v rozsahu 23° ±5° a musí být použity normalizované zatížení. Měřený předmět musí být položen na tuhé podložce a zabezpečen, aby se během zkoušky nepohnul.

Indentor je zatlačován zatížením, které je kolmé k povrchu vzorku bez rázů a chvění. Interval od začátku zatěžování do dosažení zkušební síly se musí pohybovat v rozsahu 2 až 8 s, u zkouškách při nízkém zatížení nesmí překročit 10 s. Interval působící zkušební síly musí být v rozsahu 10 až 15 s. Pro některé materiály platí delší čas působící síly, který ale musí



Obr. 2.4 Průběh zatížení [18]

být dodržován s určitou tolerancí ± 2 s. Celý průběh zatížení je možno vidět na obrázku 2.4.

Pro běžné zatížení hodnoty 294 N (30 kp) a trvání zkušebního zatížení 10-15 s se tvrdost označí základní značkou HV. Při odlišné délce zkušebního zatížení a jiné zatěžující síle, se musí označení doplnit hodnotou zkušební síly a její délkou působení ve tvaru HV F / t. Například můžeme použít označení 800 HV 20/30, které označuje zkušební zatížení rovnající se 20 kp (196.1 N) po dobu

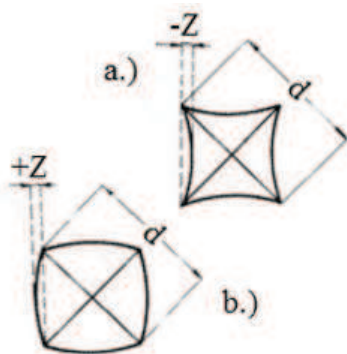
trvání 30 s a při těchto hodnotách výslednou naměřenou tvrdost 800.

Průmět plochy vtisky nemusí být vždy geometricky přesného tvaru, ale mohou být různě deformované podle stupně zpevnění materiálu pro měkké či tvrdé materiály, viz obr. 2.5. V takovém případě se hodnota úhlopříček koriguje a modifikovaný výpočet pro velikost tvrdosti je:

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{(d + Z \cdot \sqrt{2})^2} \quad (2.7)$$

kde: Z - vzdálenost mezi geometricky přesnou a skutečnou hranou vtisku [mm]

Jako u všech měření mohou nastat chyby, které ovlivňují naměřenou hodnotu. Chyby způsobené odchylkou zatěžovací síly, chyby způsobené nedodržením předepsaných zkušebních podmínek, chyby při měření délky úhlopříčky či odchylka od vrcholového úhlu stěn indentoru, který může mít odchylku $\pm 0.5^\circ$. Při této odchylce bude chyba v naměřené hodnotě tvrdosti $\pm 0.2\%$.



- a) nezpevněný materiál
- b) zpevněný materiál

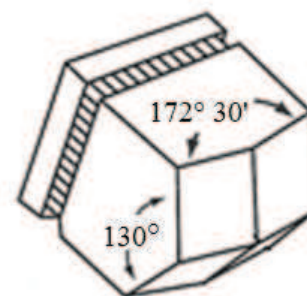
Obr. 2.5 Deformované vtisky [32]

Metoda je velmi přesná, jen minimálně závislá na zatížení, a vhodná pro všechny tvrdosti. Vtisky jsou velmi malé, povrchní, nezasahují do velké hloubky, tím neporušují povrch a lze měřit tvrdost bez porušení i na opracovaných výrobcích. Je vhodné i po sníženém zatížení měřit povrchové vrstvy po tepelnochemickém zpracování. Nevýhody metody lze najít v nutnosti dobře připraveného povrchu a s tím spojené nízké drsnosti a v měření hrubozrnných a nehomogenních struktur, kdy se může dostat velmi ovlivněná hodnota tvrdosti, závislá na fázi, kterou indentor právě zasáhne. Měření takových materiálů však není předmětem této práce a jakékoliv ovlivnění nehomogenitou není možné.

2.1.2 Metoda Knoop [7], [15], [16], [18], [25], [32]

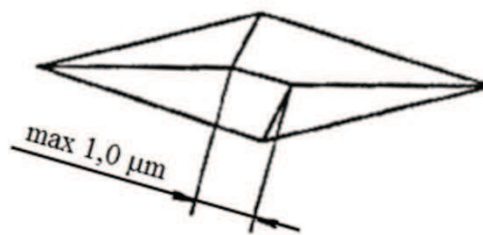
Knoopova metoda byla vymyšlena v roce 1939 a řadí se tedy mezi mladší metody. Pro metodu je závazná norma ČSN EN ISO 4545: *Zkouška tvrdosti podle Knoop*, která má 3 části a druhou normou je ČSN EN ISO 4516: *Kovové a jiné anorganické povlaky- Zkoušky mikrotvrdosti podle Vickers* a *podle Knoop*.

Knoopova metoda se od Vickersové se liší tvarem indentoru, který má také tvar čtyřbokého jehlanu, ale s kosočtverečnou základnou a vrcholovými úhly $172.5^\circ \pm 0,3^\circ$ a $130^\circ \pm 0,3^\circ$, které svírají dvojice protilehlých hran, viz obr. 2.6. Jelikož zcela přesné



Obr. 2.6 Indentor dle Knoop [15]

vyrobení indentoru není možné, společně s dovolenými odchylkami ve vrcholových úhlech se dovoluje délka společné hrany mezi dvěma protilehlými stěnami maximálně 1,0 μm. Tato situace pro názornost vyobrazena na obr. 2.7 ve velkém zvětšení.



Obr. 2.7 Obvyklý tvar indentoru při zvětšení [7]

Metoda se řadí mezi statické a vnikací tělíska je tedy vtlačováno kolmo do povrchu vzorku pod zatížením silou 'F'. Zkušební těleso musí být uloženo na tuhé podložce a zabezpečeno proti pohnutí. Rychlost vnikání indentoru musí být v rozmezí 15 μm/s až 70 μm/s. Doba od začátku zatěžování do dosažení zkušebního zatížení nesmí překročit 10 s a zkušební zatížení musí být aplikováno v intervalu 10-15 s. Případná série vtisků musí být od sebe vzdálená minimální hodnotou trojnásobku kratší úhlopříčky, bráno od středu jednotlivých vtisků. Vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být nejméně 2,5 násobek kratší úhlopříčky.



Obr. 2.8 Reálný vzhled vtisku [16]

Vtisk, který indentor zanechá, má tvar protáhlého kosočtverce s poměrem úhlopříček 7:1. Na obrázku 2.8 je možno vidět vtisk vytvořen na materiálu zirkonia. Metoda je vhodná pro měření mikrotvrlosti, jelikož poměr délky úhlopříčky k hloubce je 30 a tím se získá relativně velký průmět vtisku s malou hloubkou. Velikost zkušebního zatížení se pohybuje od 0.0981 N (10 gp) do 19.614 N (2 kp). Běžně se používá zatížení do 1 kp.

Vyjádření tvrdost dle Knoop je jako poměr zatížení k ploše vtisku:

$$HK = K \cdot \frac{F}{d_L^2 \cdot c} = 1,451 \cdot \frac{F}{d_L^2} \quad (2.8)$$

kde: d_L - délka delší úhlopříčky [mm]
 c - konstanta vnikacího tělesa:

$$c = \frac{\tan \frac{\beta}{2}}{2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2}} = 0,07028 \quad (2.9)$$

kde: α, β - úhly protilehlých stěn indentoru [°]
 K - konstanta vyjadřující převod z 'N' na 'kp':

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{9,8067} = 0,102 \quad (2.10)$$

kde: g - gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

Jak je vidět ze vzorce (2.8), tak pro výpočet tvrdosti touto metodou se využívá velikost větší úhlopříčky změřené po odtažení zkušebního zatížení. Proto musí být umožněno přesné změření. Zkušební vzorek proto musí být rovný, hladký, bez mazadel a jiných tělísek. Vzhledem k nízkým hodnotám zatížení musí být vzorek připraven metalografickým výbrusem, u něhož nedojde k tepelnému a deformačnímu ovlivnění. Proto se výbrus provádí broušením za mokra

a následným leštěním na diamantových pastách či elektroleštěním. Přesná příprava je zvolena dle určitého materiálu. Z toho plyne, že se ve většině případů jedná o destruktivní zkoušku.

Tvrдость dle Knoop se označuje 'HK' a je rovněž bezrozměrná. Před symbolem HK je vypočtená výsledná tvrďost. Za symbolem následují číslice charakterizující velikost zkušebního zatížení a doba působení tohoto zatížení. Na rozdíl od metody Vickers se zde musí za symbol uvést alespoň hodnota zkušebního zatížení a také doba působení, liší-li se od předepsané hodnoty. Například 500 HK 0,1 nebo 500 HK 0,1 / 20 vyjadřuje v obou případech naměřenou tvrďost 500 HK za zkušebního zatížení o velikosti 0,1 (kp), ale v první případě bylo zatížení aplikováno po dobu předepsaných 10-15 s, zatímco v druhém případě po dobu 20 s.

Chyby vzniklé během měření mají obdobné příčiny jako u Vickersovy metody. Jsou zde kladeny větší nároky na ostrot hran indentoru a na úpravě měřeného povrchu vzhledem k mělkosti otisku, kdy může odčítání úhlopříčky činit problém.

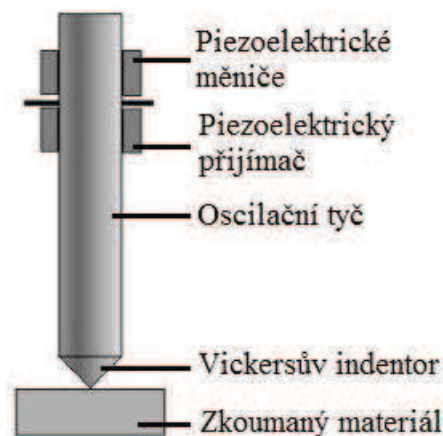
Metoda je určena pro mikrotvrďosti a měření tenkých vrstev, díky výše zmíněnému poměru délky úhlopříčky k hloubce vtisku, který je 30, zatímco u metody Vickers pouze 7. Vtisk je 2,7 krát delší a mělký než u metody Vickers při stejném zatížení. Je vhodné měřit tvrďost u úzkých součástí jako např. drátů, kde tvrďost povlaků u těchto součástí je schopna Knoopova metoda zachytit velice citlivě.

2.1.3 Ultrazvuková metoda – UCI [11], [25], [26]

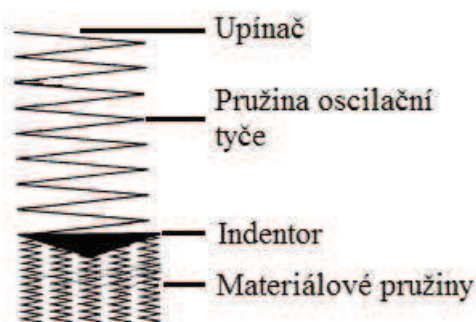
Ultrazvuková metoda s označením UCI, což je anglická zkratka názvu Ultrasonic Compact Impedance, využívá Vickersův diamantovým jehlanem umístěný na oscilační kovové tyči kmitající ve směru svislé osy sondy ultrazvukovou frekvencí (70 kHz). Princip vyčíslení tvrďosti se zakládá na změně frekvence kmitající tyčinky a analýzy tlumících účinků, kterou zajišťují a snímají piezoelektrické jednotky, jak je možno vidět na obrázku 2.9.

Předepisující norma je ASTM A1038: *Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method*.

Celý proces měření si lze představit tak, že místo tyčinky bude pružina, na které bude připevněn indentor, a ta bude kmitat právě onou ultrazvukovou frekvencí. Materiál



Obr. 2.9 Schéma sondy [11]



Obr. 2.10 Princip metody UCI [11]

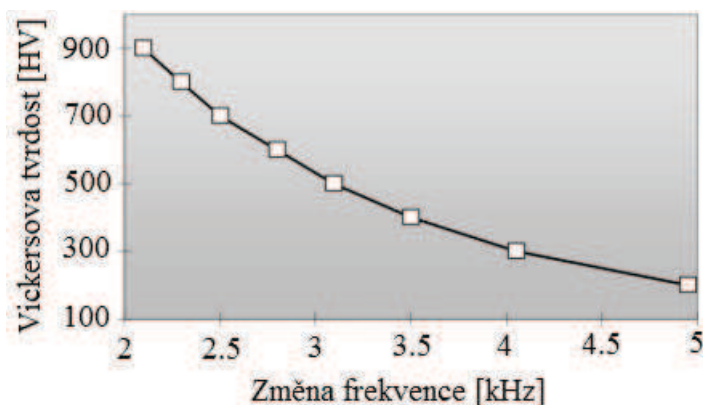
si lze představit jako soustavu malých pružin orientovaných kolmo k povrchu, viz obr. 2.10. V případě stlačení jedné materiálové pružiny diamantovým hrotem je tato pružina akusticky spojena s velkou pružinou. Díky tomu se frekvence kmitu velké pružiny změní, kdy změnu zachytí piezoelektrický přijímač. Tento případ, kdy je stlačena pouze jedna pružina zkoumaného materiálu, nastane u velmi tvrdých materiálů, kde diamant proniká do malé hloubky a tím způsobí malý vpich. Změna frekvence je větší, když diamantový indentor začne působit i na ostatní pružiny základního materiálu, tzn. když

indentor pronikne do větší hloubky, bude působit na více pružinek. Vpich a změna frekvence bude větší. Tento případ analogicky nastane u měkkých materiálů, kdy bude naměřena menší výsledná tvrdost.

Definice UCI metody tedy může znít: Změna frekvence se proporcionálně mění v závislosti na velikosti vpichu diamantové Vickersova indentoru. To je zapsáno v následující rovnici:

$$\Delta f \approx E_{\text{elastic}} \cdot \sqrt{A_p} \quad (2.11)$$

kde: Δf - změna frekvence oscilační tyče [Hz]
 E_{elastic} - Youngův modul [Pa]



Obr. 2.11 Porovnání hodnoty tvrdost dle Vickerse a změny frekvence u metody UCI [11]

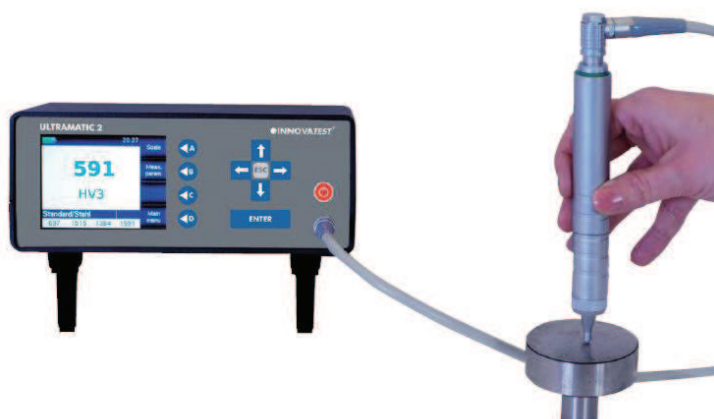
Z rovnice (2.11) je možno vypočítat, že při činnosti zařízení jsou kmity tyčinky s Vickersovým indentorem tlumeny úměrně ploše vpichu a také zde je zakomponován modul pružnosti zkoumaného materiálu, což je materiálová konstanta, jakou je tuhost pružin při demonstrativním rozboru metody UCI. Jedná se tedy o tvrdost a modul pružnosti, který zahrnuje vliv měřeného materiálu. Proto při praktické měření musí být stroj kalibrován na materiál o daném Youngově modulu pružnosti,

pro změření samotné tvrdosti materiálu bez vlivu elastických deformací. Jelikož materiály mají tyto moduly rozdílné, musí být přístroj kalibrován pro každý konkrétní materiál. Potom lze měřit velmi rychle za podmínky měření stálých typů materiálů. U dnešních moderních přístrojů je však kalibrace velmi rychlá a přístroje si dokáží uložit velké množství kalibrací pro materiály již měřené.

Z rovnice (2.1) pro výpočet tvrdosti dle Vickerse je vidět, že ve vzorci se také vyskytuje plocha vtisku ' A_p '. Tvrdost podle Vickerse klesá se zvětšující změnou frekvence kmitající tyčinky, viz obr. 2.11. To je v pořádku, protože už jak už bylo zmíněno, při větší změně frekvence je materiál měkkší.

UCI metoda se používá pouze u přenosných tvrdoměrů, pro rychlé měření v provozu a při měření součástech, u kterých je problém s přístupem k povrchu díky malému zařízení a její sondě.

Výsledná tvrdost se měří přímo v jednotkách 'HV' a je zde přímá konvence do 'HRC', 'HRB' a 'HBW'. Dokonce u některých přístrojů je zde i stupnice 'Rm' pro stanovení pevnosti v tahu. Uvedený přístroj na obrázku 2.12 je skvělou volbou, co se týká vysoké reprodukovatelnosti, která se pohybuje v rozmezí $\pm 1\%$ u metody Vickers. Jeho označení je Ultramatic 2. Tento přístroj spadá do vyšší řady a je svou konstrukcí



Obr. 2.12 Přenosný UCI tvrdoměr [26]

robustnější než ostatní přístroje s metodou UCI, avšak při zachování malé velikosti sondy, což je rozhodující pro měření na stísněných místech. Je zde možné 360 stupňovité měření a uložení až 500 000 dat z předchozího měření, což má své uplatnění nejvíce pro společnosti spojené s kontrolou materiálu a s její primární výrobou či jinými úpravami materiálové tvrdosti.

Uplatnění tvrdoměrů je universální od měření jemnozrnných materiálu s dobře připraveným povrchem až k hrubším materiálům díky možnosti výměny sond, které se liší v zatížení od 10 N do 98 N a tak se dostanou různé vpichy, kde ty nejmenší jsou okolo 20-40 μm , běžně okolo 0.03 mm, což nezanechává žádné viditelné stopy na zkoumaném materiálu a tím má minimální vrubový účinek.

2.1.4 Optická metoda – TIV [11], [20]

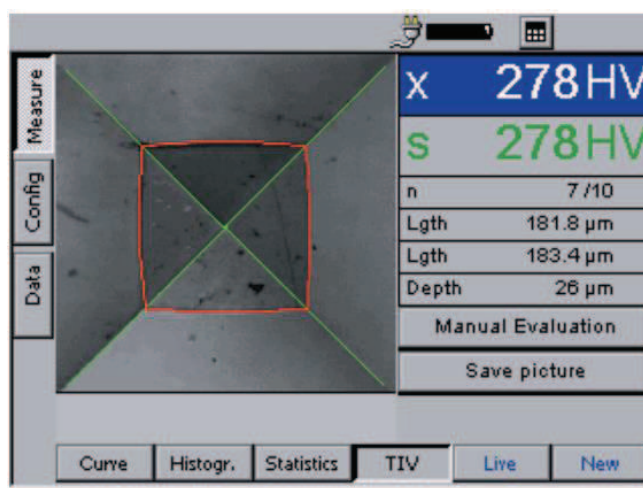
Měření metodou TIV má určité specifické výhody oproti dalším dvou metodách, používaných u přenosných tvrdoměrů. Metoda UCI a dále uvedená dynamická metoda Leeb se velmi vhodně doplňují. Dynamická metoda není tolik závislá na kvalitě měřeného povrchu. Je vhodná pro měření tvrdosti na hrubozrnných materiálech, zpravidla o velkých hmotnostních, zatímco UCI je doporučena pro jemnozrnné materiály, oblasti svarů a jejich tepelně ovlivněných oblastech a prakticky na jiných obrobených plochách. Nakonec nastane situace, kdy ani jedna metoda není vhodná a to při měření tvrdosti kovových trubek, které mají velmi tenkou tloušťku stěny okolo 1.5 mm a na rozdíl od plechů nejdou podepřít. Kmitání i ráz kuličky může trubku prohnout a měřený materiál se vlivem ztráty energie bude zdát měkčí než ve skutečnosti je. U metody TIV se trubka pod zátěžnou silou neprohne, nikterak nedosáhne ovality, a tím nebude ovlivněna přesnost měření.

Tvrdoměry metody TIV jsou pouze přenosné, viz obr. 2.13. Samotná zkratka TIV je z anglického výrazu Through Indenter Viewing. Právě anglický název vystihuje tuhle metodu a znamená to pohled přes intenter, který má Vickersův tvar. Největší rozdíl v porovnání s ostatními přenosnými tvrdoměry je v průběhu zatěžování. Metoda TIV je statickou metodou. Je to způsobeno tím, že se řídí Vickersovou metodou a je vlastně jeho přenosnou variantou.

Sondy u této metody využívají zatížení 10 N nebo 50 N. Součástí celého zařízení je také monochromatická CCD kamera a soustava optiky, zahrnují čočky. Právě tento systém snímá celý proces



Obr. 2.13 Přenosný tvrdoměr TIV [11]



Obr. 2.14 Zobrazení výsledné tvrdosti [11]

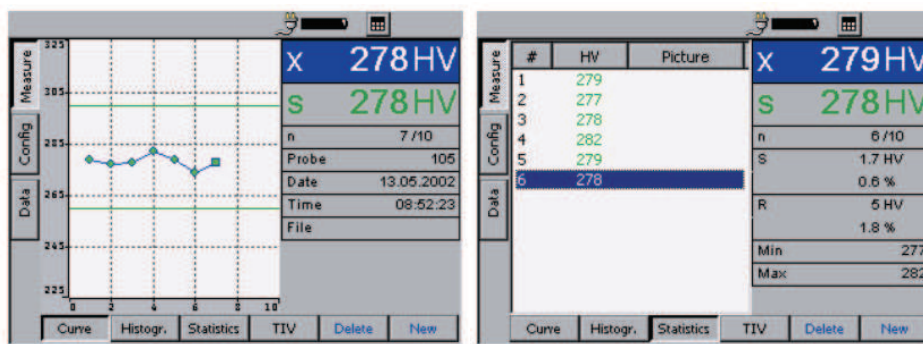
vlačování indentoru do měřeného materiálu a to v reálném čase. Jakmile dosáhneme předem zvoleného zatížení dle typu sondy, snímáný obraz se zastaví. Přístroj nyní změří celkovou, reálnou tvrdost dle Vickerse, pomocí vyhodnocení kontrastu obrazu, orámování vtisku a vyhodnocením délky obou úhlopříček, z nichž potom sestrojí průměrnou hodnotu, viz obr. 2.14. Tento proces měření může být měřen automaticky nebo manuálně. Měření je omezené optickým systémem, kdy v případě měkkých materiálu dokáže změřit pouze určitou maximální velikost úhlopříček. V případě tvrdých materiálů, tzn. malého vtisku, je omezující faktor rozlišení kamery CCD. Tabulka 2.2 ukazuje doporučené rozsahy, měřícího zatížení a typickou aplikaci pro obě možné sondy.

Tab. 2.2 Sondy a jejich doporučené rozsahy, měřící zatížení a typická aplikace

| sonda | měřící zatížení | rozsah tvrdosti | typické použití |
|---------|-----------------|-------------------------|---|
| TIV 101 | 10 N / 1 kp | přibližně 30 – 500 HV | tenké součásti z hliníku, mědi nebo mosazi; tenké povlaky |
| TIV 105 | 50 N / 5 kp | přibližně 100 – 1000 HV | zpevněné povrchy, strojní součásti a polotovary |

Výstup série měření se zobrazuje přímo na barevném displeji přístroje, buď ve formě křivky nebo ve formě statických dat, které obsahují minimální a maximální hodnotu, střední odchylku, rozsah naměřených hodnot, průměrnou a aktuální hodnotu tvrdosti, viz obr. 2.15. Tvrdoměr také dokáže převést tuto hodnotu Vickerse do jiné stupnice.

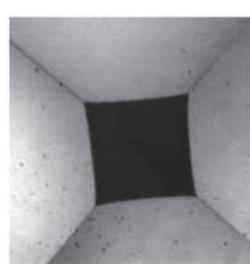
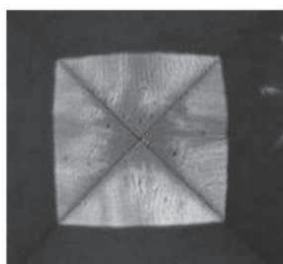
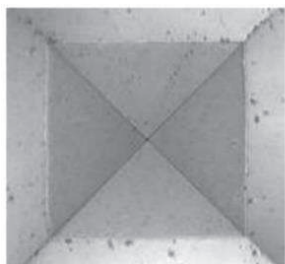
Nyní lze říci, že metoda TIV a metoda UCI mají společné to, že se obě měří při zatížení. Zatímco u metody UCI rozhoduje o výsledku tvrdosti plocha, tak právě u TIV je to velikost



Obr. 2.15 Dvě možnosti zobrazení série měření [11]

úhlopříček vtisku. Zajímavostí je, že délka úhlopříček se po odlehčení nemění a mění se plocha vtisku, konkrétně pouze hrany se přiblíží k sobě díky elastickému podílu deformace, ale vrcholy čtyřstěnu zůstanou na svém místě, stejně jak tomu je u Vickerse. Měření různých materiálu a jejich vliv na tvar vtisku lze vidět na obrázku 2.16, kde materiály zleva jsou ocel, teflon a sklo.

Výhody lze vypořádat v tom, že nemusí být prováděno žádné kalibrování a tak žádné nastavování vstupních hodnot pro různé materiály, jako byl například Youngův model u metody UCI, díky optické soustavě. Na geometrii měřeného materiálu nemusí být brán ohled, jelikož se jedná o statickou metodu, kdy se mohou měřit i povlaky a dokonce i elastické materiály.



Obr. 2.16 Měření různých materiálu [20]

Celý průběh zatížení je možno sledovat online na displeji a tím může být kontrolována kvalita měření. Je zde možno určit nespolehlivost naměřené hodnoty

tvrdosti. Může se jednat o nekvalitní vtisk či nezřetelné rohy vtisku a tak špatně změřená úhlopříčka vtisku. Přístroj není závislý na pozici a směru měření.

Naměřená hodnoty ve stupnici 'HV', přímá kontrola měření, široká škála geometrií měřeného materiálu to jsou hodnoty, kterými lze tento přístroj charakterizovat a kterými by se měli moderní přístroje ubírat.

2.1.5 Metoda Berkovič [1], [7], [8], [10], [22], [30]

Zkouška byla navržena v polovině 20. století, kdy hlavním důvodem vzniku metody byla problematická výroba Vickersova indentoru a jeho dodržení podmínky sbíhavosti hran. Proto Berkovičův indentor má tvar pravidelného třístěnného jehlanu, u kterého je dodržena podmínka bodového zakončení indentoru a oproti čtyřstěnnému má jednoznačnou výhodu v procesu výroby a nemožnosti vzniku společné hrany, která může mít velikost u Vickersa 0,5 μm a u Knoopa až 1,0 μm . Díky tomu metoda dokáže zachovat geometrickou podobnost různých velikých i těch nejmenších vtisků.



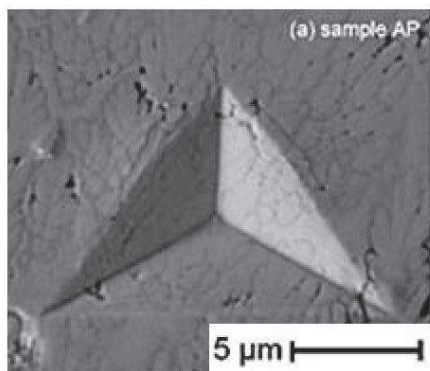
Obr. 2.17 Berkovičův modifikovaný model indentoru [1]

První Berkovičův indentor měl úhel mezi bočními stěnami a výškou jehlanu 65,03° pro stejný poměr plochy stěn jehlanu k jeho výšce. Později, kdy byla koncepce tvrdosti vyjádřena jako poměr zatížení a plochy vtisku, byl přijat modifikovaný Berkovičův indentor, který má úhel mezi výškou jehlanu a boční stěnou 65,27°, odpovídající podmínce stejného poměru vtiskové plochy k hloubce vtisku, viz obr. 2.17. Poloměr špičky zaoblení u protínajících se všech tří stěn má velikost 50 až 100 nm, s rostoucím opotřebením roste k 200 nm.

Metoda se principem zkoušky od Vickerse neodlišuje. Vypočítat tvrdost dle Berkoviče lze vztahem platící pro modifikovaný indentor s úhlem 65,27°:

$$H = \frac{F}{24,5 \cdot h^2} \quad (2.12)$$

kde: H - hodnota tvrdosti dle Berkoviče
h - hloubka trvalého vtisku [mm]



Obr. 2.18 Vtisk dle Berkoviče [22]

Spíše než přímé počítání zbytkového otisku po odtižení, ke kterému by bylo potřeba mikroskopu, je kontaktní plocha měřena z hloubky spolu se znalostí tvaru indentoru, ze kterého dostaneme výsledný vztah (2.12).

Měřicí přístroj se skládá ze zatěžujícího zařízení, které zaznamenává zatížení 'F' a měřič hloubku 'h'. Jedná se o velmi malá zatížení až k velikosti 1nN, kde velikost hloubky vtisku se může blížit hodnotám 0.1 nm. Z naměřených veličin 'F' a 'h' se získá hodnota mikrotvrdosti a také se dá určit přibližná hodnota Youngova modulu 'E'.

Berkovičův indentor je využíván pouze v oblasti měření nanotvrdosti. Typický vtisk po Berkovičově zkoušce lze vidět na obrázku 2.18.

2.2 Kulička [7]

Pro měření nanotvrdosti má kulička nepřebernou výhodu v postupném zatěžování, nejprve v rozsahu elastických deformací a poté v oblasti plastických deformací. Tak lze identifikovat přechod mezi těmito dvěma deformacemi, tím i zjistit mez kluzu případně zpevňování zkoušeného materiálu, což u indentorů s hrotem je velice problematické zjistit. Avšak kuličku z tvrdého materiálu není snadné pro měření nanotvrdosti vyrobit a proto se pro tohle měření používá uvedená Berkovičova metoda.

2.2.1 Metoda Brinell [5], [18], [23], [24], [25], [28], [32], [33]

Švédský inženýr J.A.Brinell, autor této zkušební metody, představil v roce 1900 metodu měření tvrdosti, zakládající na vtlačování kalené ocelové kuličky do zkoušeného materiálu. Kulička musí mít přesný rozměr, dokonalý kulovitý tvar a velmi hladký povrch. Během vývoje metody bylo ustáleno použití právě ocelové kuličky s označením 'HBS' a také kuličky z tvrdokovu 'HBW'. Nejdůležitější změnou uváděnou v normě ČSN EN ISO 6506-1, která nabyla účinnosti 1.9.2006, je použití pouze vnikajícího tělesa pouze kuličky z tvrdokovu, nikoli i z oceli.

Tvrdost podle Brinella se pak označuje 'HBW' a nikoliv 'HB' či 'HBS'. Tato norma je použitelná až do mezní hodnoty 650 HBW.

Jedná se o statickou zkoušku a princip je ve vtlačování indentoru do povrchu zkoušeného materiálu určitou silou, viz obr 2.19. Po odlehčení zkušebního zatížení se změří průměr vtisku d . Síla musí působit kolmo k materiálu a po určitou stanovenou dobu. Odtud se hodnota tvrdosti určí jako:

$$HBW = \frac{F}{A_p} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h} \quad (2.13)$$

kde: D - průměr kuličky [mm]

$$A_p = \pi \cdot D \cdot h = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d_k^2} \right) \quad (2.14)$$

kde: d_k - průměr vtisku kuličky v materiálu [mm]

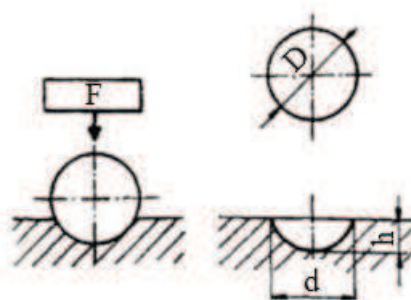
Substitucí vztahu (2.14) do (2.13) se dostane konečné vyjádření tvrdosti:

$$HBW = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d_k^2} \right)} \quad (2.15)$$

Tvrdost se v praxi nezíská vypočítáním uvedených vzorců, ale z tabulek pro průměr kuličky, síly 'F' a průměr vtlačku ' d_k ', který se získá aritmetickým průměrem dvou na sebe kolmých změřených vtisků pomocí tzv. Brinellovy lupy. Ze vztahu (2.13) lze vidět, že tvrdost má povahu napětí, které je však velmi nerovnoměrně rozděleno mezi kuličku a plochu vtisku. Představuje pouze idealizované střední napětí, které nemá reálný význam ani fyzikální podstatu.

Aby bylo možné porovnávat naměřené hodnoty tvrdosti pro různé materiály, je třeba dodržet základní zkušební podmínky:

- průměr kuličky ' D ' (0,625 mm, 1,25 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm) – volí se podle tloušťky měřeného materiálu, rozměru materiálu v rovině kolmé na směr působení síly 'F', podle velikosti zrna a heterogenity měřeného materiálu.



Obr. 2.19 Princip metody [33]

Aby se neprojevila tvrdost podložky, je nutné, aby tloušťka materiálu byla minimálně osminásobek hloubky vtisku a aby na protilehlé straně nebyly patrné stopy deformace od kuličky.

Tuto situaci je možnou popsat rovnicí:

$$\frac{s}{h} \geq 8 \quad (2.16)$$

kde: s - tloušťka měřeného materiálu [mm]

Dosažením vztahu do rovnice (2.13) dostaneme maximální průměr kuličky ' D_{\max} ', kterou lze měřit materiál tloušťky ' s ' a minimální tloušťku vzorku ' s_{\min} ' měřeného kuličkou průměru ' D ':

$$s_{\min} = 8 \cdot \frac{0,102 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \text{HBW}} \quad (2.17)$$

$$D_{\max} = 8 \cdot \frac{0,102 \cdot F}{\pi \cdot s \cdot \text{HBW}} \quad (2.18)$$

Jelikož plastická deformace má vliv na určité okolí vtisku, tak musí vzdálenosti středu vtisku od okraje vzorku být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku a vzdálenost středu dvou sousedních vtisků musí být nejméně 4 násobek průměru vtisku.

Pro materiály s hrubou a heterogenní strukturou musí být průměr zvolen tak, aby byl vtisk vytvořen na větším počtu zrn a výsledek nebyl ovlivněn jednotlivými zrny a aby byla určena průměrná hodnota tvrdosti celé struktury, samozřejmě pokud se nevyžaduje hodnota tvrdosti jednotlivých fází.

- b) velikost zatěžující síly – volí se s ohledem na průměr použité kuličky. Při měření stejného materiálu kuličkou stejného průměru ale s rozdílnou velikostí zkušební síly naměříme rozdílné hodnoty tvrdosti. Metoda si totiž nezanechává geometrickou podobnost a zatěžující síla neroste úměrně s hloubkou vtisku a jeho povrchem ' A '. Obrázek 2.120 znázorňuje, jak se bude měnit tvrdost v závislosti na síle ' F ', také s porovnáním metody Vickers. V oblasti mezi silou ' F_1 ' a ' F_2 ' jde vidět, že tvrdost se mění pouze nepatrně a nachází se zde maximální tvrdost. Lze psát $\text{HBW} \approx \text{HBW}_{\max}$. Empiricky bylo stanoveno, že zatěžující síla ' F ' může být aplikována, když:

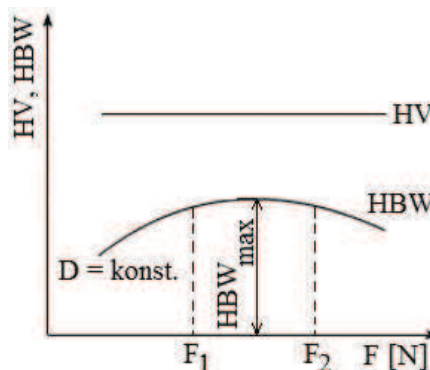
$$\frac{d_k}{D} = 0,25 \div 0,6 \quad (2.19)$$

V případě potřeby srovnat naměřené tvrdosti použitím dvou průměrově rozdílných kuliček o průměru ' D_1 ' a ' D_2 ' při různém zkušebním zatížení ' F_1 ' a ' F_2 ', je třeba respektovat podmínku, aby úhel ' φ ' byl stejný pro oba vtisky, viz obr. 2.21. Tím docílíme geometrické podobnosti obou vtisků, pro kterou platí vztah:

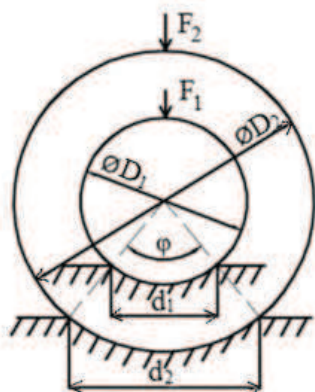
$$\frac{F_1}{D_1^2} = \frac{F_2}{D_2^2} = \frac{F}{D^2} = \text{konst.} \quad (2.20)$$

Tento princip je vyjádřen vztahem:

$$F = k \cdot D^2 \quad (2.21)$$



Obr. 2.20 Závislost tvrdosti na síle [23]



Obr. 2.21 Podobnost vtisků [28]

Dle vztahu (2.21) se nakonec určí zatěžující síly od 29430N (3000 kp) až k hodnotě 9,8N (1 kp) pro ty nejměkčí materiály. Konstanta 'k' se určí při dodržení vztahu (2.19) pro všechny zkoušené materiály. Dostane pro železo, ocel a jiné slitiny hodnotu $k = 30$. Pro kovové materiály s nižší tvrdostí (přes měď, nikl, hliník, hořčík, ložiskové kovy, a cín) bude hodnota 'k' klesat až k hodnotě 1. Pro spékané kovy jsou hodnoty 'k' uvedeny v normě ISO 4498:2010.

- c) rychlost zatěžování – vyjádřená rychlostí růstu zatěžující síly 'dF' od okamžiku dotknutí indentoru povrchu měřeného materiálu až do okamžiku plného zkušebního zatížení – čas 't'. Možno vyjádřit vztahem:

$$\dot{F} = \frac{dF}{dt} \quad (2.22)$$

kde: t - čas v intervalu nulové síly a síly 'F_{max}' [s]

V okamžiku dosažení plného zatížení kulička stále vniká do měřeného materiálu vlivem zpevňovacích a relaxačních pochodů v materiálu během plastické deformace. Pohyb kuličky se zastaví, až nastane rovnováha mezi zatěžující silou a odporem materiálu proti další deformaci. Aby plastický tok proběhl, je potřeba určitý čas, který se nazývá trvání zatížení 't'.

Rychlost zatížení ovlivní výsledek až při překročení určité hodnoty rychlosti, kdy by se projeví setrvačné síly tvrdoměru. V případě běžných rychlostí je tento vliv zanedbatelný, kdy čas 't' nesmí být menší než 2 s a větší než 8 s.

- d) čas trvání zkušebního zatížení – má větší vliv na výsledek naměřené hodnoty tvrdosti. Je dán poměrem zkušební teploty k rekrystalizační teplotě zkoušeného materiálu. U rekrystalizačních teplot vyšších jak teplota měření se plastická deformace zastaví během pár sekund. Naopak, u nízkotavitelných kovů (Zn, Pb), při kterých je rekrystalizační teplota blízká pokojové se uplatňuje plastická deformace tečení (creep) a deformační tok se prakticky vůbec neustálí a to ani za 10^3 s. Pro praktická použití se čas zkoušky stanovil co nejkratší a závisí na teplotě tavení zkoušených materiálu:

- slitiny železa – 10 až 15 s
- neželezné slitiny a jejich slitiny – 10 až 180 s

- e) teplota – v arbitrážních případech se zkouška provádí při teplotě $23^\circ \pm 5^\circ$

- f) povrch vzorku - musí být rovný, hladký, bez okujené vrstvy, zcela bez mazadel a nejméně ovlivněn ohřevem nebo tvářením.

Hodnoty Brinellovy tvrdosti mají konvekční charakter. Tím musí být údaj o tvrdosti označený podmínkami, při kterých bylo měření prováděno. Při běžných podmínkách ($F = 3000$ kp, $D = 10$ mm, $t = 10$ s) se tvrdost označí 350 HBW – tvrdost Brinella 350 naměřené pomocí běžných podmínek kuličkou z tvrdokovu. U podmínek odlišující se od normálních, se tvrdost doplní informacemi D/F/t. Například 300 HBW 5/750/40, kdy byla naměřená tvrdost 300 kuličkou o průměru 5 mm, zkušební síle 7355N a délce trvání zkušebního zatížení 40 s.

Z tvrdosti 'HBW' lze vypočítat empirickou závislostí mez v tahu 'Rm':

$$R_m = k \cdot HBW \quad (2.23)$$

kde: k - koeficient závislý na druhu materiálu: ocel 3,1 až 4,1, litý bronz 2,3, hliník 2,6, slitina hliník - hořčík 4,4.



Obr. 2.22 Tvrdoměr [24]

S ohledem na materiál kuličky, její poloměr a zátěžnou sílu je metoda Brinell vhodná pro heterogenní materiál. Není vyžadován čistě upravený povrch, díky velkému vtisku, který avšak může znehodnotit funkční plochu zkoušeného výrobku.

Na obrázku 2.22 lze vidět moderní tvrdoměr, který měří tvrdosti optickou metodou (automatické zaměření vtisku) nebo pomocí hloubky vtisku. Měření hloubky vtisku se používá v případě automatizace procesu a výpočet je korigován konstantami, které se pohybují okolo 3 % naměřené tvrdosti. Označení Brinellovy metody při měření hloubky vtisku je 'HBT'. Princip tohoto měření je nepřesné s ohledem na vytvoření valu v okolí vtisku vhodný pouze pro poměrné stanovení tvrdosti.

2.2.2 Kladívko Poldi [18], [21], [25], [28], [33]

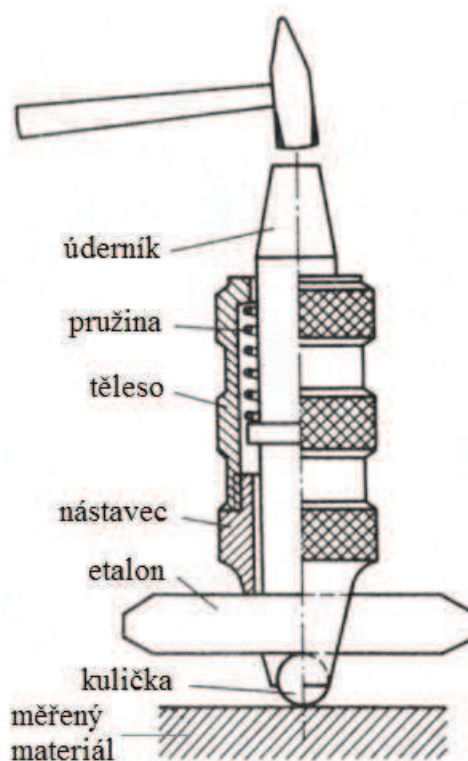
Jedná se o jednoduchý malý (kapesní) tvrdoměr pro oblast použití především při měření tvrdosti na velkých výrobcích, kde nelze využít statických nebo přenosných tvrdoměrů, které pracují normalizovanou metodou Brinell, jelikož princip kladívka vychází právě z Brinellovy metody. Jedná se o nejmenší tvrdoměr pro měření metodou Brinell, vhodné pro malé dílny, sklady a montáže, díky jeho rozměrů, hmotnosti a možnosti použít v jakékoliv poloze. Patent tohoto tvrdoměru se datuje k roku 1921.

Kladívko pracuje na principu komparace, kdy se porovnává známá tvrdost porovnávací tyčinky a tvrdost zkoušeného materiálu. Z obrázku 2.23 je schematicky nakreslené, že tvrdoměr se skládá z pouzdra (těleso a nástavec) a odpruženého pístu (úderník a pružina). Pouzdro je ukončené držákem ocelové kuličky. Mezi odpružený píst a kuličku se vkládá etalonová tyč čtvercového průřezu o hraně 11 mm a tvrdosti cca 200 HBS, což je tvrdost změřená Brinellovou metodou pomocí kuličky z oceli, která, už jak bylo zmíněno, není normalizovaná. Tvrdoměr se přiloží k měřené součásti a poté se běžným dílenským kladívkem kolmo rázem udeří na úderník. Ocelová kulička o průměru 10 mm mezi zkušebním předmětem a porovnávací tyčinkou z etalonu vytvoří v obou materiálech kulový vtisk na základě plastické deformace. Změří se lupou průměry vtisků na obou materiálech, kdy na každém vtisku se měří dva na sebe kolmé průměry vtisku, z kterých dostaneme střední hodnotu pro oba vtisky d_{mat} a d_{etal} . Po odečtení hodnot se vyhledá v empirických tabulkách odpovídající tvrdost pro každý materiál zvláště nebo získáním tvrdosti ze vzorce, který však platí jen přibližně:

$$HBW_M = HBW_T \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_T^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_M^2}} \quad (2.24)$$

kde: HBW_M - tvrdost měřeného materiálu
 HBW_T - tvrdost etalonu
 d_M - průměr vtisku měřeného mat. [mm]
 d_T - průměr vtisku etalonu [mm]

Měření je zatíženo poměrně značnou chybou (až $\pm 10\%$) a pro takto naměřenou konečnou hodnotu tvrdosti, je nutné pohlížet jen jako na informativní.



Obr. 2.23 Schéma metody [21]

2.2.3 Metoda Leeb [11], [13], [19]

Metodu vynalezl D. Leeb a zakládá se na dynamickém (odrazovém) principu. Stejně jako je tomu u metody UCI, tak i zde je tvrdost měřena nepřímo pomocí ztráty energie vnikacího tělesa, který zanechá určitý vtisk, ale jeho rozměry se pro výpočet nepoužijí.

Metoda je předepsána normou ASTM A956: *Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products*, která nabyla účinnosti v roce 2000.

Princip je v odrazu nárazového tělesa s kuličkou vystřeleného pružinou směrem k zkoumanému povrchu určitou rychlostí. Tato fyzikální podstata je na obr. 2.24. Kulička vyrobená ze slinutých karbidů, či pro případ tvrdších materiálů z diamantu, naráží pod určitou rychlostí v_I do povrchu měřeného materiálu, kdy má určitou kinetickou energii vyjádřenou vztahem:

$$E_{kinI} = m \cdot \frac{v_I^2}{2} \quad (2.25)$$

kde: m - hmotnost kuličky [kg]

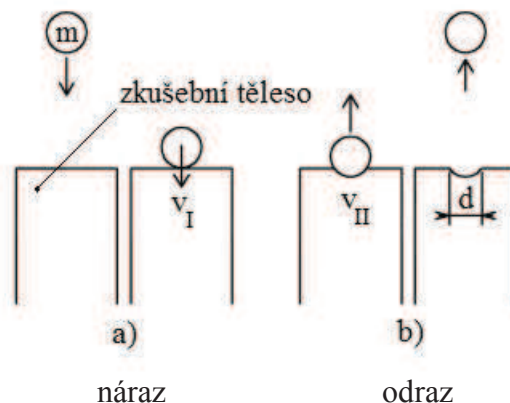
v_I - rychlost kuličky při dopadu na měřený povrch [$m \cdot s^{-1}$]

Během kontaktu se materiál a částečně i samotná kulička deformuje. Je důležité, aby deformace kuličky byla o mnoho menší než deformace materiálu, stejně jako tomu musí být u jiných metod pro měření tvrdosti. Vlivem disipace energie kulička ztratí určitý podíl své celkové energie a poté se zase od povrchu odrazí s určitou rychlostí v_{II} , která závisí na množství ztracené energie v kontaktu se zkušební těleso a je samozřejmě menší než rychlost v_I . V případě tvrdého materiálu kulička ztratí méně celkové energie v porovnání s měkkými materiály, méně se materiál zdeformuje a kulička se odrazí s větší rychlostí. Tuto kinetickou energii po kontaktu lze charakterizovat vztahem:

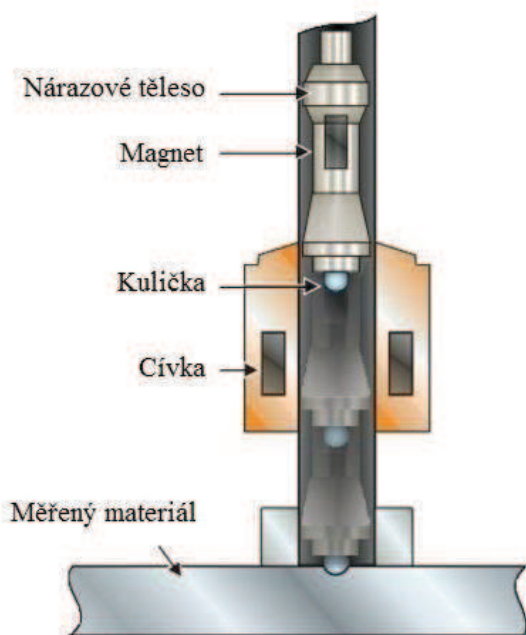
$$E_{kinII} = m \cdot \frac{v_{II}^2}{2} \quad (2.26)$$

kde: v_{II} - rychlost odrazu kuličky [$m \cdot s^{-1}$]

Získání rychlostí se provádí nekontaktním měřením. Používá se magnet a cívka obsažená v sondě, která musí být přiložena kolmo k zkoumanému povrchu s max. dovolenou odchylkou od svislé osy 2 až 3°. Z obr. 2.25 je vidět, že magnet je v pouzdře nárazového tělesa

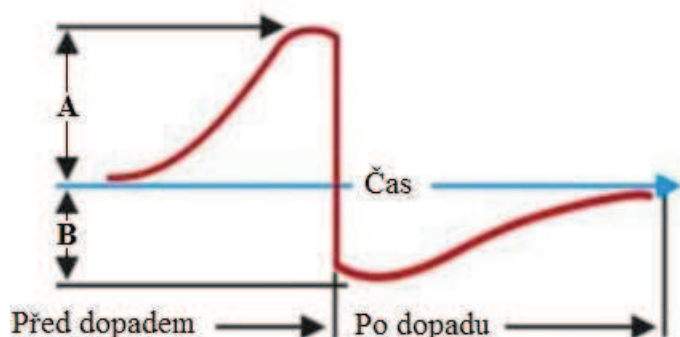


Obr. 2.24 Základní princip dynamické zkoušky [11]



Obr. 2.25 Řez sondou [11]

s kuličkou. Má za úkol indukovat napětí při průchodu cívkou, která je umístěna ve spodní části měřící sondy. Tím se rozumí blíž k testovanému povrchu. Je to z důvodu, aby tíhové zrychlení zanašelo co nejmenší chybu měření, ať už v jakékoliv poloze sondy vůči zemi při měření.



Obr. 2.26 Indukované napětí [11]

Měřeny jsou dvě napětí, jedno při pohybu indentoru k zkušebnímu tělesu a druhý při odrazu od zkušebního tělesa. Magnet při průchodu cívkou indukuje napětí a přepočtem se získá rychlost před a po dopadu. Průběh napětí je zachycen na obrázku 2.26, kde 'A' je maximální hodnota napětí [V] před dopadem a 'B' je maximální hodnota napětí po odrazu [V]. Pomocí těchto hodnot napětí lze také stanovit tvrdost této metody.

Oba průběhy napětí leží v jiné větvi vlivem směru průchodu kuličky. Typy snímačů, které zaznamenávají průběh napětí v čase jsou označovány jako indukční.

Zakladatel metody, definoval svou vlastní jednotku tvrdosti a to právě Leeb, kdy zkratkou je označována 'HL'.

Výsledná tvrdost je určena jako poměr rychlosti indentoru před dopadem a po dopadu na zkoumaný povrch:

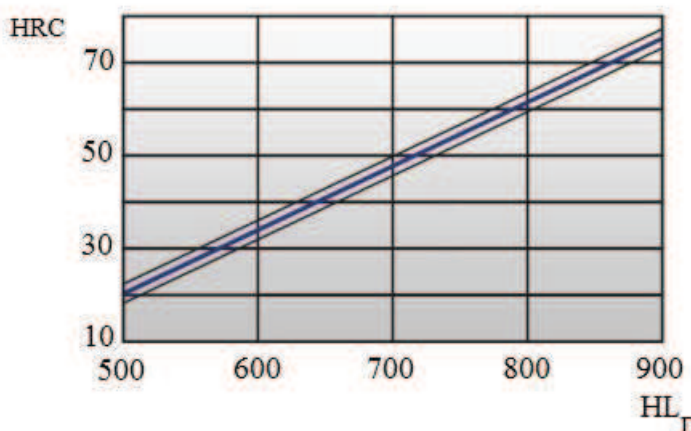
$$HL = \frac{v_{II}}{v_I} \cdot 1000 \quad (2.27)$$

Jelikož se jedná o poměr rychlostí, které jsou vypočítány z napětí indukovaného v cívce při průchodu kuličkou, je tvrdost dle Leeb určována přímo z hodnot napětí 'A' a 'B':

$$HL = \frac{B}{A} \cdot 1000 \quad (2.28)$$

Vzhledem k poměrům rychlostí a napětích jsou rovnice (2.27) a (2.28) totožné a tvrdost přístroj vyhodnotí právě z napětí, přičemž metoda je definovaná podle rovnice (2.27).

Tvrdost podle Leeba je všeobecně málo rozšířená a většinou zcela neprůkazná o samotné tvrdosti. Pro další interpretování určitých a porovnatelných výsledků je nutné hodnoty tvrdosti přizpůsobit do běžnějších jednotek. Proto jsou dále konvertovány do jednotek jako například 'HB', 'HRC', 'HRA', 'HRB' nebo 'HV'. Pro převod se využívá převodních tabulek, lépe řečeno křivek, které jsou uloženy v paměti měřícího přístroje. Neexistuje pouze jedna tabulka pro převod z jednotek 'HL' na jinou jednotku tvrdosti. Každý



Obr. 2.27 Konverze tvrdosti dle Leeba do Rockwella (HRC) [11]



Obr. 2.28 Tvrdoměr DynaPOCKET [11]

materiál vyžaduje svoji experimentálně zjištěnou křivku pro převod, která je sestavena měřením konkrétního materiálu, ale na odlišných tvrdostních vzorcích. Tyto experimentální křivky jsou určeny metodou právě Leeb a metodou Rockwell, viz obr. 2.27.

Nové přístroje nabízí automatickou korekci směru úderu (vliv směru tíhového zrychlení) díky analýze fáze napětí a patentovanému zpracování signálu napětí. Aplikační možnosti jsou určeny počáteční silou úderu a druhem vnikacího tělesa. Všeobecně je možno volit ze tří různých typů sond

(Dyna D, Dyna E, Dyna G). Zařízení se mohou lišit podle různých výrobců, mohou být například MIC 20, DynMIC anebo DynaPocket s integrovanou sondou D, u kterého je výhoda v kapesní velikosti, viz obr. 2.28. U předešlých dvou musí být vždy k měřicímu přístroji připojena určitá sonda. Přístrojem MIC 20 lze navíc měřit i tvrdost metodou UCI, jenž lze vidět na obrázku 2.29. Tabulka 2.3 ukazuje typy intenterů, energie nárazu kuličky a typické aplikace pro jednotlivé sondy a přístroj DynaPOCKET. Na obrázku 3 je možno vidět jiný typ tvrdoměru s nárazovou hlavou D, která musí mít minimální požadovanou drsností měřeného povrchu $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ a má přesností měření $\pm 6 \%$ HLD. Jiné přístroje mají i toleranci $0,5 \%$ při 800 HLD.



Obr. 2.29 Přístroj MIC 20 [11]

Tab. 2.3 Přehled možných měřicích zařízení

| typ | indentor | energie nárazu | typické aplikace |
|-------------------|-------------------------|----------------|---|
| Dyna D | Ø 3 mm, karbid wolframu | 12 N·mm | homogenní materiály |
| Dyna E | Ø 3 mm, diamant | 12 N·mm | > 50 HRC - tvrzené a tvářené oceli |
| Dyna G | Ø 5 mm, karbid wolframu | 90 N·mm | < 650 HB – velké součásti s méně upraveným povrchem |
| DynaPOCKET | Ø 3 mm, karbid wolframu | 12 N·mm | kompaktní tvrdoměr |

Nevýhodou měření je nutnost kalibrace přístroje, jelikož ze své podstaty se jedná o elasticko-plastickou deformaci, kdy indukované napětí, získané pohybem kuličky, zohledňuje i vliv elastické deformace a tím modul pružnosti. Materiály vyznačující se stejnou

Tab. 2.4 Materiálové skupiny

| materiály |
|------------------------|
| nelegovaná a litá ocel |
| nástrojová ocel |
| nerez ocel |
| šedá litina |
| tvárná litina |
| hliníkové lité slitiny |
| mosaz / CuZn |
| bronz / CuAl, CuSn |
| tvářené měděné slitiny |

„skutečnou tvrdostí“, nemusí mít naměřenou stejnou tvrdost dle Leeba vlivem rozdílného Youngova modulu. Při hrubé kalibraci musí uživatel vybrat jeden z 9 materiálových skupin podle tabulky 2.4, podle které jsou pro určité materiály zadány moduly pružnosti a převodní tabulky v přístroji. Mnohem přesnější je kalibraci provést na vzorku o známé tvrdosti, na kterém se provede 5 měření. Průměrná hodnota tvrdosti je opravena bezrozměrnou konstantou na hodnotu tvrdosti známého materiálu. Tuhle konstantu daného materiálu je možno uložit na paměťovou kartu, včetně celého nastavení. V případě několika různých aplikací na jednom pracovišti má každá aplikace svoji kartu, kterou lze rychle vyměnit a přístroj je tím připraven k měření.

Dynamická metoda působí velkou silou po krátkou dobu během nárazu a tím není vhodná pro tenké a lehké díly, které se mohou pod touto silou ohnout (rozkmitat) a způsobit tak chybu v měření. Ploché součásti mohou být podepřeny, ale u zakřivených profilů je měření omezeno. Vhodné je měření tvrdosti hrubozrných materiálů a součástí s větší hmotností a velikostí.

2.3 Kulička a kužel [7]

Níže popsaná metoda Rockwell je pro rozdělení tvrdosti podle tvaru velice specifická. Jedná se o jedinou metodu, při které lze použít dva tvary vnikacího tělesa a to právě kužel i kuličku. Další specifikum metody je v principu měřených veličin pro určení samotné tvrdosti. Neměří se zde rozměry vtisku po odtižení zkušebního tělesa, ale hloubka vtisku přímo během zatěžování. Tudíž z uvedených důvodů je pro tuhle metodu vytvořena zvláštní a doposud vymykající se kategorie.

Tvrdost dle vnikacího tělesa ve tvaru kužele je stejně jako jehlan nezávislá na velikosti použité zkušební síly. Uplatňuje se podobnost vtisků. Pro měření nanotvrdosti se nepoužívá z důvodu problematické výroby diamantového hrotu s bodovým zakončením

2.3.1 Metoda Rockwell [18], [25], [32], [33]

Rockwellova zkouška je založena na principu Ludwikovy, popsané v roce 1907, kdy byly pocitovány nevýhody v závislosti získané tvrdost na velikosti zatížení u metody Brinell, u které neplatí Kickův zákon vyslovený v roce 1885. Proto Ludwik použil kužel z kalené oceli s vrcholovým úhlem 120°, 90°, 60° a se zaoblenými vrcholy s poloměrem 0,2 mm. Tato metoda se neujala, ale měla velký vliv na rozvoj dalších metod a to především na metodu Rockwell, kterou vyvinul S.P.Rockwell v roce 1922.

Stejně jako například Brinell či Vickers patří i Rockwell ke zkouškám vnikacím, ale liší se v principu měření tvrdosti. Jako u jedné ze dvou metod (HBT – výše popsaná) se tvrdost vyjadřuje z hloubky trvalého vtisku mezi dvěma stupni zatížení a to předběžného a celkového. Působící zatížení je výrazně menší než použil Ludwik (9,8-49 kN).



Obr. 2.30 Tvrdoměr Rockwell [25]

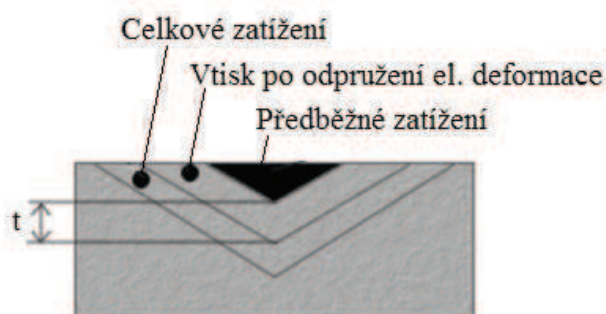
Na rozdíl od Ludwika je zde použit kužel diamantový s vrcholovým úhlem 120° , který je používán pro tvrdé materiály, anebo ocelové kuličky dvou průměrů. Úhel 120° je zvolen kvůli tření při vnikání indentoru, které je menší, čím větší je vrcholový úhel vnikacího tělesa. Stejně jako u Ludwika je poloměr zaoblení pomyslné špičky kuželového indentoru 0,2 mm. První měření Rockwellem bylo prováděno kuličkou s průměrem 1/1", což odpovídá 1,5875 mm. Vývojem byl přidán ještě jeden průměr kuličky 3,175 mm (1/8") vyrobené také z oceli. Poté lze metodu Rockwell pomocí kombinace různých indentorů a zátěžných sil rozdělit do stupnic tvrdosti, viz tab. 2.5. Volba Rockwellovy stupnice závisí hlavně na předpokládané tvrdosti zkoušeného materiálu.

Tab. 2.5 Vnikací tělesa a zkušební síly pro stupnice Rockwell

| stupnice tvrdosti | symbol tvrdosti | vnikací těleso | předzátížení F_0 [N] | celkové zatížení F [N] | oblast použití |
|-------------------|-----------------|--|------------------------|--------------------------|------------------|
| A | HRA | diamantový kužel | | 588,4 (60 kp) | 20 až 88 HRA |
| B | HRB | ocelová kulička Ø 1,5875 mm (1/16") | | 980,7 (100 kp) | 20 až 100 HRB |
| C | HRC | diamantový kužel | | 1 471 (150 kp) | 20 až 70 HRC |
| D | HRD | diamantový kužel | | 980,7 (100 kp) | 40 až 70 HRD |
| E | HRE | ocelová kulička Ø 3,175 mm (1/8") | 98,07 (10 kp) | 980,7 (100 kp) | 70 až 100 HRE |
| F | HRF | ocelová kulička Ø 1,5875 mm (1/16") | | 588,4 (60 kp) | 60 až 100 HRF |
| G | HRG | ocelová kulička Ø 1,5875 mm (1/16") | | 1 471 (150 kp) | 30 až 94 HRG |
| H | HRH | ocelová kulička Ø 3,175 mm (1/8") | | 588,4 (60 kp) | 80 až 100 HRH |
| K | HRK | ocelová kulička Ø 3,175 mm (1/8") | | 1 471 (150 kp) | 40 až 100 HRK |
| 15 N | HR 15 N | diamantový kužel | | 147,1 | 70 až 94 HR 15 N |
| 30 N | HR 30 N | diamantový kužel | | 294,2 | 42 až 86 HR 30 N |
| 45 N | HR 45 N | diamantový kužel | | 441,3 | 20 až 77 HR 45 N |
| 15 T | HR 15 T | ocelová kulička Ø 1,5875 mm (1/16") | 29,42 (3 kp) | 147,1 | 67 až 93 HR 15 T |
| 30 T | HR 30 T | ocelová kulička Ø 1,5875 mm (1/16") | | 294,2 | 29 až 82 HR 30 T |
| 45 T | HR 45 T | ocelová kulička Ø 1,5875 mm (1/16") | | 441,3 | 1 až 72 HR 45 T |

Stupnice HRA se používá pro určení tvrdosti křehkých materiálů, tenkých povrchových vrstev a velmi tvrdých materiálu - slinutých karbidů. To kvůli zatížení, které je v případě HRA menší než HRC a tím se eliminuje poškození diamantového kužele. Vzhledem k tvaru indetoru u stupnice HRB se používá k určení měkkých slitin, které nelze měřit metodou HRC.

Prvním krokem měření je přiblížení indentoru kolmo k zkoušenému materiálu. Poté je hrot vtlačěn do materiálu bez rázů a chvění, dokud nedosáhne hodnoty předběžného zatížení 'F₀',



Obr. 2.31 Průběh zkoušky [25]

zátížení musí být působeno od 1 s až po 15 s pro materiály vykazující silnou závislost plastické deformace na čase. Během působení síly je hloubka tvořena plastickou, ale i elastickou deformací. Jelikož je tvrdost dána hloubkou trvalého vtisku, je nutné odtížit indentor na sílu rovnající se hodnotě předzatížení 'F₀'. Nyní se odečte hloubka 'h', což odpovídá hloubce trvalého vtisku taktéž viditelné z obrázku 2.31. Kdyby se odečítala hloubka při plném zatížení, jevila by se tvrdost značně menší nejen o pružné deformace měřeného materiálu, ale také o všechny pružné deformace stojanu stroje, apod.

Jelikož tvrdoměr měří hloubku, je nutné dodržet řadu požadavků:

- tloušťka vzorku musí být minimálně 10i násobek hodnoty 't'. Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být patrné stopy deformace způsobené vnikacím tělesem. Při zkouškách na vypuklých površích se používá opravných součinitelů uvedené v normě
- vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být alespoň 4 násobek průměru vtisku (ale nejméně 2 mm) a vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku (platí pro hodnoty 'HRA – K')
- vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být alespoň 3 násobek průměru vtisku a vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku (platí pro hodnoty 'HRxx N' a 'T').

Výsledná tvrdost se určí dle stupnic a právě podle změřené trvalé hloubky 'h', která je určena v dílcích na stupnici přístroje:

$$\text{pro stupnice A, C, D:} \quad \text{HRx} = 100 - h \quad (2.29)$$

$$\text{pro stupnice B, E, F, G, H, K:} \quad \text{HRx} = 130 - h \quad (2.30)$$

$$\text{pro stupnice N, T:} \quad \text{HR xx x} = 100 - h \quad (2.31)$$

Takový výpočet tvrdosti se již dnes nepoužívá a stupnice na přístroji je přímo v hodnotách tvrdosti podle jednotlivých stupnic Rockwella.

Hodnoty tvrdosti se vyjadřují čísly určující hodnotu tvrdosti a písmeny 'HR' s uvedením měřicí stupnice, např.: 50 HRC, 55 HR 30 N.

Moderní tvrdoměr Rockwell na obrázku 2.30 používá předběžné zatížení 10 kp a je plně automatizovaný. Jediné nastavení musí být zadáním velikosti působícího zatížení a přiblížení indentoru k měřenému povrchu.

Hlavní výhodou metody je měření hloubky vtisku, což dokáže být dobře automatizováno a uplatněno tak na různých automatických linkách a pro hromadnou a rychlou kontrolu. Díky předběžnému zatížení nemusí být povrch zcela opracovaný. Není zde ani potřeba žádných optických přístrojů pro zkoumání velikosti vtisku ani používat tabulky. Její nevýhoda spočívá v přesnosti a citlivosti v měření v porovnání s Brinellem či Vickersem.

3 EXPERIMENT

Experiment byl prováděn pro tři rozdílné typy výměnných břitových destiček (kapitola 1), pomocí tvrdoměru Zwick 3212 zobrazený na obrázku 3.1.

Tvrdoměr byl vybaven objektivovou hlavou s CCD kamerou osvětlenou LED zářivkou. Objektivová hlava je revolverová s objektivy o rozlišení 40:1, 20:1 a 10:1. Velikost zatížení se může volit podle materiálu v rozsahu 0,2 kp až 30 kp. Zatěžující síla je aplikována ocelovým závažím, kterým se docílí přesně definované síly. Při aplikaci větších zatíženích nesmí být indentor vtlačen do měřeného povrchu moc rychle a tak náběh plného zkušebního zatížení musí být pozvolný. Právě proto je zařízení s aplikací zkušebního zatížení vybaveno olejovými přepady, které zaručují plynulé dosedání indentoru do zkušebního materiálu. CCD kamera převádí obraz vtisku měřeného materiálu na monitor na přilehlém stolním počítači, který je vybaven měřicí kartou a nainstalovaným softwarem testXpert Master V9 z roku 2000, viz 3.2. V programu se nastaví velikost působícího zatížení, velikost zvětšení a poté se manuálně orámuje vtisk. Tím se vypočítá výsledná tvrdost a také je zobrazena velikost obou úhlopříček. Díky kameře zde odpadá jakékoliv měření velikosti vtisku pomocí rastru na okuláru, následné stanovení střední hodnoty obou úhlopříček a konečné odečítání výsledné tvrdosti v tabulkách.



Obr. 3.1 Tvrdoměr Zwick 3212



Obr. 3.2 PC s testXpert Master V9

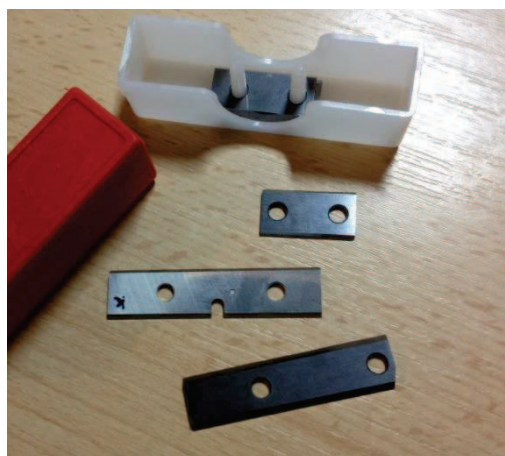
Pro měření musely být splněné určité podmínky dle normy popsané v kapitole 2.1.1. Povrch měřených destiček musel být před měřením odmaštěn a musely být splněny požadavky na vzdálenosti jednotlivých středů vtisků a vzdálenost středu vtisku od okraje součásti.

Výslednou tvrdost každé destičky nelze vyhodnotit z jednoho provedení měření, ale je potřeba provést určitou sérii měření. Byly voleny dvě velikosti působícího zatížení. Dle očekávané velké tvrdosti, bylo zvoleno zatížení 10kp a poté maximální velikost 30kp. Na každou destičku byly aplikovány 4 vtisky pro jednu velikost zatížení rozmístěných od sebe dle obrázku 3.4. Po změření velikosti tvrdosti 4 vtisků byla vytvořena další série 4 vtisků na původní destičku při druhém zatížení.

Tyto vtisky byly posunuty o určitou vzdálenost, aby nebyly ovlivněny předchozími.

Pro aplikování zatížení se musel jako první nastavit hrot indentoru na určitou vzdálenost od měřené destičky. To se provedlo pomocí CCD kamery, kdy byl objektiv přibližován k povrchu destičky, až se na monitoru objevil zaostřený obraz materiálu. Poté se posunula hlava tvrdoměru na pozici s indentorem. Páčkou se spustilo nabíhání zkušební zatížení,

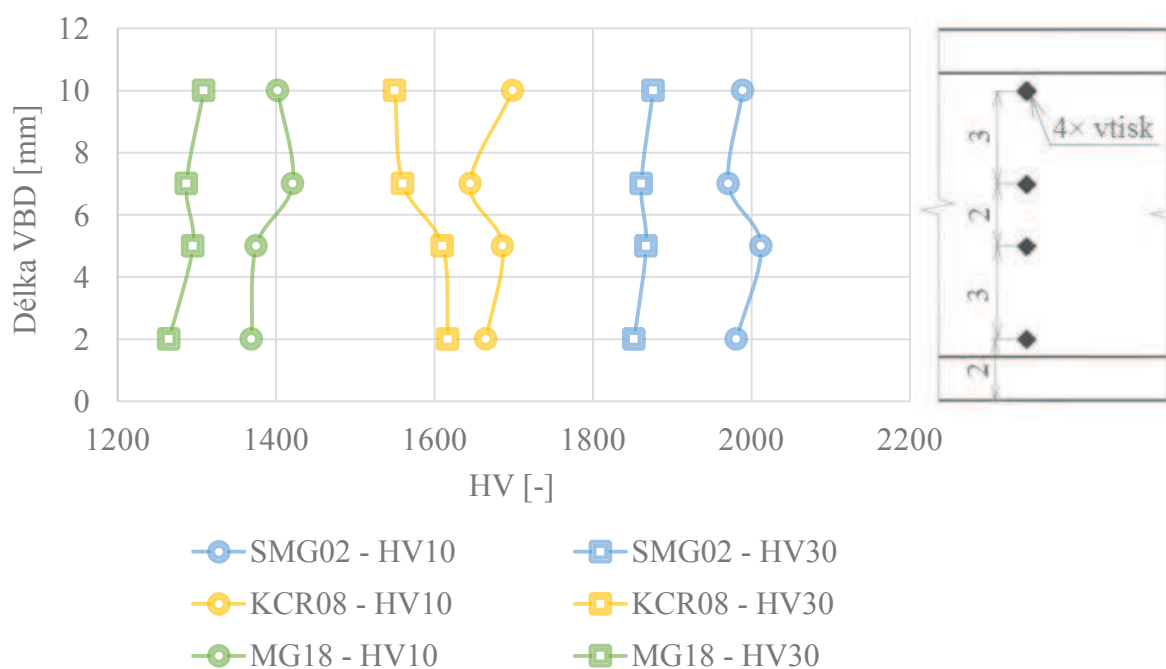
kteřé trvalo 7 s a poté se spustilo zkušební zatížení po dobu 12 s. Páčkou bylo zase zkušební zatížení odtíženo. Pro změření velikosti vtisku byl opět tvrdoměr posunut do pozice s kamerou, která na PC zobrazila vtisk a následně se určila výsledná tvrdost. Dále byla destička posunuta o patřičnou vzdálenost pro měření následujícího vtisku pomocí posuvového zařízení na tvrdoměru a měření opakováno.



Obr. 3.3 Měřené destičky

Vzhledem k rozměru vtisků, který se pohyboval od 223 μm při zatížení 30 kp až k 101 μm při 10 kp, muselo být voleno rozlišení objektivu 40:1 (HV10) a 20:1 (HV30). Je to způsobené velkou tvrdostí měřeného materiálu a tím malou velikostí vtisků. Při zatížení 10 kp a rozlišení 20:1 by byla velikost obrazu vtisku malá a tím by mohlo dojít k nepřesnému orámování vtisku. Naopak při zatížení 30 kp bylo vzhledem k velikosti obrazu vtisku optimální rozlišení 40:1.

Z naměřených hodnot pro všechny tři typy destiček při obou zatíženích byl sestrojen graf závislosti polohy jednotlivých vtisků na tvrdosti dle Vickerse, viz obr 3.4. Výrobce udává v průměru výslednou tvrdost o 300 HV vyšší než byla naměřena. S ohledem na už i tak vysokou tvrdost, jsou destičky vhodné pro obrábění dřeva. Jejich rozdíl je pouze v uplatnění, kdy musí být zvolen vhodný typ destičky podle obráběného materiálu a podle volby rezných podmínek s vhodným vyvážením houževnatosti a právě tvrdosti. Pořadí tvrdostí destiček je stejná jako udává výrobce a to s největší tvrdostí destičky SMG02, jako bylo předpokládáno v kapitole 1. Jelikož je tato VBD také nejkřehčí, tak nesmí být použita pro nerovnoměrný záběr při obrábění. Měřené destičky jsou zobrazeny na obrázku 3.3.



Obr. 3.4 Závislosti polohy jednotlivých vtisků na tvrdosti dle Vickerse

4 ZÁVĚRY

Měření tvrdosti, jako mechanické vlastnosti každého kovového materiálu, má v průmyslu výrazné uplatnění. Tvrdost ovlivňuje chování materiálu. Pro určité součásti je vysoká tvrdost přímo vyžadována. Tvrdší materiál nevykazuje pouze výhody. S rostoucí tvrdostí všeobecně klesá houževnatost (hodnota nárazová práce) a tím se stává křehčí. Je to způsobené strukturou materiálu, kdy metalická část podporuje růst tvrdosti a menší opotřebení, zatímco pojivo jako matrice zajišťuje houževnatost materiálu. Problém může být také v obrábění tvrdých materiálu. Je potřeba vždy posoudit vhodný požadovaný poměr mezi tvrdostí a houževnatostí.

Zkoušky tvrdosti probíhají mechanickým zatížením pomocí vnikacího tělesa z tvrdšího materiálu než samotný zkoušený materiál. Výsledek takového tlakového působení indentoru se kvantitativně vyjádří jako výsledná tvrdost. Měření lze provádět také přímo na zkoušeném tělese, kdy ve většině případů je základní požadavek minimální porušení povrchu zkoušeného materiálu a tím docílení jeho nedestrukce. Existuje mnoho metod měření tvrdosti kovových materiálů, kdy každá metoda má své výhody, nedostatky a možnosti použití. Nejznámější jsou zkoušky dle Brinella, Vickerse a Rockwella. V oblasti nanotvrdosti se používá výhradně zkouška dle Berkoviče. Novější metodou je metoda UCI, jež využívá kmitání indentoru v ultrazvukové frekvenci a spolu s metodou TIV a dynamickou metodou jsou nejnovějšími typy přenosných tvrdoměrů.

Experimentální měření bylo provedeno pomocí metody Vickers na třech typech výměnných břitových destiček ze slinutých karbidů, určených pro obrábění dřeva. Pro každou destičku bylo použito zatížení 10 kp a 30 kp. Výsledné vyhodnocení a sestavení grafu odhalilo skutečnost, že pro všechny destičky je naměřená tvrdost při větším zatížení řádově o stovku menší. Je to dáno velkou tvrdostí zkoušeného materiálu, kdy při menším zatížení se materiál vlivem elastických deformací odpruží více než při zatížení 30 kp. Tím hrot indentoru zanechá menší plochu vtisku a je naměřena větší hodnota tvrdosti. Dle očekávání podle katalogu výrobce byla nejmenší naměřená hodnota tvrdosti u destičky MG18, tvrdší byla destička KCR08 a největší průměrná hodnota naměřené tvrdosti byla zjištěna u destičky SMG02 a to 1988 HV10. Díky vysoké tvrdosti má tato destička zase o hodnotu $3,7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ menší nárazovou práci K_{IC} v porovnání s MG18 uváděnou v katalogu výrobce.

Měření tvrdosti je pro strojírenství nesmírně důležité. Vývoj nových metod zkoušek tvrdosti a možnosti jejich uplatnění se stále rozvíjejí. Automatizování, spojení více metod měření tvrdosti do jednoho tvrdoměru, větší přesnost měření a mobilnost tvrdoměrů, to jsou aspekty, kterými se měření tvrdosti ubírá.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [4] [14]

1. Berkovich - Modified. In: NANOINDENTERTIP. *synton-mdp.ch* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.synton-mdp.ch/en/products/nanoindentertip.40.html>
2. Brinell hardness tester. *directindustry.com* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/laryee-technology-co-ltd/brinell-hardness-tester-66945-481839.html>
3. CERATIZIT. Wendeplatten. *Hard material matters – Hartmetall für die Holzbearbeitung*. 2012. DE 12.09 7001460
4. *Citace* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.citace.com/>
5. ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005 [cit. 2015-04-15].
6. Diamond_Vickers_hardness. In: R. TANAKA. *flickr.com* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: https://www.flickr.com/photos/fluor_doublet/6864844960/
7. DOLEŽAL, P., B. PACAL. Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů. In: *Ústav materiálových věd a inženýrství, VUT v Brně* [online]. c2012 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>
8. DUŠEK, Jiří. *Tvrдость, mikrotvrдость, nanotvrдость – čisté kovy měřené metodou DSI* [online]. 2008 [cit. 2015-04-30]. Disertační práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Vladislav Navrátil. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/40981/prif_d/phd_thesis_dusek.pdf
9. Falcovací frézy. In: KATALOG PRODUKTŮ. *vydona.cz* [online]. Vydání 2013 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.vydona.cz/pdf/vydona_katalog_2013.pdf
10. FISCHER-CRIPPS, Anthony C. *Nanoindentation* [online]. New York: Springer, 2002, 1st ed., 195 p. ISBN 978-0-387-22462-6 (eBook). Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=pnzlBwAAQBAJ&pg=PR6&lpg=PR6&dq=FISCHER-CRIPPS,+Anthony+C.+Nanoindentation&source=bl&ots=LqY40nssN4&sig=FpdCiaOoonVERb7Qf3d813RCZq8&hl=cs&sa=X&ei=Q-s3VeHmKYH1ONaEgMAE&ved=0CGQQQ6AEwCQ#v=onepage&q&f=false>
11. FRANK, Stefan. 2005. Mobile Hardness Testing. *Application Guide for Hardness Testers* [online]. 2005 [cit. 2015-01-01]. Dostupné z: https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/hardness_testing_application_guide_english_0.pdf
12. HVS - 50 Digital Display Vickers Hardness Tester. *farasia.com.cn* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.farasia.com.cn/products/prod0075.htm>
13. Innovatest W-TH1100 Portable Leeb Rebound Hardness Tester W-TH1100. *lawson-his.co.uk* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.lawson-his.co.uk/innovatest-w-th1100-portable-leeb-rebound-p158818>
14. JANEČKOVÁ, Hana. *Tvorba citací* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/mod/swf/view.php?id=251931>

15. Knoop indenter. In: KNOOP TEST. *instron.de* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.instron.de/wa/applications/test_types/hardness/knoop.aspx
16. Knoop-hardness indentatiton on Zirconoxyd. In: DENTAL MATERIALS. *medizin.uni-tuebingen.de* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.medizin.uni-tuebingen.de/zsmk/cms/index.php?article_id=218&clang=1
17. LCD-Bildschirm-Anzeigen-manuelle oberflächliche Rockwell – Härte - Prüfvorrichtung-Ausrüstung HRMS - 45. *german.ndttester.com* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://german.ndttester.com/sale-860251-lcd-screen-display-manual-superficial-rockwell-hardness-tester-equipment-hrms-45.html>
18. LUDVÍK, J., K. BÍLEK a Š. LUDVÍK. Zkoušky tvrdosti. *Přehled základních zkušebních metod pro uživatele tvrdoměru Qness* [online]. 2010, 4. vyd. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrdosti.pdf
19. Měření tvrdosti odlitků dynamickou metodou. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, č. 6 [cit. 2015-03-15]. Kód článku 020642. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-tvrdosti-odlitku-dynamickou-metodou.html>
20. Nová metoda pro měření tvrdosti přenosnými tvrdoměry. In: *TESTIMA, spol. s.r.o* [online]. c2011 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.testima.eu/prilohy/174/Metodytvrdosti.pdf>
21. Ruční tvrdoměr Poldi (Poldi kladívko). In: STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE – 1. ROČNÍK VLASTNOSTI MATERIÁLŮ – TVRDOST. *strojirenstvi.wz.cz* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik/06b_tvrdost.php
22. SEM image of indent. In: NANOINDENTATION STUDY OF THE EFFECT OF NANODIAMOND ADDITIVES ON ELECTROLESS DEPOSITION NICKEL-BORIDE COATING. *azom.com* [online]. ISSN 1833-122X, 2009 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4719>
23. The Variation of Hardness number. In: LECTURE 12. *nptel.ac.in* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-ROORKEE/strength%20of%20materials/lects%20&%20pics/image/lect12/lecture12.htm>
24. Tvrdoměr Brinell typu NEXUS 8003B/HBT. *testsysteme.cz* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.testsysteme.cz/cz/produkty/tvrdomery-kovu/tvrdomery-brinell/tvrdomer-brinell-typu-nexus-8003b-hbt.html>
25. Tvrdost. In: *Měření tvrdosti* [online]. c2011 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://www.merenitvrdosti.cz/tvrdost.html>
26. Ultramatic 2 - Ultrasonic hardness tester. In: PŘENOSNÝ UCI TVRDOMĚŘ ULTRAMATIC 2. *metrology.cz* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.metrology.cz/15-prenosny-uci-tvrdomer-ultramatic-2>

27. VBD – výměnné břitové destičky. *PILANA MARKET, s.r.o.* [online]. c2015 [cit. 2015-01-5]. Dostupné z: <http://www.pilanamarket.cz/noze/vbd-vymenne-britove-desticky/>
28. VELES, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 401 s.
29. Vickers Hardness Test. In: *Zwick Roell Indected* [online]. c2015 [cit. 2015-01-01]. Dostupné z: http://www.indentec.com/downloads/info_vickers_test.pdf
30. YOVANOVICH, M.M. *Micro and Macro Hardness Measurements, Correlations, and Contact Models*. Collection of Technical Papers [online]. 2006, 28 p. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.mhtlab.uwaterloo.ca/pdf_papers/mhtl06-2.pdf
31. Zkouška tvrdosti. *Zwick Roell* [online]. Brno: Zwick Roell ČR, SR. Dostupné z: <http://www.zwick.cz/cs/produkty/tvrdomery.html>
32. Zkoušky tvrdosti. In: *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. c2015 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdomery.pdf
33. Zkoušky tvrdosti. In: *Střední škola strojírenská a elektrotechnická, Brno* [online]. c2014 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkousky_tvrdomery.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Označení | Legenda | Jednotka |
|------------------------------------|---|----------------------|
| A, B | hodnoty napětí při průchodu kuličky | [V] |
| A_p | povrch vtisku | [mm ²] |
| a | konstanta tvaru indentoru a měřeného materiálu (Kickův zákon) | [-] |
| c | konstanta vnikacího tělesa | [-] |
| D, D ₁ , D ₂ | průměry kuliček | [mm] |
| D _{max} | maximální průměr kuličky | [mm] |
| d | střední hodnota úhlopříčky vtisku | [mm] |
| d ₁ , d ₂ | délky jednotlivých úhlopříček vtisku | [mm] |
| d _L | délka delší úhlopříčka u metody Knoop | [mm] |
| d _M | průměr vtisku měřeného materiálu | [mm] |
| d _T | průměr vtisku etalonu | [mm] |
| d _k | průměr vtisku kuličky v materiálu | [mm] |
| E _{elastic} | Youngův modul | [Pa] |
| E _{kinI} | kinetická energie kuličky při dopadu na povrch | [J] |
| E _{kinII} | kinetická energie kuličky při odrazu od povrchu | [J] |
| F, F ₁ , F ₂ | zatěžující síly | [N] |
| F ₀ | předběžné zatížení | [N] |
| \dot{F} | rychlost zatěžování | [N·s ⁻¹] |
| g | gravitační zrychlení | [m·s ⁻²] |
| H | tvrdost dle Berkoviče | [-] |
| HBW | tvrdost dle Brinella | [-] |
| HBW _M | tvrdost měřeného materiálu v tvrdosti dle Brinella | [-] |
| HBW _T | tvrdost etalonu v tvrdosti dle Brinella | [-] |
| HK | tvrdost dle Knoopa | [-] |
| HL | tvrdost dle Leeba | [-] |
| HR _x | tvrdost dle Rockwella pro jednotlivé stupnice (x – A, B, C, D, E, F, G, H, K) | [-] |
| HR _{x xx} | tvrdost dle Rockwella pro jednotlivé stupnice (x xx– 15 N, 30 N, 45 N, 15 T, 30 T, 45 T) | [-] |
| HV | tvrdost dle Vickerse | [-] |
| h | hloubka trvalého vtisku | [mm] |
| K | konstanta vyjadřující převod z 'N' na 'kp' | [-] |
| k | koeficient závislý na druhu materiálu | [-] |
| m | hmotnost kuličky | [kg] |
| R _m | mez v tahu | [Pa] |
| s | tloušťka měřeného materiálu | [mm] |
| s _{min} | minimální tloušťka vzorku | [mm] |
| t | čas v intervalu nulové síly a maximální síly | [s] |
| v _I | rychlost kuličky při dopadu na měřený povrch | [m·s ⁻¹] |
| v _{II} | rychlost kuličky při odrazu od měřeného povrchu | [m·s ⁻¹] |
| Z | vzdálenost mezi geometricky přesnou a skutečnou hranou vtisku | [mm] |
| Δf | změna frekvence oscilační tyče | [Hz] |
| π | Ludolfovo číslo | [-] |
| φ | úhel podobnosti vtisku | [°] |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Tvrdoměr Brinell [2] | 8 |
| Obr. 2 Indentor dle Vickerse [6]..... | 8 |
| Obr. 3 Přenosný tvrdoměr (metoda Leeb) [13]..... | 8 |
| Obr. 1.1 Schéma VBD [27] | 9 |
| Obr. 1.2 Falcovací fréza [9] | 9 |
| Obr. 2.1 Statický tvrdoměr [12]..... | 10 |
| Obr. 2.2 Rozdělení metod podle tvaru indentoru..... | 11 |
| Obr. 2.3 Schéma metody [32]..... | 12 |
| Obr. 2.4 Průběh zatížení [18]..... | 14 |
| Obr. 2.5 Deformované vtisky [32]..... | 14 |
| Obr. 2.6 Indentor dle Knoopu [15] | 14 |
| Obr. 2.7 Obvyklý tvar indentoru při zvětšení [7] | 15 |
| Obr. 2.8 Reálný vzhled vtisku [16]..... | 15 |
| Obr. 2.9 Schéma sondy [11] | 16 |
| Obr. 2.10 Princip metody UCI [11] | 16 |
| Obr. 2.11 Porovnání hodnoty tvrdost dle Vickerse a změny frekvence u metody UCI [11]...17 | 17 |
| Obr. 2.12 Přenosný UCI tvrdoměr [26] | 17 |
| Obr. 2.13 Přenosný tvrdoměr TIV [11] | 18 |
| Obr. 2.14 Zobrazení výsledné tvrdosti [11]..... | 18 |
| Obr. 2.15 Dvě možnosti zobrazení série měření [11] | 19 |
| Obr. 2.16 Měření různých materiálů [20]..... | 19 |
| Obr. 2.17 Berkovičův modifikovaný model indentoru [1] | 20 |
| Obr. 2.18 Vtisk dle Berkoviče [22]..... | 20 |
| Obr. 2.19 Princip metody [33] | 21 |
| Obr. 2.20 Závislost tvrdosti na síly [23] | 22 |
| Obr. 2.21 Podobnost vtisků [28]..... | 22 |
| Obr. 2.22 Tvrdoměr [24]..... | 23 |
| Obr. 2.23 Schéma metody [21]..... | 24 |
| Obr. 2.24 Základní princip dynamické zkoušky [11] | 25 |
| Obr. 2.25 Řez sondou [11]..... | 25 |
| Obr. 2.26 Indukované napětí [11]..... | 26 |
| Obr. 2.27 Konverze tvrdosti dle Leeba do Rockwella (HRC) [11] | 26 |
| Obr. 2.28 Tvrdoměr DynaPOCKET [11] | 27 |
| Obr. 2.29 Přístroj MIC 20 [11] | 27 |
| Obr. 2.30 Tvrdoměr Rockwell [25] | 28 |
| Obr. 2.31 Průběh zkoušky [25]..... | 30 |
| Obr. 3.1 Tvrdoměr Zwick 3212 | 31 |
| Obr. 3.2 PC s testXpert Master V9 | 31 |
| Obr. 3.3 Měřené destičky..... | 32 |
| Obr. 3.4 Závislosti polohy jednotlivých vtisků na tvrdosti dle Vickerse | 32 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 2.1 Členění metody | 13 |
| Tab. 2.2 Sondy a jejich doporučené rozsahy, měřicí zatížení a typická aplikace..... | 19 |
| Tab. 2.3 Přehled možných měřících zařízení..... | 27 |
| Tab. 2.4 Materiálové skupiny | 28 |
| Tab. 2.5 Vnikací tělesa a zkušební síly pro stupnice Rockwell..... | 29 |