



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ZKOUŠKY TVRDOSTI A JEJICH APLIKACE V OBLASTI STROJÍRENSKÉ PRODUKCE

TEST HARDNESS AND APPLICATION ON THE CONDITIONS OF ENGINEERING COMPANY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PAVLA ČERNOHOUSOVÁ

VEDOUČÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MILAN KALIVODA

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavla Černohousová

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

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

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

Zkoušky tvrdosti a jejich aplikace v oblasti strojírenské produkce.

v anglickém jazyce:

Test hardness and application on the conditions of engineering company.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pojednání zaměřené na rozdělení zkoušek tvrdosti. Aplikace hlavních metod (Brinell, Vickers, Rockwell). Možnosti využití v typické průmyslové produkci malých a velkých firem. Dokladování konkrétních případů.

Cíle bakalářské práce:

Orientace v oblasti zkoušek tvrdosti. Vystižení jejich charakteristik. Doložení konkrétních situací ze strojírenských firem.

Seznam odborné literatury:

1. KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
2. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
3. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing s. r. o., 2008. 240 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kalivoda

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

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je v první teoretické části přehledně popsat vývoj, druhy a základní principy zkoušek tvrdosti. V praktické části jsou některé tyto zkoušky aplikovány na shromážděné vzorky. Dosažené výsledky jsou následně zpracovány a vyhodnoceny.

Klíčová slova

Tvrdomost, zkouška, indentor, Brinell, Vickers, Rockwell

ABSTRACT

The aim of this thesis is in the first part theoretical part clearly describe the development, types and basic principles of hardness tests. The practical part consists of some of these tests applied to the collected samples. The results are then processed and evaluated.

Key words

Hardness, test, indentor, Brinell, Vickers, Rockwell

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČERNOHOUSOVÁ, P. *Zkoušky tvrdosti a jejich aplikace v oblasti strojírenské produkce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 29 s. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma zkoušky tvrdosti a jejich aplikace v oblasti strojírenské produkce vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

27.5.2010

.....
Pavla Černohousová

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Milanu Kalivodovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod	7
1. ROZDĚLENÍ A POPIS JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK.....	8
1.1 Zkoušky vnikací.....	9
1.1.1 Zkouška dle Brinella	10
1.1.2 Zkouška dle Ludwika	11
1.1.3 Zkouška dle Rockwella.....	12
1.1.4 Zkouška dle Vickerse.....	13
1.1.5 Zkouška dle Knoopu	15
1.1.6 Zkoušky mikrotvrdoti.....	16
1.2 Zkoušky tvrdosti rázem	17
1.2.1 Dynamicko plastické	17
1.2.2 Dynamicko elastické	18
1.3 Zkoušky vrypové	20
1.4 Zkoušky novodobé.....	20
2. KONTROLA TVRDOMĚŘŮ A PŘEVODY HODNOT TVRDOSTI.....	22
2.1 Ověřování a kontrola tvrdoměrů	22
2.2 Převody hodnot tvrdosti	23
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
3.1 Měření tvrdosti nože brusle	24
3.2 Měření měděného pásu	26
3.3 Měření měděného vyleštěného pásu.....	26
Závěr	27
Seznam použitých zdrojů	28
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	29

ÚVOD

Každý předmět může být na pohled určen velikostí a tvarem, hmatem také tvrdostí a drsností. Jako tvrdý se jeví předmět, který nelze vlastní silou deformovat a v technické praxi to je hmota obtížně obrobitelná řeznými nástroji. Proto je také tvrdost nejčastěji definována jako odolnost povrchu materiálu proti místnímu porušení nebo vniku cizího tělesa (indentoru) při dané teplotě. Je výslednicí mnoha dalších vlastností zkoumaného vzorku, nejčastěji elastických, fyzikálně-chemických, plasticity a křehkosti. Tvrdost není žádnou fyzikálně definovatelnou vlastností.

Historie těchto zkoušek není zcela jasná. Asi nejstarší je vnikající zkouška Réaumurova. Ten kolem roku 1722 určoval změkčení temperované litiny tím, že zatlačoval do sebe dva trojboké hranoly z téhož materiálu o 90° zkřížené a určoval velikost zatlačení. O sto let později byla porovnána německým geologem Mohsem tvrdost deseti minerálů a seřazena do stupnice. Koncem 18. století bylo objeveno mnoho vnikajících zkoušek, k nejvýznamnějším patří Brinellova. Ta odstartovala vznik podobných zkoušek (Vickers, Rockwell, Poldi kladívko) až po nejmodernější způsoby s využitím například ultrazvuku.¹

Při těchto zkouškách nedochází k porušení ani deformaci zkoušeného vzorku, pouze na povrchu vznikají vrypy od vnikajícího tělesa (indentoru). Jedná se tedy o zkoušky nedestruktivní povahy. Vnikající indentory musí mít velmi kvalitní vlastnosti, neměly by podléhat plastickým deformacím, proto se hledají materiály s co nejvyšší tvrdostí a mezí pružnosti. Těmto podmínkám nejvíce vyhovuje diamant. Ten je ovšem velmi drahý, a proto se používá jen pro měření kovů s tvrdostí nad 630 HV. Mnohem cenově výhodnější jsou slinuté karbidy. Pod pevnost 450 HV se využívají nástroje z kalené oceli.

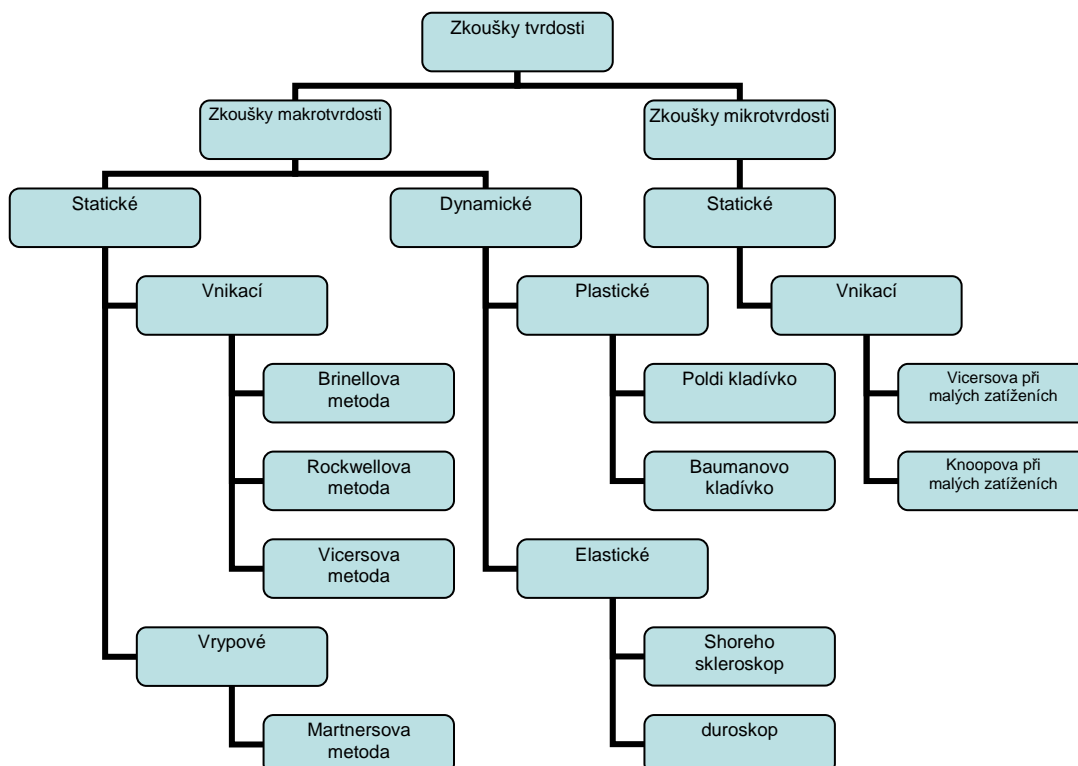
Zkoušky tvrdosti zastupují v oboru zkoušení materiálů jedno z nejvýznamnějších míst i z důvodu jejich nedestruktivní povahy. Díky jim se dá posuzovat chování materiálů i při jiném způsobu namáhání.

Hlavním cílem této bakalářské práce je tyto zkoušky přehledně popsat a rozčlenit. V první části je vypracována odborná rešerše, kde jsou popsány nejvýznamnější zástupci a seřazeny podle jejich doby vzniku. Druhá část se zaměřuje na praktický pohled těchto zkoušek.

1. ROZDĚLENÍ A POPIS JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK

Jak již bylo zmíněno, tvrdost patří mezi mechanické vlastnosti materiálu, ale nelze ji definovat jako fyzikální veličinu. Podle typu použité metody měření se odvíjejí i jednotky. U těchto zkoušek existuje více hledisek dělení:²

- a) dle principu
 - vtiskové metody – definované těleso je vlačováno do zkoušeného materiálu, měří se velikost vytvořeného vtisku
 - vrypové metody – diamantovým přesně definovaným tělískem zatíženým závažím se rýpe do vyleštěného povrchu zkoušeného materiálu
 - odrazové metody – definované tělísko padá na povrch zkoušeného vzorku a měří se velikost nebo úhel odrazu tohoto tělíska, používá se pro zkoušení velmi tvrdých vzorků
 - kyvadlové metody - jsou založeny na měření úbytku energie kyvadla s kuličkou, které naráží do zkoušeného vzorku
- b) dle rychlosti působení zatěžující síly
 - statické - zatlačování indentoru ve směru kolmém na zkoušenou plochu
 - dynamické – indentor do zkoušeného povrchu vniká kolmým rázem
- c) dle účelu měření
 - zkoušky makrotvrdosti – měří tvrdost celého vzorku, zatěžovací síla je vyšší jak 20 N
 - zkoušky mikrotvrdosti - tvrdost jednotlivých strukturních složek materiálu, zatěžovací síla je do 20 N



Obr. 1.1 Diagram rozdělení zkoušek tvrdosti

1.1 Zkoušky vnikací

Tento typ zkoušek je nejčastěji využíván. Je nejrychlejší, nejpřesnější a také nejsnadněji proveditelný. Do hladkého povrchu kovu se zatlačuje v kolmém směru přesně definovaný indentor určitou silou. Tvrdost je dána velikostí sil, jimiž jsou atomy kovu navzájem vázány.

Rozhodujícími činiteli ovlivňující zkoušky jsou:

- tvar krystalových elementů
- jemnost krystalizace - čím je kov jemněji krystalizován, tím je kov tvrdší
- teplota - čím je teplota vyšší, tím se jeví kov měkčí
- cizí příměsi - snižují plasticitu kovu a tím zvyšují jeho tvrdost
- vnitřní pnutí
- vlastnosti indentoru
- rychlost a doba zatěžování³

Postupem času od Brinellovy zkoušky roku 1900 bylo rozšířeno několik druhů vnikajících zkoušek. Podle určitých požadavků se od sebe liší materiálem, tvarem a velikostí indentoru, velikostí zatížení a způsobem vyhodnocení.

Pro každou metodu, aby bylo možné naměřené výsledky dosažené různými metodami mezi sebou porovnávat, musí být přesně definovány podmínky zkoušky. Všeobecné zásady pro měření tvrdosti:

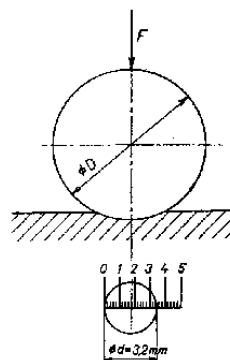
- teplota okolí by se měla nacházet v rozmezí 10° až 30°C
- zkoušené těleso se nesmí po dobu trvání zkoušky pohnout, proto musí být upevněno v tuhé podložce
- styčné plochy musí být bez nečistot a odmaštěné
- zkušební zařízení musí být použito odpovídající velikosti zkoušeného materiálu
- po dobu zkoušky nesmí docházet k rázům a chvěním, které by mohly ovlivnit zkoušku
- vnikací těleso se zatlačuje do zkoušeného tělesa zkušebním zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu
- zkušební zatížení a jeho doba působení musí být přesně dodržena podle tabulkových hodnot dané zkoušky
- vzdálenost středu vtisku od okraje a také vzdálenost dvou středů vtisků musí být dostatečná
- po zkoušce se změří průměr vtisků ve dvou na sebe kolmých směrech a z těchto hodnot se vypočte průměr³

1.1.1 Zkouška dle Brinella

Tato metoda se považuje za nejrozšířenější v oblasti měření tvrdosti. Brinellova zkouška je vhodná k testování měkkých až středně tvrdých materiálů s heterogenní strukturou. Na rozdíl od jiných druhů metod má poměrně velký průměr vtisku, a proto je schopná změřit více fází materiálu najednou.

Pro tuto zkoušku platí norma ČSN EN ISO 6506, která je určena pouze pro kovové materiály. Skládá se ze tří částí: zkušební metoda, ověřování a kalibrace zkušebních zařízení, kalibrace referenčních destiček.⁴

Podstatou metody je zatlačování ocelové kalené leštěné kuličky o průměru D do vyhlazené plochy známou silou F po stanovenou dobu. Následně se po odlehčení pomocí tzv. Brinellovy lupy změří průměr vtisku d (vypočte se plocha vtisku S).



Obr. 1.2 Princip Brinellovy zkoušky³

Brinellova tvrdost je dána vztahem :

$$HB = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad 1.1$$

Kde :

d ... průměrná hodnota průměru vtisku [mm]
 F ... zkušební síla [N]
 D ... průměr kuličky [mm]

$$\text{konstanta: } 0,102 = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,807}$$

S ohledem na kontrolovatelný materiál je volen průměr indentoru, který bývá 1 mm, 2,5 mm, 5 mm a přednostně se využívá průměru 10 mm. Pro měkčí materiály je indentor vyroben z kalené oceli, pro tvrdší je použita kulička ze slinutých karbidů. Dané zatížení, které je voleno z tabulek podle použité kuličky a měřeného materiálu, působí po dobu 10 až 15 sekund. Zjišťování průměrů vtisku se provádí pomocí měřicího mikroskopu, tzv. Brinellovy lupy, která umožňuje měřit na setiny milimetrů přesně.

Tvrdoměr se skládá ze třech částí - zkušebního přístroje, vnikacího tělesa a měřicího zařízení. Důležitou částí přístroje je masivní stojan a pákový mechanismus, vyvozuující zátěžnou sílu.²



Obr. 1.3 Tvrdoměr Brinell, 8-450 HBS^o a starší typ tvrdoměru²

U tohoto typu zkoušek se ve značení objeví nejdříve naměřená hodnota tvrdosti, pak následuje symbol HBS nebo HBW, podle toho z jakého materiálu je použita kulička. Následující čísla charakterizují podmínky zkoušky. A to v pořadí průměr použité kuličky a velikost zkušební zátěžení. V případě, že se doba působení zátěžné síly liší od doby stanovené normou, vyskytne se ve značení i tato hodnota.

Například se můžeme setkat s označením: 450 HBW 5/850

Kde : 450 ... hodnota tvrdosti
HBW ... měřeno kuličkou z tvrdokovu metodou dle Brinella
5 ... kulička o průměru 5 mm
850 ... zkušební zátěžení 850 kg ($850 \cdot g = 8\,339\text{ N}$)

Použití vysokých zátěžných sil se nejeví jako jasná nevýhoda. Památka po vtisku je díky tomuto zatížení větší než u jiných metod, ale na druhou stranu se dá hodnota vtisku přesněji určit a díky tomu nedochází k tak značným nepřesnostem.

1.1.2 Zkouška dle Ludwika

Velkou nevýhodou Brinellovy zkoušky je závislost na velikosti zatížení. Tuto skutečnost se snažil odstranit roku 1907 Ludwik. Nahradil indentor tvaru kuličky kuželem, neboť u tohoto tvaru je při všech různých zatíženích velikost tvrdosti zkoušeného materiálu stejná. Kužel je vyroben z kalené oceli s vrcholovým úhlem nejčastěji 90° (může se také použít 60° a 120°) a zaobleným vrcholem 0,2 mm.

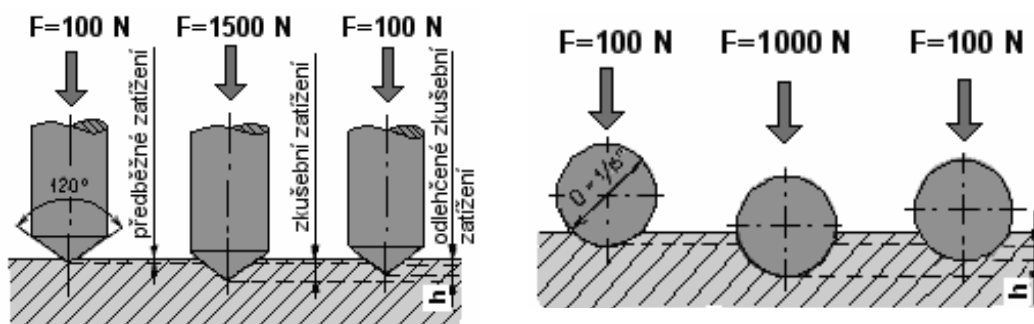
Tato zkouška dává jednotnou stupnici tvrdosti kovů nezávislou na velikosti zatížení. Není vhodná pro tvrdé materiály, například kalenou ocel. Při Brinellově zkoušce je indentorem kulička, která je využívána i v jiných oblastech strojírenské praxe. Příkladem jsou elementy ložisek. Z tohoto důvodu se raději využívá Brinellovy zkoušky než Ludwikovy, kde je výroba indentoru finančně velmi náročná, a proto používána jen zřídka.

1.1.3 Zkouška dle Rockwella

I když se Ludwikova zkouška neujala, odstartovala vývoj mnoha dalších zkoušek. Prvním byl roku 1922 S. P. Rockwell, který použil diamantový indentor a mnohem menší zatížení.

Je popsána v normě ČSN EN ISO 6508 a také rozdělena na tři části: zkušební metoda (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T), ověřování a kalibrace zkušebních zařízení (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T), kalibrace referenčních destiček (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T), které platí jen pro kovové materiály. Pro ostatní materiály jsou zvláštní normy⁴.

Zkouška patří mezi vnikací, proto je jejím principem vtačování vnikajícího tělesa do zkoušeného materiálu. Požadovaný vtisk vznikne zatížením indentoru nejdříve předtěžnou silou nejčastěji 100 N. Následně po dobu 3 až 6 sekund se zvyšuje zatížení na hodnotu celkového (volí se dle použité metody v tabulce 1.1). Poté se zátěžní síla zmenšuje a zastaví opět na hodnotě předtížení. V tomto okamžiku se zjistí velikost vtisku h dle obrázku 1.4 a podle této hodnoty se určí Rockwellova tvrdost.



Obr. 1.4 Princip Rockwellovy metody diamantovým kuželem a kalenou kuličkou⁴

Zkušebním indentorem se nejčastěji používá ocelová kulička o průměru 1,5875 mm nebo diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°. Podle výběru indentoru se volí zatížení a stupnice odečtu hodnot. Červená je platná pro při použití kuličky a černá při měření diamantovým kuželem.



Obr. 1.5 Tvrdoměr Rockwell, 20-88 HRA⁶ a starší typ tvrdoměru²

Rockwellova tvrdost se značí HR, za touto hodnotou se zapíše písmeno dle stupnice z tabulky 1.1. Nejvíce jsou využívány metody HRA, HRB, HRC. Před tato tři písmena se vpisuje hodnota tvrdosti. Získaný symbol například 59 HRC tedy vyjadřuje tvrdost 59 podle Rockwella měřené na stupnici C. Rockwell podřídil jednotnost stupnice praktické potřebě v různých průmyslových obrech.

Tab. 1.1 Vnikací tělesa a zkušební síly pro různé metody Rockwell⁵

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Vnikací těleso	Předtížení F_0 [N]	Celkové zatížení F [N]	Oblast použití
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	588,4	20 – 88 HRA
B	HRB	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16“)		980,7	20 – 100 HRB
C	HRC	Diamantový kužel		1 471	20 – 70 HRC
D	HRD	Diamantový kužel		980,7	40 – 70 HRD
E	HRE	Ocelová kulička 3,175 mm (1/8“)		980,7	70 – 100 HRE
F	HTF	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16“)		588,4	60 - 100 HRF
G	HRG	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16“)		1 471	30 – 94 HRG
H	HRH	Ocelová kulička 3,175 mm (1/8“)		588,4	80 – 100 HRH
K	HRK	Ocelová kulička 3,175 mm (1/8“)		1 471	40 – 100 HRK
15 N	HR 15 N	Diamantový kužel		29,42	147,1
30 N	HR 30 N	Diamantový kužel	294,1		42 – 86 HR 30 N
45 N	HR 45 N	Diamantový kužel	441,3		20 – 77 HR 45 N
15 T	HR 15 T	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16“)	147,1		67 – 93 HR 15 T
30 T	HR 30 T	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16“)	294,2		29 – 82 HR 30 T
45 T	HR 45 T	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16“)	441,3		1 – 72 HR 45 T

Pro zkoušku se dodržují všeobecné zásady pro měření tvrdosti. Rockwellova metoda je hojně využívána ve strojírenských firmách, protože je velmi rychlá a praktická (tvrdost vzorku se odečte přímo z měřícího přístroje). Metoda se používá pro sériové kontrolní zkoušky kalených, zušlechťovaných, nebo jinak tepelně zpracovaných ocelí. Ale u menších tvrdostí je metoda nepřesná, proto se používá až od tvrdosti 20 HRC, někde se i doporučuje až od 30 HRC.

1.1.4 Zkouška dle Vickerse

Byla vyvinuta v Anglii roku 1922 R. L. Smithem a G. E. Sandaldem. V Evropě je pojmenována podle tvrdoměru, zkonstruovaného firmou Vickers, v USA je označována jako diamond hardness test.¹ Najdeme ji popsanou normou ČSN EN ISO 6507. Skládá se ze tří částí: zkušební metoda, ověřování tvrdoměrů Vickers, kalibrace tvrdoměrných destiček.⁴

Princip metody je stejný jako u Brinella, pouze se liší tvarem indentoru. Vnikajícím tělesem v tomto případě je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn 136°. Aby se naměřená tvrdost příliš neodlišovala od Brinellovy a aby bylo co nejmenší tření, je volen právě úhel 136°. Po odlehčení se měří úhlopříčka, která se dá s větší přesností změřit než průměr kruhového vtisku. Tvrdost je vyjadřována jako poměr zkušebního zařízení k ploše povrchu. Pro výpočet byl odvozen vztah:⁵

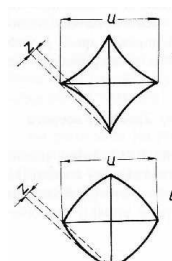
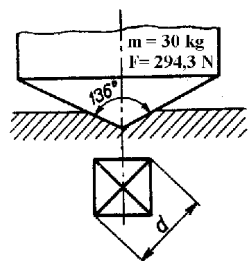
$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (1.2)$$

Kde: F zkušební síla

d aritmetický průměr délek dvou úhlopříček

[N]

[mm]



Obr. 1.6 Schéma zkoušky dle Vickerse a deformace vtisku³

Zpevnění při hranách je jiné než uprostřed ploch, proto průmět vtisku není přesně čtvercový. U měkkých nezpevněných kovů jsou strany vyduté (jako na obrázku 1.6 A) a naopak vypouklé se vytvoří u kovů zpevněných (obrázek 1.6 B).

Tab. 1.2 Člení Vickersovy metody na 3 oblasti dle použitého zkušebního zatížení⁵

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při malém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,2	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

V dnešní době se používají vylepšené Vickersovy tvrdoměry tzv. diatestery. Obraz vtisku je promítán zvětšeně na matici, což usnadňuje přesnější odečtení. Už existují i přístroje, které jsou schopny velikost úhlopříček odečíst samy a určit výslednou tvrdost.



Obr. 1.7 Digitální tvrdoměr Vickers 50kg⁶ a starší typ tvrdoměru²

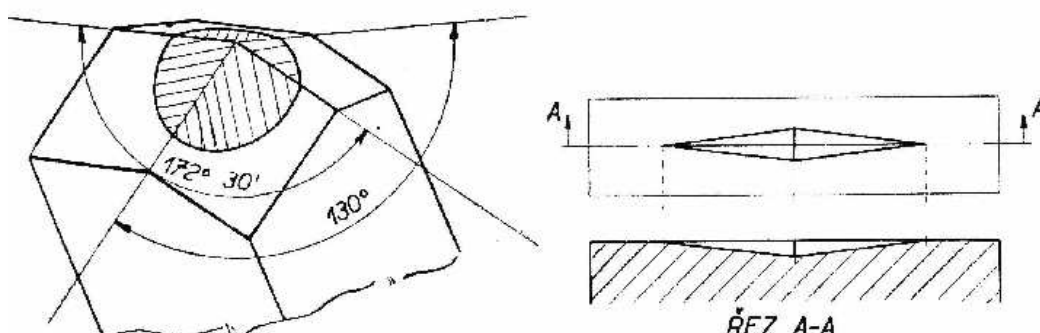
Značení zkoušky se vyjadřuje symbolem HV. Tvrdost se zapisuje před tento symbol a za se vepíše velikost používaného zkušebního zatížení

v kg/dobou zatížení (pokud je doba standardní 10 – 15 sekund, tak se neuvádí). Příklad značení je 550 HV 5.

Vickerova metoda splňuje všechny teoretické požadavky - odstraňuje Brinellovy i Rockvellovy nedostatky. Velmi universální metoda, používaná pro měření jak měkkých tak i nejtvrdějších kalených ocelí, není běžně používána u hrubozrnných a nehomogenních materiálů. Naměřené hodnoty jsou velmi přesné a na povrchu vytváří pouze nepatrný vryp.

1.1.5 Zkouška dle Knoop

Popsána normou ČSN ISO 4545 a ČSN ISO 10250 a byla vypracovaná roku 1939. Princip je stejný jako u Vickersovy metody akorát se liší tvarem indentoru. Ten také tvoří diamantový jehlan, ale jeho základnou není čtverec, ale protáhlý kosočtverec s poměrem úhlopříček zobrazených na obrázku 1.8.



Obr. 1.8 Tvar diamantového jehlanu dle Knoop a vzhled vtisku Knoopova jehlanu³

Tvrдость je vyjádřena vzorcem¹

$$HK = \frac{F}{A} = \frac{F}{kl^2} \quad (1.3)$$

Kde: F ... zatížení [N]
 A ... plocha průmětu vtisku [mm²]
 l ... největší rozměr úhlopříček [mm]
 $\frac{1}{k}$... konstanta, (pro ideální tvar 1.451, ale každý jehlan má výrobcem zjištěný svůj) [-]

Při této metodě je nutné dodržet vysoké nároky na zkoušenou plochu a ostrosti hran indentoru. Výhodou je podélný tvar vtisku, který můžeme využít u tenkých ploch, například u měření tvrdosti drátů. Dalším kladem je, že díky malé hloubce průniku indentoru, se změří tvrdost i slabé povrchové vrstvy.

K méně známým vnikacím zkouškám patří Bierkovičova. Indentorem je zde pravidelný diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 65°, jehož základnou je rovnostranný trojúhelník. Uplatnění této zkoušky je u měření velmi tvrdých materiálů.

1.1.6 Zkoušky mikrotvrdotí

Mikrotvrdot je určena pro použití zcela malých zatížení tak, aby vznikly jen nepatrné vtisky. Jako hranici mezi mikro a makrotvrdotí se často uvádí hodnota 19,8 N. Nelze ji určovat obvyklými tvrdoměry, protože vyžaduje mnohem větší požadavky na přesnost. K proměření vtisku slouží velmi přesná optika.¹

Pro zkoušky mikrotvrdotí jsou použitelné jedině vnikací metody s diamantovým indentorem. Prakticky přichází v úvahu pouze metoda Vickersova, Knoopova, Biekovičova.

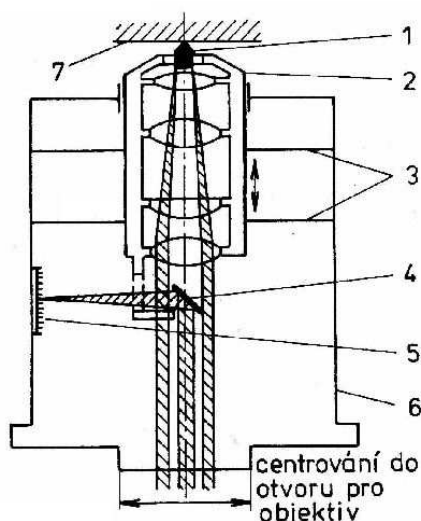
Vickersova metoda je méně přesná, ale nenáročná na přípravu povrchu. U této metody se změří velikost úhlopříček d_1 a d_2 , u měření podle Knoopovy metody se změří délka vtisku l . Výsledná tvrdost se vypočítá pomocí vztahů:⁵

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (1.4)$$

$$KHN = \frac{F}{0,07028 \cdot l^2} \quad (1.5)$$

Kde: HV ... tvrdost podle Vickerse
 KHN ... tvrdost podle Knoopova
 F ... zkušební zatížení [N]
 d ... průměrná hodnota úhlopříčky vtisku [mm]
 l ... délka vtisku [mm]

Jednou z nejpřesnějších konstrukcí mikrotvrdoměrů je Hanemannův. Jako vnikací tělísko je použit Vickersův jehlan, který je usazen přímo do speciálního objektivu. Ten je zavěšen na pružných membránách.



- 1- Vickersova pyramida
- 2- Nosič objektivu
- 3- Závěsné membránové pružiny
- 4- Optický hranol
- 5- Stupnice zatížení
- 6- Kryt
- 7- Výbrus

Obr. 1.9 Schéma Hanemannova mikrotvrdoměru³

Využití těchto metod je při měření velmi malých předmětů, tenkých vrstev, měření tvrdosti jednotlivých strukturních složek, při studii vlivu tepelného zpracování. Jednotlivé vtisky mohou být vzdáleny od sebe i 0,05 mm.

1.2 Zkoušky tvrdosti rázem

Zkoušky rázem se dělí na dva druhy. A to vnikací, kde je klidné zatěžování nahrazeno rázem, nebo zkouška založená na principu měření velikosti odrazu indentoru spuštěného na zkoušený vzorek určitou energií.¹

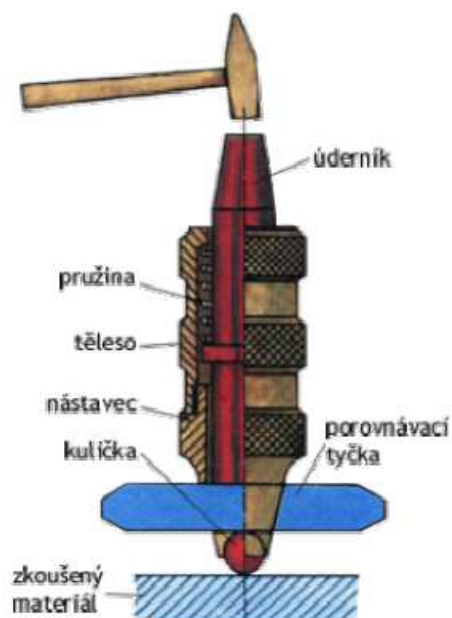
Přesnost dynamických zkoušek je obecně považována jako méně přesná než u zkoušek statických. Z dynamických vnikacích zkoušek se nejvíce se uplatnily zkoušky pomocí Poldi a Baumanna kladívka. Vnikacím tělískem je kulička. Do druhé skupiny se řadí metody: Shoreho skleroskop, Duroskop, tvrdoměr Equotyp.

1.2.1 Dynamicko plastické

- Poldi kladívko

Tento jednoduchý tvrdoměr byl patentován roku 1921. Umožňuje stanovení tvrdosti na základě plastické deformace vzniklé rázem. Následně se porovná velikost vtisku do zkoušeného materiálu s vtiskem do materiálu o známé tvrdosti.

Při vlastní zkoušce se nejprve vloží do pouzdra Poldi kladívka porovnávací etalonová tyčinka. Tvrdoměr přiložíme kolmo na zkoušenou plochu tak, aby indentor (ocelová kalená kulička o průměru 10 mm) se dotýkala zkoušené plochy. Následně se ručním kladívkem udeří na úderník. Díky vyvozenému rázu se vytvoří vryp na zkoušeném tělese i na etalonu. Velikost obou vtisků se porovná a dle tabulek se určí hledaná tvrdost. Výsledná hodnota je zapisována se zkratkou HB POLDI.

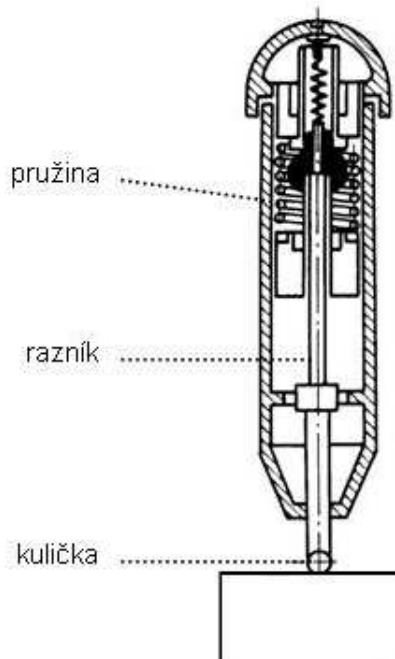


Obr. 1.10 Poldi kladívko³

Tato metoda nedosahuje příliš velké přesnosti, zjištěné hodnoty jsou především informativní. Ale bezspornou výhodou je jeho velká mobilita, je vhodný k měření velkých konstrukcí. Dá se použít skoro v každé poloze, díky svým malým rozměrům a hmotnosti.

- Baumannovo kladívko

Tato metoda je založena na podobném principu jako Poldi kladívko. Akorát nositelem energie není kladivo, ale pružina s definovanou tuhostí nacházející se v zařízení. Na počátku zkoušky je pružina napnutá, ale po jejím odjištění dojde k úderu razníku na indentor ve tvaru kuličky o průměru 5 nebo 10 mm. Po odlehčení pružiny se určí tvrdost dle tabulek, která je součástí vybavení přístroje.



Obr. 1.11 Schéma Baumannova kladívka²

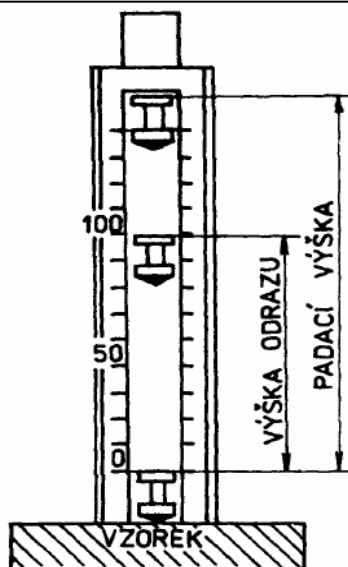
Tento způsob měření je ještě méně přesný než pomocí Poldi kladívka, ale jedná se také o velmi rychlý, mobilní a jednoduchý způsob měření tvrdosti materiálu ve výrobě.

1.2.2 Dynamicko elastické

Také nazývané jako odrazové. Jsou založeny na odrazu pružného tělesa, padajícího z určité výšky nebo úhlu na povrch vzorku. Kinetická energie padajícího tělesa se při dopadu rozloží na elastickou deformaci povrchu a energii odrazu. Skutečnou tvrdost odečteme z úhlu nebo výšky odrazu. Tyto zkoušky se používají u zjišťování tvrdosti velmi tvrdých materiálů.²

- Shoreho skleroskop

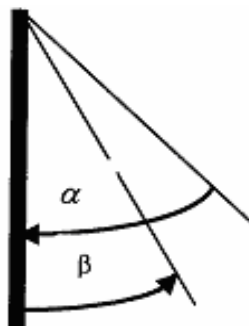
Tato metoda využívá volného pádu indentoru, kterým je kulovitě zabroušený diamant o váze $m = 2,5$ g. Těleso volně padá z výšky $H = 10''$ (254 mm) skleněnou kalibrovanou trubkou, přiloženou kolmo ke zkoušenému materiálu. Energie, která se během odrazu nespotřebuje na elastickou a minimální plastickou deformaci způsobí odraz pádového tělesa do výšky. Z této hodnoty se dle norem určí výsledná tvrdost. Měření by nemělo probíhat dvakrát na stejném místě, protože po každém pokusu dochází v tomto místě ke zpevnění povrchu, což ovlivňuje výsledek měření.²

Obr. 1.12 Schéma Shoreha skleroskopu²

Shoreho metoda již není v současné době moc využívána z důvodu velké nepřesnosti měření. Tato metoda našla největší uplatnění u měření tvrdosti pryže a plastů

- Duroskop

Pracuje na principu odrazu indentoru od svislé stěny měřeného vzorku. Kladívko upevněné v rámu (indentor) je spuštěno vždy ze stejného úhlu α . Následně se odrazí o úhel β , jeho velikost charakterizuje naměřenou tvrdost.

Obr. 1.13 Schéma Duroskopu³

Podobně jako u Shoreho metody jsou i v tomto případě nepřesnosti měření značné. Proto se v praxi moc nevyužívá, ale objevuje se spíše jen v laboratorních měření.

- Tvrdoměr Equotyp

Princip této metody vychází z měření kinetické energie sondy, která je pomocí pružiny vymrštěná proti zkoumané ploše. Jelikož ve vzorci kinetické energie je proměnnou rychlost, je měřena právě rychlost sondy před a po dopadu. Čím je zkoumaný materiál měkčí, tím je odrazová rychlost menší, a tím pádem i rozdíl energií větší.⁵

1.3 Zkoušky vrypové

Nejstarším typem měření tvrdosti materiálů je porovnávání minerálů podle Mohsovy stupnice. Již v roce 1822 Friedrich Mohs sestavil jako první stupnici deseti kovů, kde vždy s materiálem o vyšším čísle lze udělat vryp do materiálu s číslem nižším.

Tab 1.3. Mohsova stupnice

Tvrdoštní číslo	Minerál	Absolutní tvrdost	Tvrdoštní číslo	Minerál	Absolutní tvrdost
1	Mastek	1	6	Orthoklas	72
2	Sůl kamenná	3	7	Křemen	100
3	Vápenec	9	8	Topaz	200
4	Fluorit	21	9	Korund	400
5	Apatit	48	10	Diamant	1500

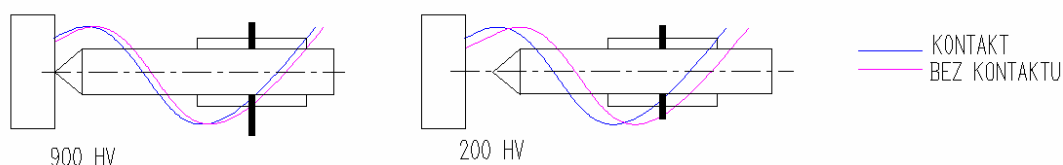
Tato metoda se v hojně míře využívá především v mineralogii. Ve strojírenství se ale moc nevyužívá, protože citlivost této stupnice je příliš malá a tím pádem vznikají velké nepřesnosti měření. U kovů se určuje tvrdost na základě šířky vytvořeného vrypu pomocí Martensova přístroje.

1.4 Zkoušky novodobé

- Ultrazvuková metoda (UCI)

Pro velmi přesné měření v těžko přístupných místech a malých dílů se využívá axiálně kmitající tyčinky s Vickersovým diamantovým hrotem. Po zatížení měřeného materiálu se změní frekvence kmitu jako je zobrazeno na obrázku 1.13. Velikost změny frekvence je závislá tvrdosti a modulu pružnosti materiálu.

Velké uplatnění tato metoda získala u měření součástí v těžko přístupných místech a na finálních opracovaných plochách. Pomocí této metody se měří například tvrdosti lopatek turbín a kompresorů, evolventní plochy ozubených kol, svarové spoje, písty.⁷



Obr. 1.13 Schéma Duroskopu⁷

- Universální tvrdost

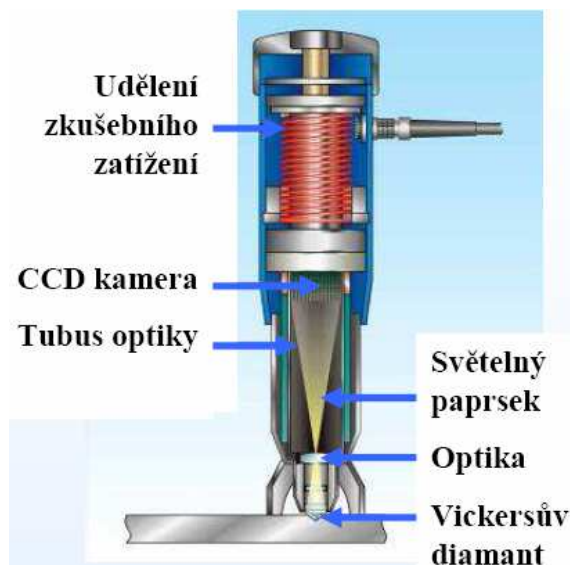
Jak již z názvu vyplývá, tato metoda měla sjednotit a nahradit všechny doposud zmíněné zkoušky. Ale nakonec se oproti očekávání se zatím neuplatnila a dále mnohem využívanějšími jsou klasické metody Rockwell či Brinell.

Podstatou zkoušky je vnikání pravidelného diamantového jehlanu s vrcholovým úhlem 136° do povrchu vzorku. Výsledná tvrdost je pro tuto metodu také definovaná jako síla na plochu. Tento typ zkoušek umožňuje zjistit závislost zátěžné síly na hloubce, podíly elastické a plastické práce, plastickou tvrdost, creep a mnoho dalších. Označuje se symbolem HU.⁵

- Optická metoda TIV

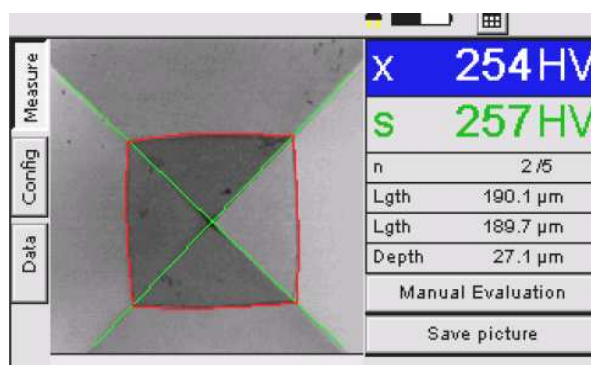
Jednou z nejmodernějších metod je měření pomocí průhledného diamantového (Vickersova) jehlanu, za kterým je umístěna CCD kamera s optikou. Ta předává signál k vyhodnocení a díky ní můžeme na LCD displeji sledovat průběh měření v reálném čase.

Zatížení je vyvíjeno ručně, které je následně regulováno pomocí mechanismu přístroje. Získaný výsledek není ovlivněn elastickými vlastnostmi materiálu. Přístroj je možné využít pro různé druhy materiálů a nemusí se kalibrovat.⁷



Obr. 1.14 Optická metoda TIV⁸

Jeho využití je především u měření velmi malých dílů a slabých trubek. Zkoušku lze provádět i na hrubém povrchu ovšem ne hrubozrnných materiálů.⁸



Obr. 1.15 Ukázka obrazu na displeji při měření metodou TIV⁸

- Měření tvrdosti elektrickým odporem

Při měření tímto principem se nejdříve pomocí magnetu umístí na testovaný vzorek pomocná elektroda. Následně se vtlačí do materiálu indentor (čtyřboký pokovený diamantový jehlan). Mezi tímto indentorem a pomocnou elektrodou začne protékat elektrický proud. Z odporu tohoto proudu se hodnotí tvrdost.¹⁰

2. KONTROLA TVRDOMĚRŮ A PŘEVODY HODNOT TVRDOSTI

2.1 Ověřování a kontrola tvrdoměrů

Výsledky každého měření tvrdosti, které se používají v obchodním styku (jsou uváděny v dokladech o jakosti výrobku nebo jakost výrobku ovlivňují), musí být zjištěny na úředně ověřeném tvrdoměru. Ten pak musí být v pravidelných časových intervalech u nás úředně ověřován českým metrologickým institutem.

Institut na tvrdoměru ověří:

- velikost zkušebního zatížení
- používaná vnikací tělesa
- měřicí zařízení tvrdoměru
- vyhodnocovací zařízení tvrdoměru

V případě, že vše vyhovuje požadavkům příslušných norem, je na tvrdoměr vylepen štítek, který udává datum platnosti. Do této doby nesmí být na tvrdoměru prováděna žádná úprava, nesmí být poškozen a ani vystaven žádným nepříznivým změnám ve svém okolí.

Jestliže je tvrdoměr používán jako pracovní, například kontroluje mezioperační povrch polotovaru, musí být kontrolován podnikovým kalibračním a měrovým střediskem. Kontrola se provádí pomocí kalibrované sady destiček. Výsledek se určí porovnáním naměřených hodnot a skutečné tvrdosti destičky. Vždy musí být provedena kontrola pro všechny zkušební zařízení a použité indentory.

Každá metoda má stanoveny svoje podmínky kontroly. Například u Brinellovy metody se provádí 5 vtisků do každé tvrdoměrné destičky. Ty musí být použity minimálně dvě pro každé zkušební zatížení a druh kuličky. Pro každou tvrdoměrnou destičku se dle vzrůstající velikosti sestaví řada vtisků $d_1, d_2 \dots d_5$ a vypočte se aritmetický průměr $d_{stř}$. Spolehlivost tvrdoměru, která se určí z rozdílu $d_5 - d_1$, je porovnána a vyhodnocena dle tabulky 2.1.³

Tab 2.1 Kriteria spolehlivosti tvrdoměrů Brinell³

Tvrdomost destiček HBS (HBW)	Spolehlivost tvrdoměru
< 125 HB	0,030 $d_{stř}$
125 < HB < 225	0,025 $d_{stř}$
> 225 HB	0,020 $d_{stř}$

Chyba tvrdoměru je obecně dána vztahem 2.1 a vyhodnocena s hodnotou dle tabulky 2.2

$$H_{stř} - H \quad (2.1)$$

Kde: $H_{stř}$ aritmetický průměr naměřených tvrdostí

H jmenovitá tvrdost destičky

Tab 2.2 Maximální přípustná chyba tvrdoměru Brinell³

Tvrdomost destiček HBS (HBW)	Maximální přípustná chyba tvrdoměru
< 125 HB	3 % H
125 < HB < 225	2,5 % H
> 225 HB	2 % H

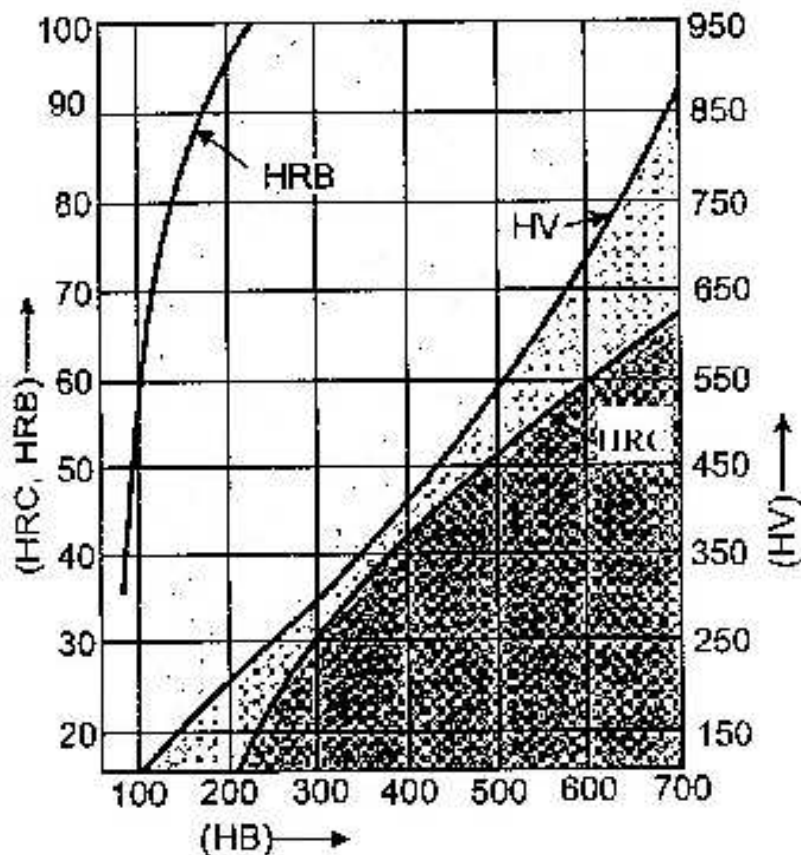
2.2 Převody hodnot tvrdosti

Srovnávat hodnoty naměřené tvrdosti lze jen při použití stejné metody, indentoru a zkušebního zatížení. Pro různé vzorky jsou, ale vhodné jiné metody zkoušky. Volba je ovlivněna především materiálem, povrchovou úpravou, rozměry vzorku. Pro porovnávání metod a pro předepsanou metodu konstruktérem, která však nelze použít, se využívá převod hodnot. Tyto převody jsou pouze orientační a popsány normou ČSN EN ISO 18265. Tato mezinárodní norma popisuje převody hodnot tvrdosti různých zkušebních metod měření tvrdosti, nebo hodnot tvrdosti na hodnoty meze pevnosti v tahu.

Převodní tabulky se používají pro:

- nelegované a nízkolegované oceli a litiny
- oceli k zušlechťování
- oceli pro práci za studena
- rychlořezné oceli
- tvrdokovy
- neželezné slitiny a materiály

Na základě těchto převedených hodnot se nesmí provádět reklamační řízení a vždy musí být uvedeno, kterou metodou bylo provedeno měření před převodem.⁹



Obr. 2.1 Srovnání jednotlivých metod tvrdosti³

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro provedení experimentální části byly navštíveny dvě strojírenské firmy. Hlavním výrobním programem první firmy je konstrukce a výroba přesných převodovek, zejména do textilních strojů. Firma disponuje plně vybavenou dílnou povrchových úprav. Při kontrole využívají metod Rockwella a Vickerse.

Druhé firmy, která se zabývá především výrobou elektrospotřebičů, je nedílnou součástí nástrojárna. Zde je řešena problematika výroby prototypových a vstřikovacích forem, nástrojů pro kovové díly. Proto se využívá velmi tvrdých a rozměrově stalých materiálů. Jsou jimi například: EN ISO 1.2343, EN ISO 1.2344, které se kalí, následně dvakrát popustí na tvrdost 50 – 54 HRC a uplatňují se na vložky forem. Dále pro výrobu vodících lišt přítlačných destiček je to materiál EN ISO 1.2842, ten se kalí na tvrdost 56 až 58 HRC. Pro dosažení velmi tvrdého povrchu až 60 HRC a měkkého jádra – tedy cementaci se používá materiál EN ISO 1.7131. V této firmě se při potřebě povrchové úpravy, především vakuového kalení, využívá kooperace se specializovanými podniky. Tato specializovaná firma společně s upraveným vzorkem zašle protokol o osvědčení o zkoušce tepelného zpracování. Kde kromě formálních údajů je uvedena i skutečná naměřená tvrdost, která vyhovuje požadavkům zákazníka. Firma vlastní pouze jeden tvrdoměr Rockwell.

3.1 Měření tvrdosti nože brusle

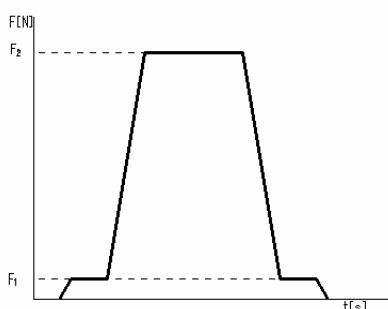
Na ukázkou bylo provedeno měření tvrdosti nože brusle. Metoda byla zvolena podle Rockwella, protože se jedná o ocel vyšší třídy.



Obr. 3.1 Ukázka z měření tvrdosti nože brusle

- Průběh zkoušky

Vzorek byl očištěn a položen na tvrdou podložku tak, aby byl stabilní a nemohl se při průběhu měření pohnout. Bylo zkontrolováno, ukazuje-li tvrdoměr v nezátíženém stavu opravdu nulovou hodnotu. Vnikajícím indentorem byl diamantový kužel o vrcholovém úhlu 120° . Nejprve nože brusle byla zatížena silou F_1 , která dle normy má hodnotu 100 N. Po uběhnutí doby 10 s, která odstranila větší nepřesnosti měření, se vzorek zatížil silou F_2 (1 500 N). Poté se znovu zmenšila na F_1 . Průběh zatěžování je zobrazen na obrázku 3.2. Výsledná hodnota byla odečtena z příslušné stupnice. Pro toto měření byla zvolena černá, protože jako indentor byl použit kužel, červená stupnice je určena pro měření ocelovou kuličkou.



Obr. 3.2 Časový průběh zatížení

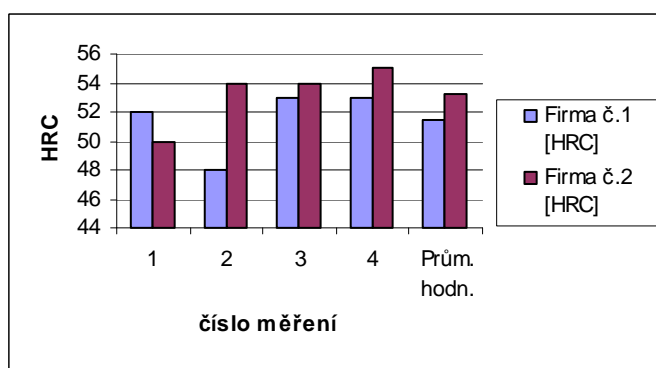
- Naměřené hodnoty

Tab 3.1. Tabulka naměřených hodnot

Číslo měření	Firma č.1 [HRC]	Firma č.2 [HRC]
1	52	50
2	48	54
3	53	54
4	53	55
Průměrná hodnota	51,5	53,25

- Zhodnocení výsledků

Výsledná naměřená tvrdost se pohybuje v rozmezí 51 ± 3 HRC. Jelikož měření bylo provedeno na dvou různých přístrojích odlišných firem nedochází k velkým rozporům. Pro dosažení přesnějšího měření mohlo být nashromážděno více hodnot



Obr. 3.3 Porovnání výsledků měření tvrdosti nože brusle

3.2 Měření měděného pásu

Pro další ukázkou bylo provedeno měření na pásu měděného plechu. Jako vhodná metoda se nejvíce jevila Rockellova, ale indentor se zaměnil za ocelovou kalenou kuličku průměru 10 mm.

- Průběh zkoušky

Průběh je totožný s předchozím měřením, akorát měření probíhalo s odlišným indentorem a zkušební zatížení se zmenšilo na 1 000 N. Hodnoty se odečítaly z červené stupnice.

- Naměřené hodnoty

Tab 3.2. Tabulka naměřených hodnot

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	Průměrná hodnota
Tvrdość [HRB]	49	48	49	47	49	47,5	47	48,1

- Zhodnocení výsledků

Výsledná naměřená tvrdost se pohybuje v rozmezí 48 ± 1 HRB. Tato velikost se orientačně může převést na Brinellovu tvrdost. Hodnota 48 HRB podle převodních tabulek normy ČSN EN ISO 18 265 odpovídá 85,5 HB.

3.3 Měření měděného vyleštěného pásu

Pro poslední ukázkou byl z předchozího pásu plechu kus uříznut a vyleštěn. Měřícím přístrojem byl vybrán mikrotvrdoměr IdentanMet 1 100.

- Průběh zkoušky

Zkoušený vzorek byl položen na pracovní stůl. Mechanická část se nastavila asi 5 mm nad zkoušeným vzorem, kde se zajistila. Nyní stačilo zmáčknout tlačítko start a Vickersovým mikrotvrdoměrem bylo provedeno měření. Po rozsvícení zelené kontrolky se pomocí zvětšeného obrazu v okuláru nastavila délka úhlopříčky. Následně byl okulár otočen o 90° a stejným způsobem byla změřena druhá úhlopříčka. Následně byla přístrojem vyhodnocena výsledná tvrdost a zobrazena na displeji.

- Naměřené hodnoty

Tab 3.3. Tabulka naměřených hodnot mikrotvrdości

Číslo měření	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota
Tvrdość [HV]	110	113	112,5	110,4	111	111,4

- Zhodnocení výsledků

Po tomto měření na plechu zbyly opravdu neviditelné vrypy. Podle grafu na obrázku 2.1 hodnota 111 HV odpovídá zhruba 105 HB. Tato hodnota se od předchozího měření liší téměř o 20 HB. Hodnoty mikrotvrdości vycházejí vyšší z důvodu zmenšení vtisku po odlehčení o elastickou deformaci. Její podíl na celkové velikosti vtisku se zvětšuje s jeho klesající velikostí. Přesnost porovnávacích výsledků při převodu klesla.

ZÁVĚR

Pro vyhodnocování tvrdosti v dnešní době existuje velké množství zkušebních metod. V teoretické části této práce je snahou vystihnout ty nejdůležitější a v technické praxi nepostradatelné.

Významné místo si také na trhu vydobily přenosné tvrdoměry, díky nimž je možno měřit i objemové konstrukce v špatně přístupných místech. Sice existují metody, které pracují na principu například měrného elektrického odporu či ultrazvuku, ale stále se neupouští od typických představitelů (Brinella, Rockwella, Vickersova) těchto zkoušek.

Tab 3.4. Tabulka používaných metod

metoda	indentor	Měření	využití
Brinell	kulička	průměr vpichu	měkké heterogenní materiály
Rockwell	kulička, diamantový kužel	hloubka vpichu	tvrdé materiály
Vickers	diamantový jehlan	úhlopříčky	universální metoda, nevhodná pro litinu
Knoop	diamantový jehlan	délka nejdelší uhlopříčky	malá tloušťka povrchové vrstvy
Shoreho skleroskop	kulovitě zabroušený diamant	výška odrazu indentoru	pryž, plasty
TIV	diamantový jehlan	úhlopříčky	hrubý povrch homogenních materiálů

Měření tvrdosti je nepostradatelnou součástí vstupní i výstupní kontroly výrobků či materiálů. Ve velkých firmách, kde jsou samozřejmostí zařízení pro povrchové úpravy materiálů, vlastní firma více nejmodernějších tvrdoměrů. Ty se obvykle stávají součástí automatických linek, které jsou z ekonomického hlediska velmi výhodné. Sice jejich pořizovací cena je vysoká, ale ta se během provozu brzy vrátí, protože nepotřebují kvalifikovanou obsluhu a urychlují měření. Naopak menší firmy využívající kooperaci se specializovanými podniky na zušlechťování kovů, vlastní mnohdy jen jeden starší typ tvrdoměru pro svoji předběžnou orientaci.

Díky rozvoji informačních technologií se dnes už upouští od klasického papírového archivování a vše se nahrazuje elektronickou podobou. To urychluje a usnadňuje práci se získanými daty.

Závěrem této práce jsou ukázky měření, kde je snaha ověření získaných informací do praxe.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. JAREŠ, Vojtěch. Základní zkoušky kovů a jejich teorie. 1.vyd. Praha: Academia, 1966, 229 s.
2. MOLIKOVÁ, Eva. Zkoušení materiálů a výrobků. [online]. 2005 [cit. 2010 – 03 - 06]. Dostupný na World Wide Web: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/Index.html>>.
3. ATEAM, materiálový výzkum. [online]. 2005 [cit. 2010-04-22]. Dostupný na World Wide Web: <http://ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf>.
4. CONVERTER. [online]. 2002 [cit. 2010-04-16]. Dostupné na World Wide Web: <www.converter.cz>.
5. METROTEST, s.r.o. Kladno. [online]. 1994 [cit. 2010-03-10]. Dostupné na World Wide Web: <www.metrotest.cz/hardness/zkousky_tvrlosti.pdf>.
6. VÝROBNÍ STROJE, s.r.o. Vyškov. [online]. 2000 [cit. 2010-03-10]. Dostupné na World Wide Web: <www.vyrobnistroje.cz>.
7. Studenti Masarykovy univerzity Brno. [online]. 2008 [cit. 2010-03-10]. Dostupné na World Wide Web: <www.ndt.cz>.
8. TESTIMA, s.r.o. Horní Počernice. [online]. 1994 [cit. 2010-05-11]. Dostupné na World Wide Web: <www.testima.cz>.
9. VOLEJNÍK, Jiří - Technické normy. [online]. [cit. 2010-05-16]. <www.technickenormy.cz>.
10. MM Průmyslové spektrum. [online]. 2008 [cit. 2010-04-16]. Dostupné na World Wide Web: <www.mmspektrum.com>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
HB	-	Tvrđost dle Brinella
HR	-	Tvrđost podle Rockwella
HV	-	Tvrđost dle Vickerse
KHN	-	tvrdost dle Knoop
A (S)	mm ²	průmět plochy vtisku
D	mm	průměr kuličky
F	N	zkušební síla
S	mm ²	plocha vtisku
d	mm	průměrná hodnota průměru vtisku
d ₁ , d ₂	mm	Velikost ší úhlopříčky
g	m·s ⁻²	gravitační zrychlení
h	mm	hloubka vtisku
l	mm	délka vtisku
α	°	Úhel souštění při měření pomocí duroskopu
β	°	Úhel odrazu při měření pomocí duroskopu