

Měření tvrdosti kovů

Radek Šašinka

Bakalářská práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek ŠAŠINKA**
Osobní číslo: **T07769**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Měření tvrdosti kovů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární studie na dané téma**
- 2. Příprava zkušebních těles**
- 3. Provedení měření tvrdosti na připravených zkušebních tělesech**
- 4. Vyhodnocení naměřených výsledků**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího BP

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Mañas, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

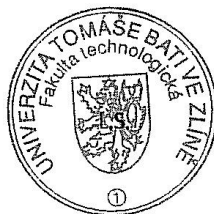
Datum zadání bakalářské práce: **19. února 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2010**

Ve Zlíně dne 15. ledna 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

podpis

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá měřením tvrdosti kovů. V teoretické části jsou popsány a rozděleny jednotlivé způsoby měření tvrdosti kovů a také vysvětleny principy přístrojů pro tato měření. V praktické části experimentálně pomocí vybraných metod stanovuji tvrdosti zadaných vzorků a získané hodnoty zpracovávám a vyhodnocuji.

Klíčová slova: zkoušky tvrdosti, Rockwell, Vickers, Brinell, tvrdost

ABSTRACT

The bachelor's thesis discusses the hardness test of metal. In the first part I start from the theoretical basis, dealing and dividing individual method measure hardness metal and so explain princip measure's machine.

Keywords: hardness test, Rockwell, Vickers, Brinell, hardness

Poděkování:

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D za odborné vedení, poskytnuté rady, za čas a trpělivost, kterou mi věnoval při vypracování práce.

Dále chci poděkovat své rodině za podporu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné

Ve Zlíně

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ZKOUŠKY TVRDOSTI	12
1.1 ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK TVRDOSTI.....	12
2 ZKOUŠKY STATICKÉ	13
2.1 ZKOUŠKY VRYPOVÉ (METODA MARTENSE)	13
2.2 ZKOUŠKY VNIKACÍ	14
2.2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella	16
2.2.1.1 Provedení zkoušky	18
2.2.1.2 Princip zkoušky.....	20
2.2.1.3 Vnikací tělesa a zkušební síly	21
<i>Měřicí zařízení</i>	22
2.2.1.4 Zkoušené těleso.....	23
2.2.1.5 Postup zkoušky	24
2.2.1.6 Zkušební protokol	26
2.2.1.7 Označení zkoušky	26
2.2.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	26
2.2.2.1. Vztah pro výpočet tvrdosti podle Vickerse.....	28
2.2.2.2. Provedení zkoušky	29
2.2.2.3. Zkušební zařízení	31
2.2.2.4. Zkoušené těleso.....	32
2.2.2.5. Postup zkoušky	32
2.2.2.6. Zkušební protokol	33
2.2.2.7. Označení zkoušky	34
2.2.3. Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	34
2.2.3.1. Postup při zkoušce	35
2.2.3.2. Zkouška mikrotvrdosti	35
2.2.3.3. Princip zkoušky.....	36
2.2.3.4. Vnikací tělesa a zatěžující síly.....	38
2.2.3.5. Zkoušené těleso.....	39
2.2.3.6. Postup zkoušky	39
2.2.3.7. Zkušební protokol	40
2.2.3.8. Označení zkoušky	40
3 ZKOUŠKY DYNAMICKÉ	41
3.3 PLASTICKÉ ZKOUŠKY	41
3.3.1 Metoda volným pádem.....	41
3.3.2 Metoda stlačenou pružinou	41
3.3.2.1 Baumanovo kladívko	41
3.3.3 Metoda porovnávací.....	42
3.3.3.1 Kladívko Poldi	42
3.3.3.2 Tvrdoměr Poldi	43
3.3.4 Metoda kyvadlová – Duroskop	44
5 ZKOUŠKY VRYPOVÉ	46
CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	48
II PRAKTICKÁ ČÁST	49

5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	50
5.1	TYPY ZKOUŠEK.....	50
5.2	POSTUP MĚŘENÍ.....	50
6	TEPELNÉ A CHEMICKO – TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	53
6.1	CEMENTOVÁNÍ	53
6.2	NITRIDOVÁNÍ	53
6.3	POVRCHOVÉ KALENÍ	53
6.4	ZUŠLECHTĚNO.....	54
7	OCELI 14 220	55
7.1	ZÁKLADNÍ MATERIÁL OCELI 14 220	55
7.2	ZUŠLECHTĚNÁ OCEL 14 220	57
7.3	POVRCHOVĚ KALENÁ OCEL 14 220	58
7.4	CEMENTOVANÁ OCEL 14 220	59
7.5	NITRIDOVANÁ OCEL 14 220	60
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ	62
9	ZÁVĚR.....	67
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	68
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ	70
	SEZNAM TABULEK.....	72

ÚVOD

Zkoušky tvrdosti v dnešní době zastávají v oboru zkoušení materiálů asi jedno z nejdůležitějších míst. S jejich pomocí získáváme cenné informace o odporu tvárné deformace na malých nebo i mikroskopických částech materiálu. Údaje o tvrdosti prvků, jejich sloučenin a materiálu z nich vyrobených patří v technické praxi k běžným charakteristikám látek. Z tvrdosti často usuzujeme další vlastnosti materiálu, jako např. obrobitelnost, pevnost v tahu atd. Člověk svými smysly rozliší látky měkké od tvrdých, ale takové rozdělení ani zdaleka neuspokojuje dnešní potřeby, zvláště při stále se zvětšujících potřebách na jakost a kvalitu v nástrojovém průmyslu. Mezi nejznámější tvrdé přírodní látky patří diamant, korund, topaz. Vývoj zkušebních metod k měření tvrdostí probíhá již přes 200 let a doposud se nepodařilo dojít k jednotné koncepci. U jednoho kovu lze stanovit tolik tvrdostí, kolik je způsobů měření.

Hlavním cílem bakalářské práce je srovnat tvrdosti různých kovových vzorků vybranými druhy zkoušek. V teoretické části se zaměřím na vypracování literární rešerše s poohlédnutím na nejrozšířenější druhy zkoušek tvrdosti, jejich rozdělení a využití. Seznámení s geometrií testovacích tělísek a jejich následných otisků, z nichž se určí výsledná tvrdost. Postupem a zásadami měření. V praktické části budu analyzovat tvrdost kovů různé struktury, tepelné a chemicko-tepelné úpravy. Následně vyhodnotím a srovnám, které zpracování je z hlediska tvrdosti nejvhodnější.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Již přes 200 let trvá vývoj metod zkoušek tvrdosti, ale ani doposud se nedospělo k jednotné koncepci tvrdosti. U zadaného vzorku kovu můžeme naměřit tolik tvrdostí, kolik použijeme metod měření k jeho stanovení. Vlastnosti, které se projevují za působení vnějších sil, se označují jako mechanické vlastnosti materiálu, tudíž měření tvrdosti patří mezi zkoušky mechanické. Tvrdost je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa s přesně definovanou geometrií. Z výsledků zkoušky tvrdosti můžeme také usuzovat i další vlastnosti materiálu (např. pevnost v tahu, obrobitelnost atd.). Získanou tvrdost nelze jednoznačně definovat jako fyzikální veličinu, jelikož výsledky jsou značně ovlivněny způsobem provedení zkoušky.

1.1 Rozdělení zkoušek tvrdosti

Tab. 1. Rozdělení zkoušek tvrdosti

Zkoušky makrotvrdomi	Statické	Vrypové	Metoda Martense
		Vnikací	Metoda Brinell
			Metoda Vickers
			Metoda Rockwell
	Dynamické	Plastické nárazové	Metoda volným pádem
			Metoda stlačenou pružinou
			Porovnávací metoda
		Elastické odrazové	Metoda volným pádem (Shore)
			Metoda kyvadlová (Duroskop)
Zkoušky mikrotvrdomi	Statické	Vnikací	Metoda Vickers při zatížení do 4,9N

2 ZKOUŠKY STATICKÉ

Vývoj metod k určování tvrdosti byl nejednotný a také definice tvrdosti, která by plně vyhovovala, nebyla doposud objevena. Během vývoje byla snaha o určení „absolutní“ tvrdosti. „Hertz stanovil např. metodu, již se tvrdost určovala z normálového napětí vznikajícího ve středu kruhové plošky při stlačení dvou kuliček nebo při přitlačování kuličky k desce. Toto napětí určoval v okamžiku, kdy se počínal materiál tvárně deformovat, tj. při dosažení meze kluzu.

Pozdější kuličkové (i hrotové) metody vtiskové, které v současné době mají velký praktický význam, nesledovaly při měření již normálové napětí, takže se uvedená metoda zkoušení tvrdosti podle Hertze neuplatila v praxi. [1]

2.1 Zkoušky vrypové (Metoda Martense)

Patří mezi nejstarší způsoby zkoušení tvrdosti a vychází z určování tvrdosti nerostů podle Mohsovy stupnice tvrdosti. V této stupnici je seřazeno 10 nerostů. První nerost je nejměkčí a může do něj způsobit vryp jakýkoliv nerost, který je v Mohsově stupnici výše.

Tab. 2. Srovnání Mohsovy mineralogické stupnice a materiálů ve strojírenství

mineralogie		strojírenství		
1.mastek	6.živec	Grafit 0,5	Stříbro 2,5	Iridium 6
2.sůl kamenná	7.křemen	Cín 1,5	Antimon 3,5	Platiniridium 6,5
3.kalcit	8.topas	Olovo 1,5	Čisté železo 4,5	Ocel tvrdá 8,5
4.fluorit	9.korund	Hliník 2,0	Platina 4,5	Nitridovaný povrch 9
5.apatit	10.diamant	Zlato 2,5	Ocel měkká 5	Tvrdé (slinuté) kovy 9,8

Tato stupnice je však příliš nepřesná a jednotlivé stupně jsou navzájem neúměrné a proto se u kovů a slitin určuje tvrdost na základě šířky vrypu. Pro tato měření se používá přístroje Martensova.

Nástrojem je broušený diamant, upevněný na dvouramenné páce, který má hrot tvaru kužele o vrcholovém úhlu 90° . Na druhé straně páky je posuvné závaží. Zkoušený vzorek se pokládá na stůl, který je kulově uložen v podstavci tak, že se dá v podélném směru přístroje posouvat. Diamantový hrot je postupně zatěžován tak, aby při pohybu stole vytvořil na vzorku vryp o šířce 0,01mm. Zajišťování tvrdosti pomocí této metody není příliš přesné a nyní se této metody používá velmi málo.

Vrypová zkouška má v dnešní době pouze jedno praktické využití u velmi tvrdých povrchových několik mikronů tenkých vrstev nitridů popř. karbidů kovů. Tato zkouška se nazývá *scratch test*.

*„V tomto případě je zátěžná síla proměnná. Na určité délce se vytvoří vryp s narůstající silou, např. od 0 do 1,96N. U těchto vrstev se pak analyzuje jejich adhezivně-kohezní chování, tj. odezva vrstvy na pronikající pohybující se indentor. Indentor je opět diamantový kužel, avšak s vrcholovým úhlem 120° s poloměrem zaoblení vrcholu 0,2 mm. V tomto případě se pak určuje kritické zatížení L_c , které mělo za následek adhezni odtržení vrstvy. Standardní rychlost posuvu vzorku dx/dt má hodnotu 10mm/min a rychlost zvyšování síly $dL/dt = 100N/min$. Hodnota drsnosti R_a naměřeného povrchu by neměla překročit hodnotu 0,25 mm. Přístroj *scratch testu* zaznamenává průběh normálové F_n a tangenciální F_t síly působící na indentor, případně i hodnoty frikčního koeficientu $m = F_t/F_n$ a signál akustické emise, který vzniká při rozvoji a šíření vnitřních trhlinek vlivem vnějšího zatěžování. Po provedení zkoušky se povrch vrypu vyhodnocuje pomocí optického popř. řádkovacího elektronového mikroskopu. Sledují se lokality s adhezni i kohezním porušením vrstvy. Všechna tato porušení vrstvy se vyhodnocují v korelaci s výsledky signálu akustické emise. Zjištěné hodnoty se udávají v závislosti zatížení L_c a jsou plně uznávány jako veličiny charakterizující adhezni vlastnosti systému tenká vrstva-substrát.“ [1,2]*

2.2 Zkoušky vnikací

Tyto zkoušky jsou nejrozšířenějšími zkouškami tvrdosti kovů. U těchto zkoušek může být měřítkem tvrdosti velikost plastické deformace (metody Rockwell). [1,2,3]

Odolnost zkušebního materiálu proti vniknutí cizího tělesa je mírou velikosti sil, jimiž jsou atomy kovů navzájem vázány. U stejného vzorku kovu můžeme naměřit odlišnou tvrdost v závislosti např. na těchto hlavních činitelích:

- Velikost zrna. U jemnozrnných materiálů j v jednotce objemu více hranic zrn, které lépe odolávají vnikání cizího tělesa nežli střed zrna. Z toho vyplývá, že u jemnozrnných materiálů naměříme vyšší tvrdosti než u hrubozrnných materiálů.
- Teplota. S rostoucí teplotou kovu se zvětšují a stávají se méně pevnými vazby mezi jednotlivými atomy kovu. Díky tepelné roztažnosti a materiál se jeví měkčí.
- Cizí příměsi. Příměsi obsažené ve zkušebním materiálu snižují jeho plasticitu a tím se zvyšuje jeho tvrdost.
- Vnitřní pnutí. Mohou být způsobeny tvářením za studena, rozdílnou rychlostí chlazení vnitřku a povrchu výrobku. U výrobku vnitřním pnutím jsou naměřeny vyšší tvrdosti.

Zkoušený materiál musí mít hladký a rovný povrch, aniž by došlo ke změně jeho vlastností ohřevem či deformací za studena. Po zkoušce také nesmí být viditelné stopy na protilehlé straně zkoušeného materiálu.

U těchto zkoušek dochází k vtlačování kuličky (Brinell, Rockwell), kužele (Rockwell, Ludwik), čtyřbokého jehlanu (Vickers) nebo jiného geometrického tvaru (Knoop – jehlan s kosočtvercovou základnou) do povrchu zkoušeného materiálu. Vzniklý otisk dává míru tvrdosti a tedy tvrdost je určitá velikost trvalé deformace. Ta je závislá jednak na podmínkách zkoušky, ale i na mezikluzu a schopnosti zpevnování zkoušeného materiálu. U zkoušky vnikací dochází k trojosému namáhání a u zkoušky tahem pouze k jednoosému namáhání, tak zde platí jiná analogie. Díky této analogii existuje přibližný vztah mezi pevností oceli a její tvrdostí, což je příčinou velkého rozšíření této zkoušky. Mezi nejpoužívanější metody patří podle Rockwella, Vickerse a Brinnelle.

Naměřené hodnoty tvrdosti jsou pouhým srovnávacím číslem, bez jednotky napětí. Po vtisknutí tělesa do materiálu je napětí rozděleno velmi nerovnoměrně, počítá se idealizované střední napětí, z tohoto důvodu nemá výpočet reálný význam ani fyzikální opodstatnění. [4,5,6]

U zkoušky vnikací mají naměřenou tvrdost vliv:

- Pružné vlastnosti materiálu
- Plastické vlastnosti zkoušeného materiálu
- Velikost síly působící na vnikací těleso

- Tvar, rozměry, tvrdost a modul pružnosti materiálu vnikacího tělesa
- Tření mezi vakacím tělesem a zkoušeným materiálem
- Zkušební teplota
- Doba působení zatížení a rychlost zatěžování
- Tloušťka zkušebního tělesa nebo výrobku
- Vzdálenost mezi středem vtisku a okrajem zkušebního tělesa nebo výrobku. Vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků.

Vnikací zkoušky se mohou provádět na speciálních strojích (tvrdoměrech) a to buď stabilní a nebo přenosné konstrukce. Ke kontrole tvrdoměrů slouží tvrdoměrné destičky, které jsou cejchovány na určitou tvrdost. Výhodou kontroly tvrdoměru pomocí destiček spočívá v tom, že se kontrola provádí za stejných podmínek jako samotné měření, takže zahrne stejné zdroje chyb a měření.

2.2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Autorem této metody je švédský inženýr J.A. Brinell. Metoda byla poprvé představena v roce 1900 na 2. Mezinárodním kongresu o zkoušení materiálů. Ujala se a dnes je nejrozšířenější zkouškou tvrdosti na světě. Je vhodná na zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů s heterogenní strukturou. Zkouší se poměrně velký objem kovu, čímž získáme průměrnou hodnotu tvrdosti celé struktury materiálu.

Při zkoušce podle Brinella (ČSN EN ISO 6506) zatlačujeme určitou silou F do zkoušeného materiálu ocelovou kalenou kuličkou předepsaného průměru D (obr.). Po odlehčení se změří průměr vtisku d . Tvrdost podle Brinella je vyjádřena poměrem zatížení F k povrchu vtisku:

$$HB = \frac{F}{O} \quad \text{Kde } O \text{ je povrch kulového vrchlíku vytlačeného použitou kuličkou}$$

$$O = \pi \cdot D \cdot t = \frac{\pi \cdot D^2}{2} - \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot \sqrt{D^2 - d^2} = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

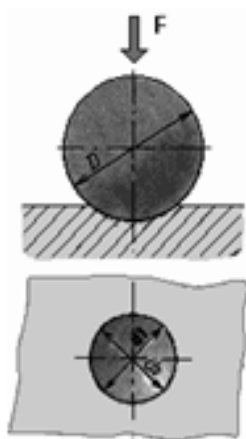
Kde značí:

D – průměr kuličky (mm)

F – zatížení kuličky (N – 0,102)

d – průměr vtisku (mm) – aritmetický střed dvou na sebe kolmých průměrů

HB – tvrdost podle Brinella



Obr.1 Princip zkoušky

tvrdosti podle Brinella

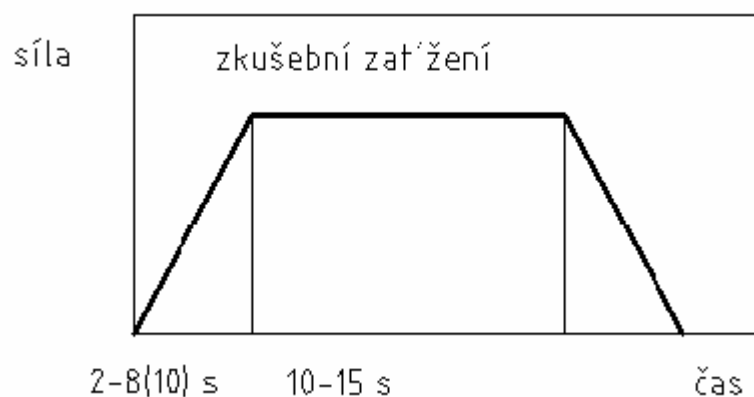
Číslo tvrdosti podle Brinella se uvádí bez rozměru. Tvrdost podle Brinella závisí do značné míry na podmínkách, za kterých byla zkouška provedena. Na výsledek má vliv zejména velikost zatížení pro daný průměr kuličky, doba zatížení a velikost vtisku se zřetelem na rozměry zkoušeného předmětu. Jako zkušební těleso se používá kulička nejčastěji o průměru $D = 2,5, 5$ a 10 mm. Kulička je kalen, má tvrdost podle Vickerse nejméně 850 jednotek. Zatížení se volí jako násobek čtverce průměru kuličky D . Tabulka na obr.... Udává volbu podmínek pro zkoušku podle Brinella. Doba, po kterou se maximální zatížení udržuje, je stanovena normou – pro ocel o tvrdosti do 140 HB – 30 sekund, pro ocel vyšší tvrdosti – 10 sekund, pro neželezné kovy – 60 sekund a neželezné kovy měkké – 180 sekund.

Průměr vtisku se měří vhodným měřicím přístrojem (mikroskopem) ve dvou navzájem kolmých směrech. Velikost vtisku může být v mezích $d = (0,2 \text{ až } 0,6)$. Zkušební vzorek musí mít povrch dostatečně rovný a hladký, velikost a doba zatížení (např. HB/5/7357/10). Mezi tvrdostí HB a pevností v tahu σ_{Pt} je pro některé materiály (zejména oceli) přímá závislost, daná vztahem: [4,5,6]

$$\sigma_{Pt} = (3,1 \div 4,1) \cdot HB \quad \text{pro ocel} \quad (2)$$

2.2.1.1 Provedení zkoušky

- Obvykle se zkouška provádí při teplotě $10 - 35^{\circ}\text{C}$, v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Při zkoušce musí být použito zkušební zatížení odpovídající zkoušenému materiálu a velikosti kuličky
- Zkoušení zatížení musí být vybráno tak, aby průměr vtisku d byl v rozmezí hodnot od $0,24 D$ do $0,6 D$
- Vzorek musí být při zkoušce položen na tuhé podložce. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělísek. Je důležité, aby vzorek ležel na podložce tak, aby se při zkoušce nepohnul
- Vnikací tělísko se zatlačuje do povrchu zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez rázů a chvění. Doba od začátku zatěžování do dosažení zkušební síly nesmí být menší než 2 s a delší než 8 s .
- Doba působení zkušební síly je v rozmezí $10 \text{ až } 15 \text{ s}$. Pro některé materiály mohou být použity delší časy, ty však musí být dodržovány s tolerancí $\pm 2 \text{ s}$.



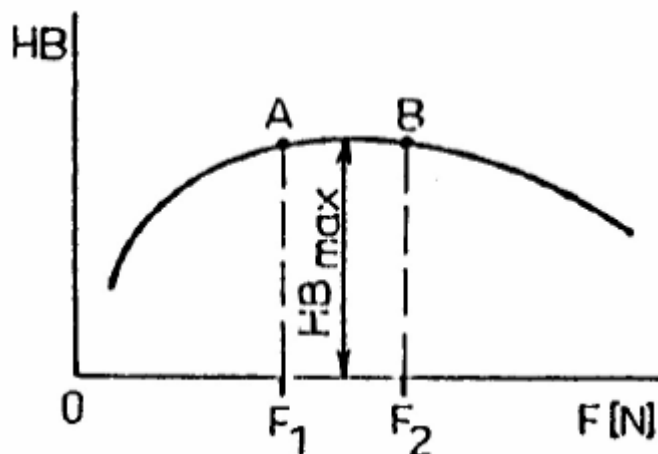
Obr. 2 Průběh zkušebního zatížení – metoda Brinell

Tab. 3. Související normy [8]

	Název	Norma
ČSN EN	Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část I: Zkušební metoda	ČSN EN ISO 6506-1
	Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část II: Ověřování a kalibrace zkušebních zařízení	ČSN EN ISO 6506-2
	Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část III: Kalibrace referenčních destiček	ČSN EN ISO 6506-3
	Metallic materials – Brinell hardness test – Part I: Test method	ISO 6506-1
ISO	Metallic materials – Brinell hardness test – Part II: Verification and calibration of testing machines	ISO 6506-2
	Metallic materials – Brinell hardness test – Part III: Calibration of reference blocks	ISO 6506-3

2.2.1.2 Princip zkoušky

Podstata metody spočívá v zatlačení kalené ocelové kuličky (metoda HBS) nebo kuličky z tvrdokovu (metody HBW) o průměru D do povrchu zkoušeného materiálu zatěžující silou F . Po odlehčení se určí průměr vtisku d .



Obr. 3 Závislost tvrdost HB na velikosti zátěžné síly

- Vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být minimálně 3 násobek vtisku (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a minimálně 3 násobek průměru vtisky při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin
- Vzdálenost středů dvou sousedících vtisků musí být nejméně 4 násobek průměru vtisku (platí pro ocel, slitinu, měď a její slitiny) a minimálně 6 násobek průměru vtisku při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin
- Po zkoušce se změří průměr každého vtisku dvou na sebe kolmých směrech. Pro stanovení tvrdosti se průměrná hodnota velikosti vtisku

Měření průměru je pomocí měřicího mikroskopu, tzv. Brinellovy lupy, možné až na setiny mm, kdežto přesné změření hloubky je mnohem obtížnější. Při sériových zkouškách je měření mikroskopem zdlouhavé, proto jsou tvrdoměry konstruovány tak, že lze tuto hloubku odečíst přímo na přístroji. S ohledem na možnost vytvoření valu v okolí vtisku je tento postup vhodný pouze při poměrném stanovování tvrdosti. Pro přesné určení hodnoty tvrdosti je třeba vycházet z průměru vtisku. Zkušební podmínky je nutno dodržovat z důvodu srovnatelnosti naměřených výsledků. Na výsledek má vliv zejména velikost zatížení, které se volí s ohledem na průměr použité kuličky a měřený materiál.

2.2.1.3 Vnikací tělesa a zkušební síly

Pro zkoušky tvrdosti podle Brinella se používají ocelové nebo tvrdokovové kuličky průměru (v mm), zkušební síly uvedené v následující tabulce. Pro úplnost jsou uvedeny též síly v původních, dnes neplatných jednotkách kp: [7,8,9]

S ohledem na materiál kuličky, na její poloměr a zátěžovou sílu je Brinellova zkouška vhodná pouze pro měkké a heterogenní materiály např. neželezné kovy, šedé litiny apod.

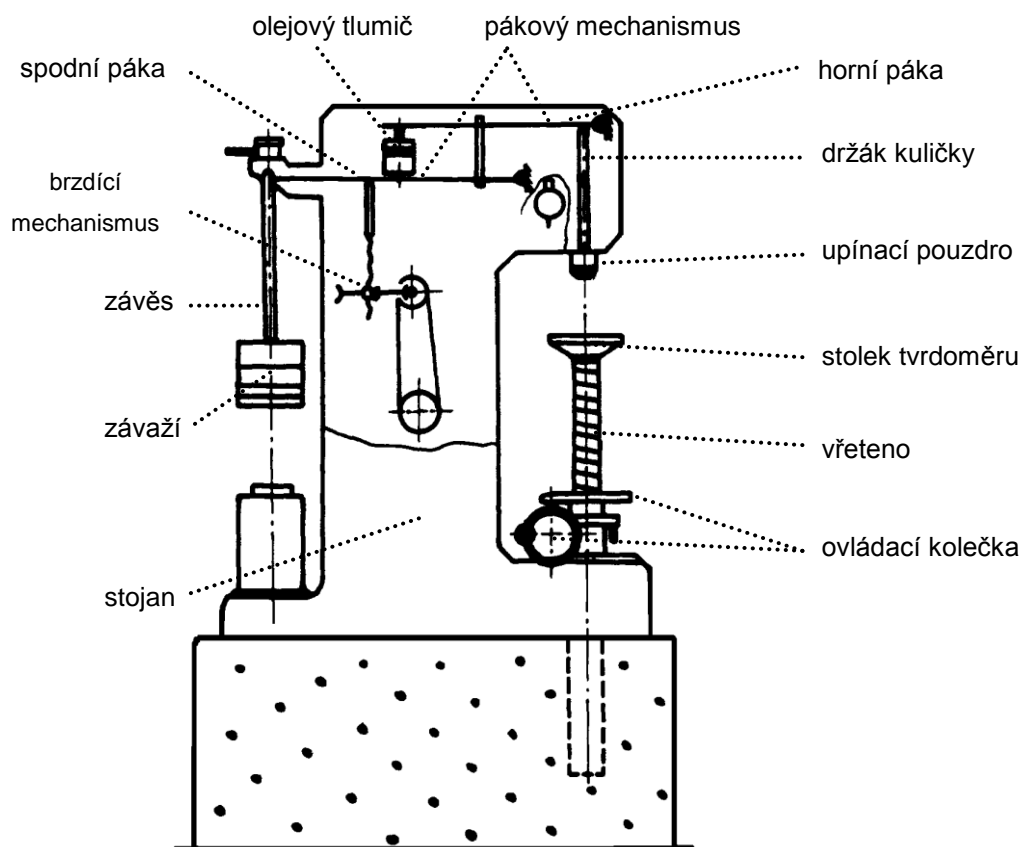
Tab. 4. Vztah průměru kuličky a zatěžující síly u metody Brinell

Průměr kuličky	(mm)	10	5	2,5	2	1
Zkušební síla		Poměr $0,102F/D^2$				
(N)	(kp)					
29 400	3000	30				
14 710	1500	15				
9807	1000	10				
7355	750		30			
4903	500	5				
2452	250	2,5	10			
1839	187,5			30		
1226	125	1,25	5			
1177	120				30	
980,7	100	1				
612,9	62,5		2,5	10		
392,3	40				10	
294,2	30					30
306,5	31,25		1,25	5		
245,2	25		1			

196,1	20				5	
153,2	15,625			2,5		
98,07	10				2,5	10
76,61	7,8125			1,25		
61,29	6,25			1		
49,03	5				1,25	5
39,23	4				1	
24,25	2,5					2,5
12,26	1,25					1,25
9,807	1					1

Měřicí zařízení

„Tvrdoměr má masivní stojan ve tvaru písmene C. Zatěžovací sílu vyvozuje pákový mechanismus. Horní páka s olejovým tlumičem je spojena prostřednictvím břitu a tlačeného čepu s držákem kuličky (indentoru). Na zadním břitu spodní páky je uložen závěs se závažími. Závaží jsou označena písmeny a na tabulce, umístěné na stojanu tvrdoměru, je uvedeno, jaké závaží má být pro dané zatížení použito. Rychlost spouštění zatěžovací páky odpovídající podmínkám zkoušky je zajišťována brzdícím mechanismem, který je poháněn elektromotorem. K umístění zkoušeného vzorku slouží stolek, který je fixován na vřetenu vedeném ve stojanu vřetene. Vřeteno je výškově nastavitelné pomocí koleček. Rovinné vzorky musí být uloženy na doraz k upínacímu pouzdru“. [10]



Obr. 4 Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Brinella

2.2.1.4 Zkoušené těleso

- Povrch vzorku musí být hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména úplně bez mazadel
- Povrch nesmí být ovlivněn tvářením nebo ohřevem
- Tloušťka vzorku musí být nejméně osminásobek hloubky vtisku **h**, aby na protilehlé straně nebyly patrné stopy od vnikacího tělesa

2.2.1.5 Postup zkoušky

- Zkouška se obvykle provádí při teplotě 10 – 35°C, v arbitrážních případech při teplotě 23 ± 5 °C.
- Zatížení musí být vybráno z tab. 4 tak, aby průměr vtisku d byl v rozmezí 0,24 až 0,60 průměru vnikací kuličky D . Poměr $\frac{0,102 \cdot F}{D^2}$ musí být volen s ohledem na zkoušený materiál a jeho tvrdost.
- Zkoušené těleso je uloženo na tuhé podložce a při zkoušce se nesmí pohnout.
- Vnikací těleso se zatlačuje do zkoušeného tělesa zatěžující silou F směřující kolmo k jeho povrchu. Doba od počátku zatěžování do jeho plné hodnoty musí být v rozmezí 2 ÷ 8 s. Doba působení plného zkušebního zatížení j v rozmezí 10 ÷ 15 s.
- Při zkoušce nesmí být stroj vystaven rázům a chvění, které by mohli ovlivnit výsledky zkoušky
- Pro stanovení tvrdosti podle Brinella se použije aritmetický průměr d , který je vypočten ze dvou průměrů vtisku d_1 a d_2 , které jsou na sebe kolmé.
- Hodnotu tvrdosti podle Brinella určíme z tabulek v normě podle použitého indentoru, velikosti zatížení F a průměru d vtisku.

Tab. 5. Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti podle Brinella

Symbol tvrdosti	Průměr kuličky D (mm)	$\frac{0,102 \cdot F}{D^2}$	Zkušební zatížení F (N)
HBS (HBW) 10/3000	10	30	$29,24 \cdot 10^3$
HBS (HBW) 10/1500	10	15	$14,71 \cdot 10^3$
HBS (HBW) 10/1000	10	10	$9,807 \cdot 10^3$
HBS (HBW) 10/500	10	5	$4,903 \cdot 10^3$
HBS (HBW) 10/250	10	2,5	$2,452 \cdot 10^3$
HBS (HBW) 10/125	10	1,25	$1,226 \cdot 10^3$
HBS (HBW) 10/100	10	1	980,7

HBS (HBW) 5/750	5	30	$7,355 \cdot 10^3$
HBS (HBW) 5/250	5	10	$2,452 \cdot 10^3$
HBS (HBW) 5/125	5	5	$1,226 \cdot 10^3$
HBS (HBW) 5/62,5	5	2,5	612,9
HBS (HBW) 5/31,25	5	1,25	306,5
HBS (HBW) 5/25	5	1	245,2
HBS (HBW) 2,5/187,5	2,5	30	$1,839 \cdot 10^3$
HBS (HBW) 2,5/62,5	2,5	10	612,9
HBS (HBW) 2,5/31,25	2,5	5	306,5
HBS (HBW) 2,5/15,625	2,5	2,5	153,2
HBS (HBW) 2,5/7,8125	2,5	1,25	76,61
HBS (HBW) 2,5/6,25	2,5	1	61,29
HBS (HBW) 2/120	2	30	$1,177 \cdot 10^3$
HBS (HBW) 2/40	2	10	392,3
HBS (HBW) 2/20	2	5	196,1
HBS (HBW) 2/10	2	2,5	98,07
HBS (HBW) 2/5	2	1,25	49,03
HBS (HBW) 2/4	2	1	39,23
HBS (HBW) 1/30	1	30	294,2
HBS (HBW) 1/10	1	10	98,07
HBS (HBW) 1/5	1	5	49,03
HBS (HBW) 1/2,5	1	2,5	24,52
HBS (HBW) 1/1,25	1	1,25	12,26
HBS (HBW) 1/1	1	1	9,807

Tab. 6. Umístění vtisků při zkoušce tvrdosti podle Brinella

Materiál	Vzdálenost středu vtisku k okraji zkoušeného tělesa	Vzdálenost středů dvou sousedních vtisků
s tvrdostí $\geq 150\text{HB}$	nejméně $2,5 \cdot d$	Nejméně $4 \cdot d$
s tvrdostí $\leq 150\text{HB}$	nejméně $3 \cdot d$	Nejméně $5 \cdot d$

2.2.1.6 Zkušební protokol

Po provedení zkoušky je, pokud je to požadováno, zpracován zkušební protokol, který musí obsahovat následující informace:

- Odkaz na normu ČSN EN ISO 6506
- Všechny podrobnosti o použitém vnikacím tělese
- Výsledek zkoušky – naměřená hodnota tvrdosti
- Dodatečné požadavky, které nejsou uvedeny v normě
- Okolnosti, které případně mohly ovlivnit výsledky zkoušky
- Zkušební teplotu, pokud není v rozmezí $23 \pm 5^\circ\text{C}$

2.2.1.7 Označení zkoušky

Hodnota tvrdosti	symbol zkoušky	rozměr vnik.tělesa	doba působení zkušeb. zatížení
 — XXX	 — HBX	 — XX/XXX	 — XX
označení tvrdosti (H)	 druh vnikacího tělesa	 — velikost zkušeb. Zatížení	

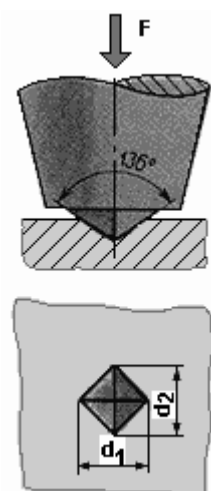
2.2.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Tato zkouška byla poprvé popsána v Anglii v roce 1922 R.L. Smithem a G.E. Sandlandem. Metoda je nazvána podle prvního tvrdoměru daného typu, který byl zkonstruován ve firmě Vickers. Metoda je používána hlavně v laboratořích, protože e velmi přesná a citlivá.

Tab. 7. Související normy (metrotest)

	Název	Norma
ČSN EN	Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část I. – Zkušební metoda	ČSN EN ISO 6507 - 1
	Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část II. – Ověřování tvrdoměrů destiček	ČSN EN ISO 6507 - 2
	Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část III. – Kalibrace tvrdoměrných destiček	ČSN EN ISO 6507 - 3
	Tvrdokovy. Zkouška tvrdosti podle Vickerse	ČSN EN 23878
ISO	Metallic materials – Vickers hardness test – Part I: Test method	ISO 6507 - 1
	Metallic materials – Vickers hardness test – Part II: Verification of testing machines	ISO 6507 - 2
	Metallic materials – Vickers hardness test – Part III: Calibration of reference blocks	ISO 6507 - 3

Vickersova zkouška tvrdosti je uvedena v normě. Při této zkoušce se silou F zatlačuje do zkoušeného materiálu čtyřboký diamantový jehlan se čtvercovou základnou o vrcholovém úhlu 136° . Při tomto tvaru zůstává vtisk i při změně zátěžné síly v širokém rozsahu geometricky podobný, takže zatížení lze zvolit prakticky libovolně. [5,6,7]



Obr. 5 Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse

Tvrдость podle Vickerse HV je určena poměrem síly F (N, 0,102) a povrchu vtisku O (mm^2) a rovná se:

$$HW = \frac{1,8544 F}{d^2} \quad (3)$$

kde d je velikost úhlopříčky vtisku (mm). Velikost úhlopříčky vtisku (d) stanovíme z měření ve dvou kolmých směrech. Obvyklá zatížení jsou od 9,81 N d 981 N běžně bývá 294 N. Při označování tvrdosti HV uvádíme použité zatížení. [2,3,4]

2.2.2.1. Vztah pro výpočet tvrdosti podle Vickerse

HV...tvrđost podle Vickerse

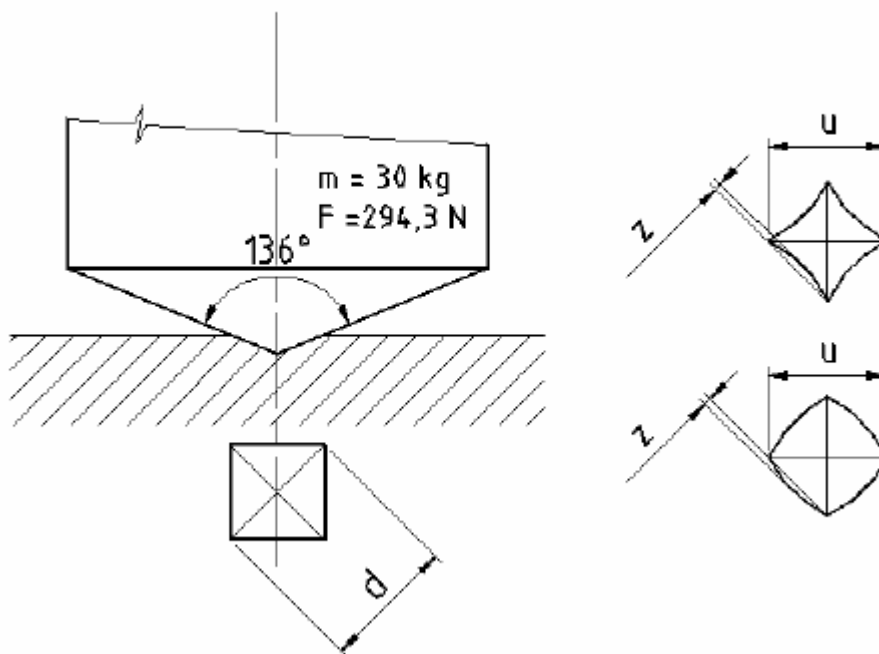
F ...zkušební zatížení v (N)

α ...vrcholový úhel vnikacího tělesa (jehlanu), $\alpha = 136^\circ$

d ...úhlopříčka vtisku v (mm)

2.2.2.2. Provedení zkoušky

- Zkouška se provádí obvykle při teplotě 10 až 35° v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ$
- Při zkoušce musí být použito některé zatížení podle tabulky 4.1
- Vzorek musí být při zkoušce položen na tuhé podložce. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělísek. Je důležité, aby vzorek ležel na podložce tak, ab se při zkoušce nepohnul
- Vnikací těleso se zatlačuje do povrchu vzorku zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez rázu a chvění. Doba od začátku zatěžování do dosažení zkušební síly nesmí být menší než 2 s a delší než 8 s. Při zkouškách tvrdosti při nízkém zatížení nesmí překročit 10 s.
- Doba působení zkušební síly je v rozmezí 10 až 15 s. Pro některé případy materiálů byly použity delší časy, ty však musí být dodržovány s tolerancí ± 2 s.



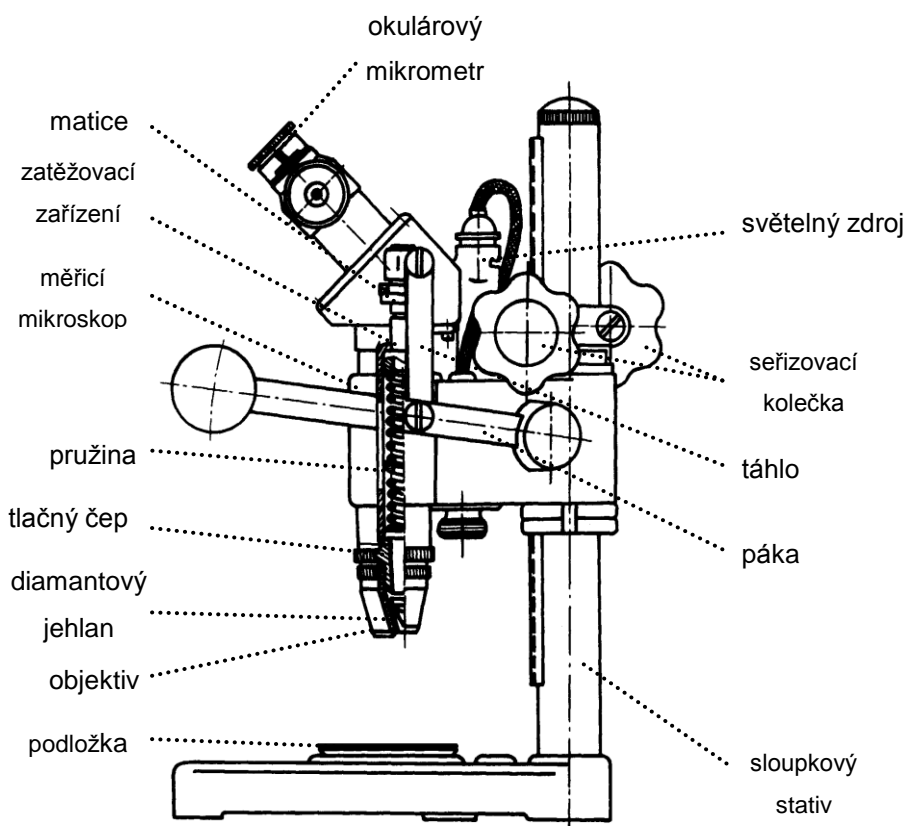
Obr. 6 Průběh zkušebního zatížení-metoda Vickers

- Vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek velikosti úhlopříčky (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a minimálně 3 násobek velikosti úhlopříčky při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin
- Vzdálenost středu dvou sousedních vtisků musí být nejméně 3 násobek velikosti úhlopříčky (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a 6 násobek velikosti úhlopříčky při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin
- Po zkoušce se úhlopříčky nesmí lišit o více než o 5% střední hodnoty

Tab. 8 Druhy měření tvrdosti podle Vickerse

Označení	Symbol tvrdosti	Zkušební zatížení F (N)	Zkušební metoda
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	HV 5 ÷ HV 100	9,03 ÷ 980,7	ČSN EN ISO 6507/1
Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení	HV 0,2 ÷ < HV 5	1,961 ÷ < 49,07	ČSN EN ISO 6507/2
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	< HV 0,2	<1,961	ČSN EN ISO 6507/3

2.2.2.3. Zkušební zařízení



Obr. 7 Schéma přístroje na měření tvrdost podle Vickerse

Na sloupkovém stativu přístroje je nasunuto rameno, které nese zatěžovací zařízení, měřicí mikroskop a světelný zdroj. K výškovému nastavení ramene slouží kolečko. Nastavená poloha se zajišťuje druhým kolečkem. Zatěžování se provádí pákou, táhlem a tlačným šroubem, který tlačí na pružinu. Pružina působí na tlačný čep držáku diamantového jehlanu. Stlačením pružiny až k dorazu na matici je vyvozena předepsaná zatěžovací síla. Měřicí mikroskop je posuvný ve vodítku kolečkem po levé straně přístroje. Mikroskop a zatěžovací zařízení jsou vzájemně pevně spojeny a otočně umístěny na objímce stativu. Při vlastním měření tvrdosti je při natočení hlavy do jedné krajní polohy proveden vtisk. Mikrometrickým osovým křížem v okuláru mikroskopu je možno změřit velikost úhlopříček. Zkoušený předmět se pokládá na podložku nebo se přístroj postaví přímo na zkoušený předmět a měření probíhá otvorem v podstavci s vyjmutou podložkou. [6,7,8]

2.2.2.4. *Zkoušené těleso*

- Tloušťka zkušebního tělesa musí být u slitin železa nejméně 1,2d, v jiných případech 1,5d
- Povrch zkušebního tělesa musí být upraven tak, aby dovilil přesné měření rozměrů vtisku
- Povrch vzorku musí být hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména úplně bez mazadel

2.2.2.5. *Postup zkoušky*

- Zkouška se provádí při teplotě 10 až 35°C a v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$
- Při zkoušce musí být použito některé z předepsaných zkušebních zatížení F
- Vzorek musí být při zkoušce položen na tuhé podložce. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělísek. Je důležité, aby vzorek ležel na podložce tak, aby se při zkoušce nepohnul
- Vnikací těleso se zatlačuje do povrchu vzorku zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez rázu a chvění. Doba od počátku zatěžování do dosažení zkušební síly nesmí být menší než 2 s a delší než 8 s. Při zkouškách tvrdosti při nízkém zatížení nesmí překročit 10 s.
- Doba působení zkušební síly je v rozmezí 10 až 15 s. Pro některé případy materiály byly použity delší časy, ty však musí být dodržovány s tolerancí ± 2 s.
- Vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek velikosti úhlopříčky (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a minimálně 3 násobek velikosti úhlopříčky při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin
- Vzdálenost středů dvou sousedních vtisků musí být nejméně 3 násobek velikosti úhlopříčky (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a 6 násobek velikosti úhlopříčky při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin
- Po zkoušce se úhlopříčky nesmí lišit o více než o 5% střední hodnoty [3,4,5]

Tab. 9. Zkušební zatížení při zkoušce tvrdosti metodou Vickers (metrotest)

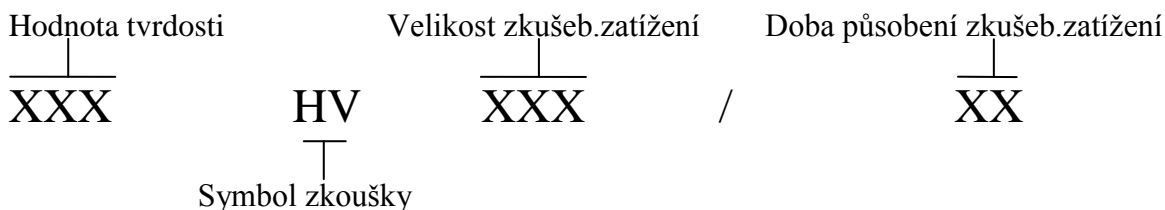
Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při ma- lém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
symbol	Nominální hodnota F (N)	symbol	Nominální hodnota F (N)	symbol	Nominální hodnota zatížení F (N)
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV0,2	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	16,61	HV0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV0,1	0,9807

2.2.2.6. Zkušební protokol

Po provedení zkoušky je, pokud je to požadováno, zpracován zkušební protokol, který musí obsahovat následující informace:

- Odkaz na normu ČSN ISO 6507
- Všechny podrobnosti o použitém vnikacím tělese
- Výsledek zkoušky – naměřená hodnota tvrdosti
- Všechny postupy, které nejsou uvedeny v normě
- Okolnosti, které případně mohly ovlivnit výsledky zkoušky
- Zkušební teplotu, pokud není v rozmezí $23 \pm 5^\circ\text{C}$

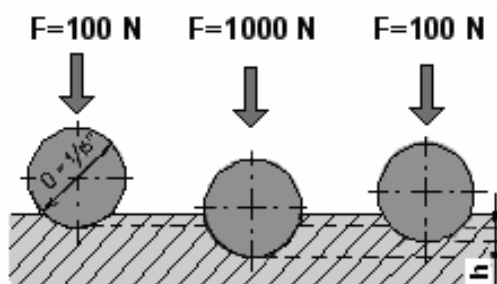
2.2.2.7. Označení zkoušky



2.2.3. Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Autorem této metody je S. P. Rockwel a poprvé byla použita v roce 1922. Na rozdíl od metod Brinella a Vickerse se tvrdost Rockwella vyjadřuje hloubkou trvalého vtisku. Tato metoda je velmi rychlá a praktická, jelikož tvrdost vzorku odečteme přímo na tvrdoměru a tudíž není potřeba měřit velikost vtisku, provádět výpočty nebo vyhledávat hodnoty tvrdosti v tabulkách jako u metod Brinella a Vickerse. Proto je tato metoda nejčastěji používána v provozu.

Rockwellova zkouška tvrdosti se provádí podle normy. Do zkoušeného povrchu se zatlačuje vtiskací těleso, kterým je buď diamantový kužel se zaobleným hrotem o vrcholovém úhlu 120° (tvrdost je označována HRC) nebo ocelová kalená kulička o průměru $1/16 - 1,5875$ (tvrdost se označuje HRB). Měří se hloubka vtisku, jednotkou tvrdosti je hloubka vtisku $0,002$ mm. [9]



Obr. 8 Princip zkoušky tvrdosti podle Rockwella

2.2.3.1. *Postup při zkoušce*

Kužel nebo kulička se předběžným zatížením $F_1 = 98,1$ N pomalu vtlačí do povrchu zkoušeného předmětu. Pak se nastaví stupnice hloubkoměru do počáteční polohy. Zatížení se zvolna zvětšuje na hodnotu předepsanou normou $F = (F_1 + F_2)$ u diamantového kužele na 1471,5 N ($F_2 = 1373$ N) a u kuličky na 981 N ($F_2 = 883$ N). Po odlehčení zpět na základní zatížení 98,1 N (F_1) odečteme na hloubkoměru hloubku vtisku přímo ve stupních HRC nebo HRB.

Pro stanovení tvrdosti tenkých povrchových vrstev nebo křehkých materiálů se používá zatížení pouze 490,5 N, tj. celkové zatížení 588, N. Tvrdost se pak označuje HRA. Metody Rockwellovy lze použít pro velmi širokou oblast tvrdosti i tam, kde metoda Brinellova není již použitelná. [6,7,8]

2.2.3.2. *Zkouška mikrotvrdosti*

K určování mikrotvrdosti se užívá speciálních přístrojů, mikrotvrdoměrů. Podle provedení mohou být tyto přístroje rozděleny do dvou skupin:

- a. mikrotvrdoměry, u nichž je diamant vsazen přímo v objektivu mikroskopu. Přístroje tohoto druhu jsou většinou provedeny jako doplněk metalografických mikroskopů.
- b. mikrotvrdoměry s diamantem v samostatném nástavci mimo optiku.

Velký počet mikrotvrdoměrů je sestaven pro používání v kombinaci s normálním mikroskopem (např. mikrotvrdoměr Hannemannův).

Nejčastěji používanou metodou je metoda, pracující s Vickersovým jehlanem. Mikrotvrdost je určována podobně, jako byla již popsána při zkoušce tvrdosti podle Vickerse. Použitím zatížení v rozsahu ($1,96 \cdot 10^{-3}$ až $1,96 \cdot 10^{-1}$ N) je možno stanovit tvrdost jednotlivých strukturních součástí kovu.

Mikrotvrдость se stanovuje ze známého vzorce:

$$HM = \frac{1854 \cdot F}{d^2} \quad (4)$$

kde: F – zatížení (N.102), d – úhlopříčka (μm)

Tab. 10. Související normy (metrotest)

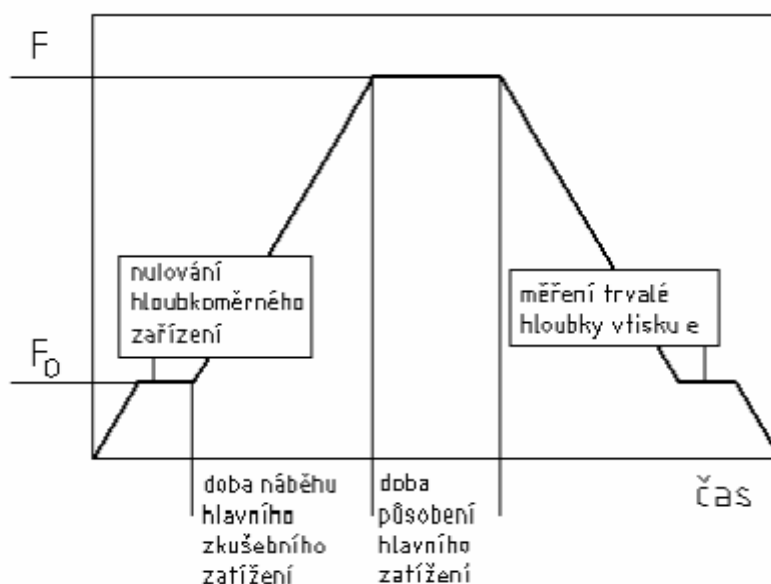
	Název	Norma
ČSN EN	Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 1: Zkušební metoda (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, N, K, T)	ČSN EN ISO 6508-1
	Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 2: Ověřování a kalibrace zkušebních zařízení (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, N, K, T)	ČSN EN ISO 6508-2
	Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 3: Kalibrace referenčních destiček (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, N, K, T)	ČSN EN ISO 6508-3
ISO	Metallic materials – Rockwella hardness test – Part 1: Test Method (scale A, B, C, D, E, F, G, H, N, K, T)	ISO 6508-1
	Metallic materials – Rockwella hardness test – Part 2: Verification and calibration of testing machines (scale A, B, C, D, E, F, G, H, N, K, T)	ISO 6508-2
	Metallic materials – Rockwella hardness test – Part 3: Calibration of reference blocks (scale A, B, C, D, E, F, G, H, N, K, T)	ISO 6508-3

2.2.3.3. Princip zkoušky

Podstata zkoušky spočívá ve vlačování vnikacího tělesa s diamantovým kuželem (stupnice A, C, N) o vrcholovém úhlu $120 \pm 0,5^\circ$ se zaobleným poloměrem 0,2 mm nebo kalené ocelové kuličky (stupnice T) průměru 1,5875 mm (1/16“) předběžným a přídavným zatížením. Při měření se vzorek uloží kolmo k vnikacímu tělesu a postupně, bez rázů se zatíží předběžným zatížením F_0 (vyrovná nerovnosti povrchu). Potom zvolna sílu zvětšujeme o přídavné zatížení F_1 až dosáhneme celkového zatížení F předepsané normou. Pak přídavné zatížení F_1 opět odlehčujeme na předběžné zatížení F_0 a zjistíme hloubku vtisku e . Většina

tvrdoměrů pro tuto zkoušku je upravena tak, že hloubku vtisku odečteme přímo na číselníkovém úchylkoměru, kde ukazatel na číselníku ukazuje přímo hodnotu tvrdosti vzorku.

- Vzorek musí být při zkoušce položen na tuhé podložce. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělísek. Je důležité, aby vzorek ležel na podložce tak, aby se při zkoušce nepohnul.
- Vnikací těleso se zatlačuje do povrchu vzorku zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez rázů a chvění až na hodnotu předzatížení. Po dosažení předzatížení se nuluje měřící zařízení hloubky vtisku.
- Doba náběhu hlavního zatížení je v rozmezí 2 až 8 s u metod HRA až K a 2 až 8 s u metod HRxx N a T. [10]
- Doba působení hlavního zatížení je:
 - o 1 až 3 s u materiálů, které nevykazují závislost plastické deformace na čase
 - o 1 až 5 s u materiálů, které vykazují omezenou závislost plastické deformace na čase
 - o 10 až 15 s u materiálů, které vykazují silnou závislost na plastické deformaci na



Obr. 9 Průběh zkušebního zatížení – metoda Rockwell

- Vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být alespoň 4 násobek průměru vtisku (ale nejméně 2 mm). Vzdálenost středu vtisku od kraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku (platí pro metody HRA – K).
- Vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku (platí pro metody HRxxN a T)

2.2.3.4. Vnikací tělesa a zatěžující síly

Tab. 11. Vnikací tělesa a zkušební síly pro různé metody Rockwell

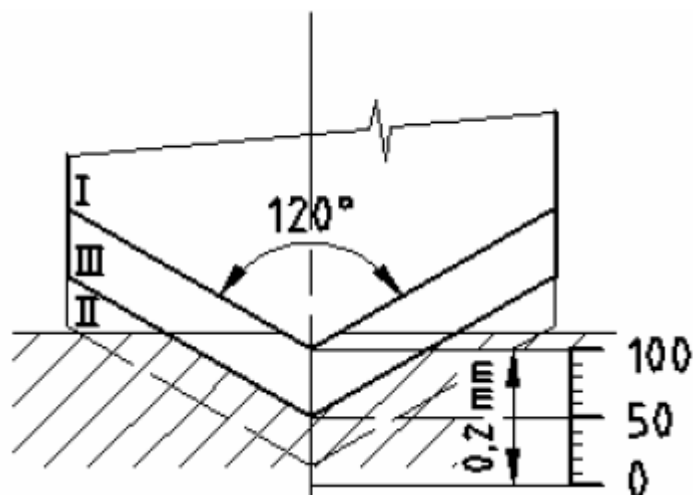
Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Vnikací těleso	F ₀ [N]	F ₁ [N]	F [N]	Rozsah měření
A	HRA	diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 - 88
B	HRB	ocelová kulička (1,5875)	98,07	882,6	980,7	20 - 100
C	HRC	diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 – 70
D	HRD	diamantový kužel	98,07	882,6	980,7	40 - 77
E	HRE	ocelová kulička (3,175)	98,07	882,6	980,7	70 - 100
F	HRF	ocelová kulička (1,5875)	98,07	490,3	588,4	60 - 100
G	HRG	ocelová kulička (1,5875)	98,07	1373	1471	30 - 94
H	HRH	ocelová kulička (3,175)	98,07	490,3	588,4	80 - 100
K	HRK	ocelová kulička (3,175)	98,07	1373	1471	40 - 100
15 N	HR 15 N	diamantový kužel	29,42	117,7	147,1	70 - 94
30 N	HR 30 N	diamantový kužel	29,42	264,8	294,2	42 - 86
45 N	HR 45 N	diamantový kužel	29,42	441,3	441,3	20 - 77
15 T	HR 15 T	ocelová kulička (1,5875)	29,42	117,7	147,1	67 – 93
30 T	HR 30 T	ocelová kulička (1,5875)	29,42	264,8	294,2	29 – 82
45 T	HR 45 T	ocelová kulička (1,5875)	29,42	411,9	441,3	1 - 72

2.2.3.5. *Zkoušené těleso*

- Vzorek by měl mít rovný a leštěný povrch, bez ukujené vrstvy. Povrch musí být také zbaven cizích těles a zejména mazadel (pokud není v normách na výrobky uvedeno jinak).
- Při úpravě povrchu vzorku nesmí dojít ke změně vlastností materiálu vyvolaných ohřevem a tvářením za studena.
- Tloušťka vzorku musí být nejméně desetkrát než hloubka vtisku h pro kuželové vnikací těleso a pětkrát větší pro vnikací těleso s kuličkou. Na protilehlé straně vzorku nesmí být patrné stopy po zkoušce. [8]

2.2.3.6. *Postup zkoušky*

- Zkouška se provádí při okolní teplotě v rozmezí 10°C až 35°C a v arbitrážních případech se zkouška provádí při teplotě $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Při zkoušce bývá použito některé z předepsaných zatížení F , která jsou uvedena v tab. 11.
- Vzorek musí být umístěn tak, aby zkoušený povrch byl kolmo k ose vnikacího tělesa a ke směru zatěžující síly.
- Nejprve je vzorek zatížen předběžnou silou F_0 .
- Poté se vrátí do počáteční polohy a během 2 s až 8 s se zvýší zatížení z F_0 o přídavné zatížení F_1 na celkové zatížení F .
- Po uvolnění přídavného zatížení F_1 zůstává působit předběžné zatížení F_0 . Celkové zatížení F musí trvat $4 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$.
- Po dobu průběhu zkoušky nesmí být stroj vystaven nárazům a chvění, které by mohli ovlivnit výsledky měření.
- Vzdálenost mezi okrajem vzorku a středem vtisku musí být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku, ale nejméně 1 mm.
- Středů jednotlivých vtisků by měli být od sebe vzdáleny o 4 násobek průměru vtisku, nejméně však o 2 mm.
- Hodnota tvrdosti je dána hloubkou vtisku, a její hodnotu můžeme vyčíst přímo na číselníkovém úchylkoměru, kde ukazatel na číselníku ukazuje tvrdost podle Rockwella.



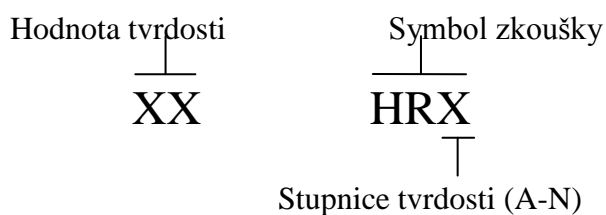
Obr. 10 Průběh zkušebního zatížení -metoda Rockwell

2.2.3.7. Zkušební protokol

Po provedení zkoušky je, pokud je to požadováno, zpracován zkušební protokol, který musí obsahovat následující informace:

- odkaz na normu **ČSN ISO 6508**
- všechny podrobnosti o použitém vnikacím tělese
- výsledek zkoušky – naměřená hodnota tvrdosti
- všechny postupy, které nejsou uvedeny v normě
- okolnosti, které případně mohly ovlivnit výsledky zkoušky
- zkušební teplotu, pokud není v rozmezí $23 \pm 5^\circ\text{C}$.

2.2.3.8. Označení zkoušky



3 ZKOUŠKY DYNAMICKÉ

U dynamických zkoušek tvrdosti je zatěžující síla vyvozena dynamicky, rázem. Vnikací těleso je do zkoušeného vzorku vtlačeno vzrůstající silou nebo je na něj vrženo, či na něm volně spočívá a je jiným tělesem rázem do něj vtisknuto. Podle principu mohou být zkoušky tvrdosti plastické, kdy je podle velikosti trvalého vtisku určena tvrdost nebo zkoušky elastické, u nichž se stanovuje tvrdost z pružných vlastností materiálu. [8]

3.3 Plastické zkoušky

- Metoda volným pádem
- Metoda stlačenou pružinou
- Metoda porovnávací

3.3.1 Metoda volným pádem

Do povrchu vzorku je vtlačována kulička silou, která je vyvozena pádem beranu z určité výšky. Tvrdost se vypočítá jako měrná deformační práce (podíl celkové spotřebované práce objemu vtisku).

3.3.2 Metoda stlačenou pružinou

Podstatou této zkoušky je, že se pomocí energie napnuté pružiny vtlačí do vzorku kulička, která zanechá vtisk. Velikost tohoto vtisku je úměrná tvrdostí, jelikož energie vtlačované kuličky do povrchu materiálu je konstantní. Na tomto principu funguje Baumanovo kladívko.

3.3.2.1 *Baumanovo kladívko*

Může pracovat s průměrem kuličky 5 mm nebo 10 mm. Pomocí pružiny je vyvozený dynamický ráz, který vtlačuje kuličku do zkoušeného materiálu. Kulička je umístěna v nástavci, který je veden krytem. Po vodícím kusu je veden úderník a také osazený nástavec s kuličkou. Vnější plášť je spojen s úderníkem, který prochází celým strojem a prostřední částí je opatřen nákrůžkem. Západka v pevném pouzdře zajišťuje polohu kladiva za klidu. Pružina dole dosedá na osazení kladiva a nahoře se opírá o víko posuvného pláště.

Nejdříve se položí kulička na zkoušený povrch. Osa přístroje musí být kolmo ke zkoušenému povrchu. Poté se stlačí posuvný plášť. Pokud je stlačen natolik, že se západky vychýlí pomocí vybrání v plášti, tak je kladivo pružinou vymrštěno a úderník přenesení ráz na ná-

stavec s kuličkou. Vzniklý vtisk se změří pomocí lupy s měřítkem a z tabulek se stanoví tvrdost zkoušeného vzorku.

3.3.3 Metoda porovnávací

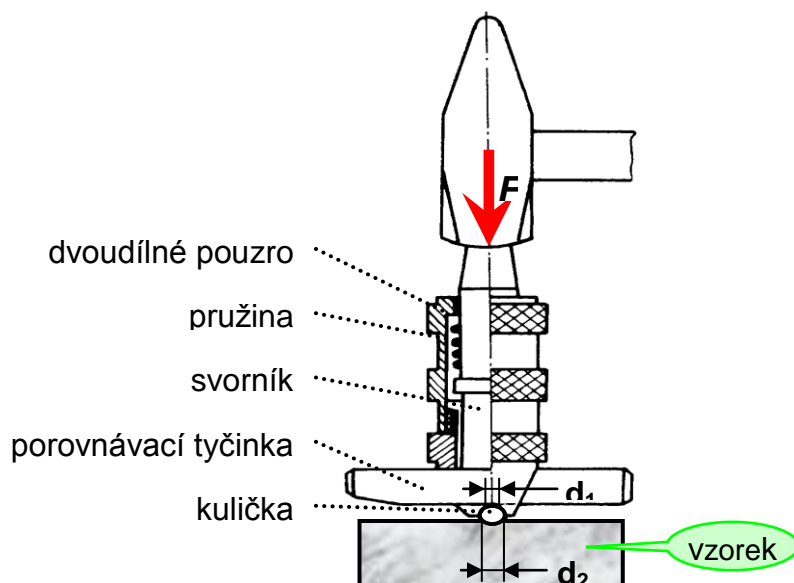
Tato metoda spočívá v tom, že úderem kladiva vytvoříme vtisk na zkoušeném vzorku a zároveň taky na porovnávací tyči o známé tvrdosti HB. Poté změříme velikost obou vtisků a z tabulek určíme hodnotu tvrdosti zkoušeného vzorku. Na této metodě je také založen tvrdoměr nazvaný kladívko Poldi. [skripta]

3.3.3.1 *Kladívko Poldi*

Je to ruční přenosný tvrdoměr, používaný převážně na měření tvrdosti ocelí metodou Brinell. Pracuje na principu porovnávání vtisku vzniklém po kuličce o průměru 10 mm na zkoušeném vzorku a na porovnávací tyči. Měření je velmi jednoduché a používá se především u velkých součástí ve výrobě a v provozu. R_m - skutečná pevnost porovnávací tyčinky [MPa]

Tvrdost měřená pomocí Poldi kladívka se značí symbolem *HB Poldi* za hodnotou tvrdosti.

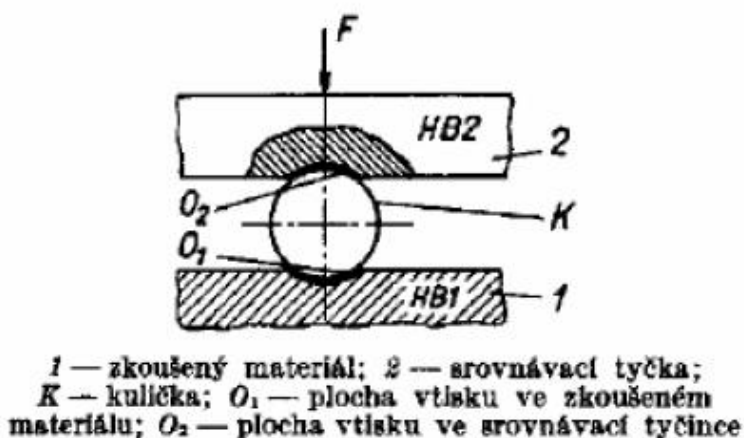
Např. *350 HB Poldi*



Obr. 11 Poldi kladívko

3.3.3.2 Tvrdoměr Poldi

Je to přenosný tvrdoměr, který umožňuje stanovení tvrdosti na základě plastické deformace vzniklé rázem a porovnání velikosti vzniklého vtisku s velikostí vtisku na materiálu o známé tvrdosti. Jde o nejmenší přenosný tvrdoměr pro měření tvrdosti metodou Brinell. Oblast jeho využití je především při nutnosti změření tvrdosti na velkých výrobcích a konstrukcích, kde nelze využít měření na statickém nebo přenosném tvrdoměru, které pracují normalizovanou metodou Brinell. Výhodou tvrdoměru jsou jeho malé rozměry, hmotnost a možnost funkčnosti prakticky v jakékoliv poloze. Tvrdoměr byl vyroben a patentován již v r. 1921. [8]

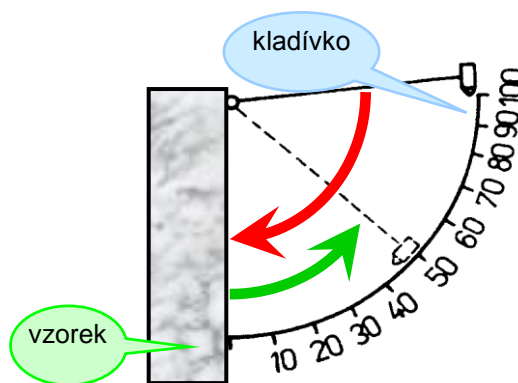


Obr. 12 Zkouška tvrdosti Poldino kladívkem

3.3.4 Metoda kyvadlová – Duroskop

Tato metoda je na stejném principu jako metoda Shoreno. Hodnota tvrdosti je vyjádřena pomocí úhlu odrazu definovaného zkušebního tělesa. U této metody nemůže docházet ke tření zkušebního tělesa ve vedení, jako tomu bylo u Shoreho metody.

Zkušebním tělesem je kladívko, na kterém je upevněna ocelová kulička. Kladívko je umístěno na otočném rameni. Kladívko padá z určité výšky na povrch zkoušeného materiálu a při odrazu od něj vezme s sebou vlečnou ručičku, která ukáže úhel odrazu kladívka. Hodnota tvrdosti se přímo odečítá ze stupnice tvrdoměru. Spolehlivost této metody je malá.



Obr. 13 Schéma Durokopu

3.3.5 Metoda pružného odrazu – Shoreho skleroskop

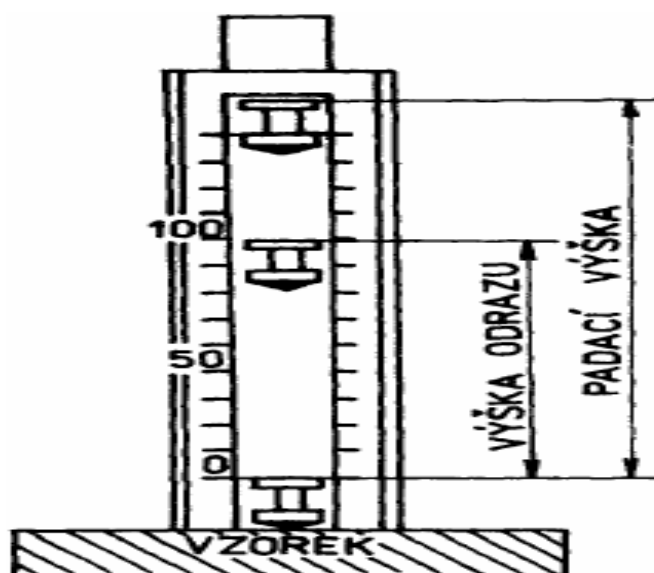
Shoreho skleroskop je založen na principu, při kterém je tvrdost dána výškou odrazu standardního tělesa, padajícího na zkoušený předmět se standardní výšky. Skládá se ze skleněné kalibrované trubičky, ve které se pohybuje válcové těleso (V) o hmotnosti 2,5g zakončené kulovitě broušeným diamantem. Těleso (V) padá na zkouškový předmět (P) s výše $10'' = 254$ mm. Naměřená tvrdost se udává v jednotkách Shoreho HSH, přičemž 100 jednotek tvrdosti podle Shoreho odpovídá výšce odrazu tělesa od povrchu tvrdě zakalené uhlíkové oceli. Stupnice je prodloužena na hodnotu 140 HSH. [8]

Konstrukce tvrdoměrů

Tvrdoměry jsou nejčastější jednoúčelové přístroje. Skládají se v podstatě ze 3 hlavních částí:

- 1.) Stojanu s nástavcem pro zkušební tělísko a přestavitelným stolcem
- 2.) Zařízení pro vyvozování síly
- 3.) Zařízení pro měření vtisku

Kontrola tvrdoměru se provádí pomocí cejchovaných kontrolních destiček.



Obr.14 Schéma Shoreho skleroskopu

5 ZKOUŠKY VRYPOVÉ

Tato zkouška patří mezi nejstarší způsoby zkoušení tvrdosti a její princip byl převzat z mineralogie, kde se ke klasifikaci tvrdosti užívá tzv. Mohsovy stupnice. V této stupnici je seřazeno 10 nerostů, z nichž každý následující je schopen vyrýt do všech předcházejících nerostů vryp.

Tab. 12. Srovnání Mohsovy mineralogické stupnice a materiálů ve strojírenství

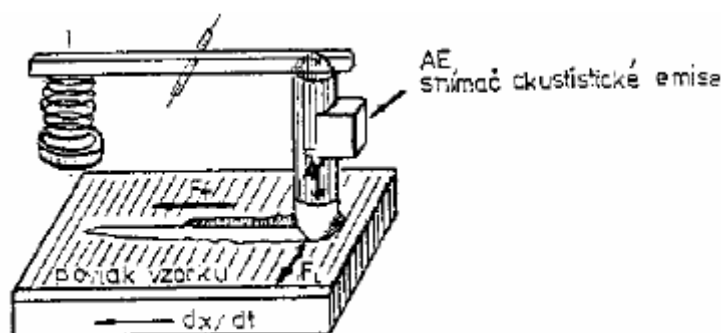
mineralogie		strojírenství			
1. mastek	6, živec	grafit 0,5	stříbro 2,5	iridium 6	
2. sůl kamenná	7. křemen	cín 1,5	antimon 3,5	plantiniridium 6,5	
3. kalcit (vápenec)	8. topas	olovo 4,5	čisté železo 4,5	ocel tvrdá 8,5	
4. fluorit (kazivec)	9. korund	hliník 2,0	platina 4,5	nitridovaný povrch 9	
5. apatit	10. diamant	zlato 2,5	ocel měkká 5	tvrdé (slinuté kovy) 9,8	

Citlivost této stupnice je však velmi malá, proto se u kovů a jejich slitin určuje tvrdost na základě šířky vytvořeného vrypu. K určování této tvrdosti se používá přístroj, který zavedl Matens.

Po vyhlazené ploše zkoušeného kovu pojíždí diamantový kužel s vrcholovým úhlem 90° , který lze zatížit silou až 19,8 N. Vytvořený vryp se měří pomocí optického mikroskopu. Číslem tvrdosti dle Martense je zatížení, které vytvoří vryp šířky 0,01 mm. Druhou možností je, že při stejném zatížení se vytvoří vryp a porovnává se šířka vrypu. [10]

Způsob zjišťování tvrdosti vrypovou metodou je značně nepřesný, a proto se velmi málo používá. Jediné současné praktické využití je možno nalézt při studiu velmi tvrdých povrchových několik mikronů tenkých vrstev nitridů popř. karbidů kovů. V literatuře se tato zkouška nazývá *scratch test*. [9,10,11,12]

V tomto případě je zátěžná síla proměnná. Na určité délce se vytvoří vryp a narůstající silou, např. od 0 do 1,96 N. U těchto vrstev se pak analyzuje jejich adhezivně-kohezivní chování, tj. odezva vrstvy na pronikající pohybující se indentor. Indentor je opět diamantový kužel avšak s vrcholovým úhlem 120° s poloměrem zaoblení vrcholu 0,2 mm. V tomto případě se pak určuje kritické zatížení L_c , které mělo za následek adhezní odtržení vrstvy.



Obr. 15 Schématické znázornění vrypové zkoušky

Standardní rychlost posuvu vzorku dx/dt má hodnotu 10 mm/min a rychlost zatěžovací síly $dL/dt = 100$ N/min. Hodnota drsnosti R_a měřeného povrchu by neměla překročit hodnotu $0,25 \mu\text{m}$.

„Přístroj scratch testu zaznamenává průběh normálového F_n a tangenciální F_t síly působící na indentor, případně i hodnoty frikčního koeficientu $\mu = F_t/F_n$ a signál akustické emise, který vzniká při rozvoji a šíření vnitřních trhlinek vlivem vnějšího zatěžování. Po provedení zkoušky se povrch vyhodnocuje pomocí optického popř. řádkovacího elektronového mikroskopu. Sledují se lokality s adhezním i kohezním porušením vrstvy. Všechna tato porušení vrstvy se vyhodnocují v korelaci s výsledkem signálu akustické emise. Zjištěné hodnoty se udávají v závislosti zatížení L_c a jsou plně uznávány jako veličiny charakterizující adhezní vlastnosti systému tenká vrstva-substrát.“ [11]

CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo provést měření tvrdosti u vybraného typu kovového materiálu metodou Rockwell. Zkušební materiál byla zvolena ocel 14220, která byla jak v základním stavu, tak tepelně (zušlechťování, kalení) a chemicko – tepelně (cementace, nitridace) zpracována.

Cíle bakalářské práce byly následující:

- Vypracování literární studie na dané téma
- Příprava zkušebních těles
- Provedení měření tvrdosti na připravených zkušebních tělesech
- Vyhodnocení naměřených výsledků

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Bakalářská práce se zabývá měřením tvrdosti u vybraného kovového materiálu metodou Rockwell. Zkušební těleso bylo zvoleno z oceli 14 220 a bylo tepelně a chemicko-tepelně zpracováno.

5.1 Typy zkoušek

Jelikož jsou mezi měřenými zkušebními tělesy, tělesa s velmi tenkými vrstvami (nitridovaná vrstva) bylo nutno tyto skutečnosti zohlednit. Proto byly vybrány čtyři typy zkoušek tvrdosti. Byla vybrána metoda Rockwell (HRC, HR15N, HR 30N a HR45N).

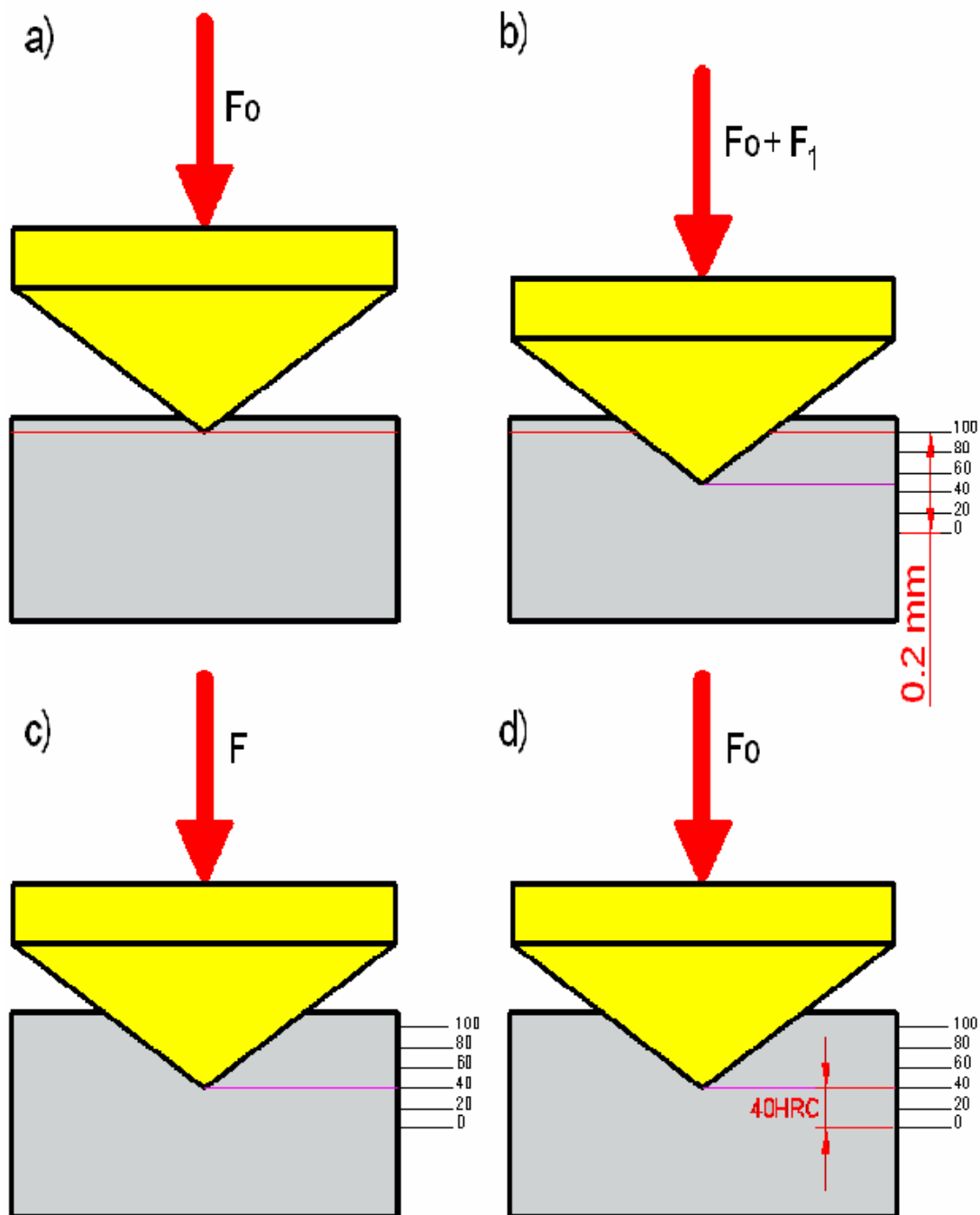
Tab.13. Použité normy při měření

Poř. číslo	Název	Norma
1	Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Zkušební metoda C	ČSN EN ISO 6508-1
3	Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Zkušební metoda 45N	ČSN EN ISO 6508-1
4	Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Zkušební metoda 30N	ČSN EN ISO 6508-1
5	Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Zkušební metoda 15N	ČSN EN ISO 6508-1

5.2 Postup měření

Pro všechny zadané metody podle Rockwella se jako indentor používal diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a s poloměrem zaoblení špičky $r = 2\text{mm}$. Na stroji se nastavila stupnice dané metody a na podložku pod indentor se umístil zkušební vzorek. Na vzorek nejprve působila předzatěžující síla F_0 , která se měnila podle zadaná stupnice tvrdosti. Předzatěžující síla má odstranit nerovnosti a rozdílné jakosti na povrchu vzorku. Po určité době se síla zvýší na sílu zatěžující F . Velikost zatěžující síly závisí na typu metody. Tvrdost daného vzorku získáme tak, že od hloubky indentoru při předzatěžující síle vyneseme stupnici se 100 dílky do hloubky 0,2mm. Výsledná tvrdost se stanovuje z trvalé hloubky,

která je způsobená zatěžující silou. Tvrdost je rozdíl hloubky předzatěžující síly před působením přidavného zatížení a po ukončení působení přidavného zatížení.



Obr. 16 - Schéma metody

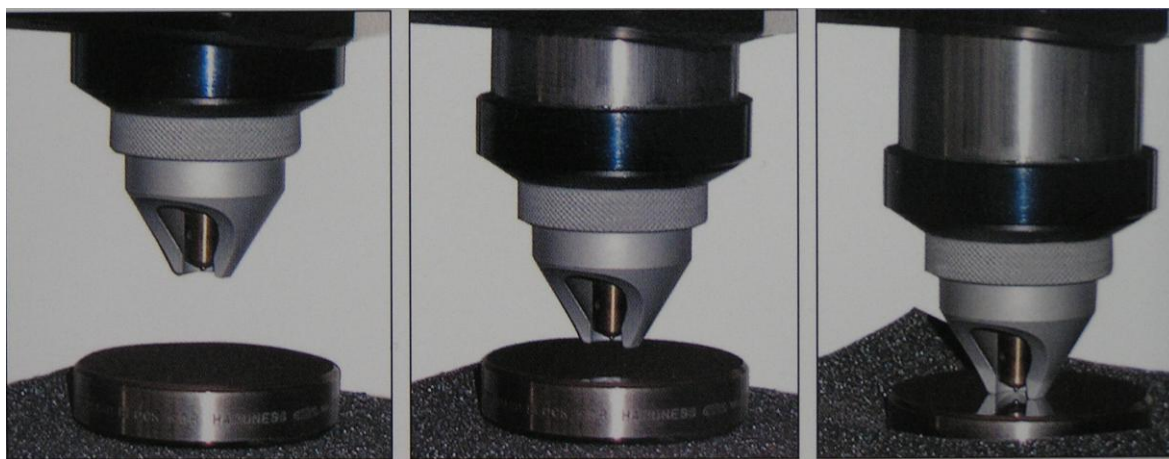
F_0 – předzatěžující síla

F_1 – přidavné zatížení

F – zatěžující síla

Tab.14. Vnikací těla a zkušební síly pro zadané metody podle Rockwella

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Vnikací těleso	F_0 [N]	F_1 [N]	F [N]	Rozsah měření
C	HRC	diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 – 70
30 N	HR30N	diamantový kužel	29,42	264,8	294,2	42 – 86
15 N	HR15N	diamantový kužel	29,42	117,7	147,1	70 – 94



Obr. 17 - Měřicí hlava

6 TEPELNÉ A CHEMICKO – TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

6.1 Cementování

Cementování je nasycování povrchu nízkouhlíkové oceli uhlíkem a následné zakalení. Při tomto procesu dochází k vytváření vrstvy obohacené o uhlík až na eutektoidní nebo mírně nadeutektoidní koncentraci. Podle druhu prostředí, z něhož difunduje uhlík do oceli rozlišujeme 3 způsoby cementování (v tuhém prostředí, v tekutém prostředí, v plynném prostředí). Již nacementovaná součást získá teprve po zakalení v povrchové vrstvě tetragonální martenzit o vysoké tvrdosti, který se popouštěním (na 200°C) transformuje na kubický martenzit. Výsledný povrch materiálu je tvrdý a odolný vůči opotřebení při zachování houževnatosti základního materiálu pod touto vrstvou. Cementuje se nad teplotou A_{C3} (850° - 950°). Tvrdost vrstvy dosahuje 50 až 60HRC. Kalení se provádí buď z přímo cementační teploty, jednoduchým kalením po novém ohřevu nebo dvojitým kalením (zjemnění zrna).[12]

6.2 Nitridování

Při nitridaci dochází k sycení povrchu oceli dusíkem v plynném nebo kapalném prostředí. Povrch je tvořen velice tvrdými nitridy legujících prvků. Nitridace se provádí při teplotě 500-600°C. Ke zlepšení nitridační vrstvy se používají speciální oceli obsahující hliník, jehož nitridy hliníku nejsou tak křehké, jako nitridy železa a legujících prvků. [12]

6.3 Povrchové kalení

Povrchové kalení se provádí tak, že se materiál rychle ohřeje na kalící teplotu (u tohoto vzorku to je 930°C) a ihned se ochladí proudem vodní sprchy. Jelikož je ohřev součásti je rychlý, nestačí se součást ohřát v celém průřezu, ale pouze na povrchu. V jádru tak nedochází k překrystalizaci a zůstává měkké a houževnaté. Zakalená vrstva je tenká (1 – 3 mm, podle velikosti součásti) a její struktura je tvořena martenzitem a zbytkovým austenitem. Po zakalení mohou v součásti vznikat značná pnutí, proto se po kalení provádí popouštění za nízkých teplot (160°C).[2]

6.4 Zušlechtěno

Zušlechtování oceli je martenzitické kalení s následujícím popouštěním na teplotu 350 až 650°C, při nichž se původní martenzit rozpadá na tzv. přechodové struktury – troostit (směs perlitu a martenzitu), osmondit, sorbit, což je velmi jemný perlit a ferit. Je to velmi časté tepelné zpracování součástí (např. hřídelí, čepy, ozubená kola). Rozpad austenitu popisují transformační diagramy IRA a ARA. [12]

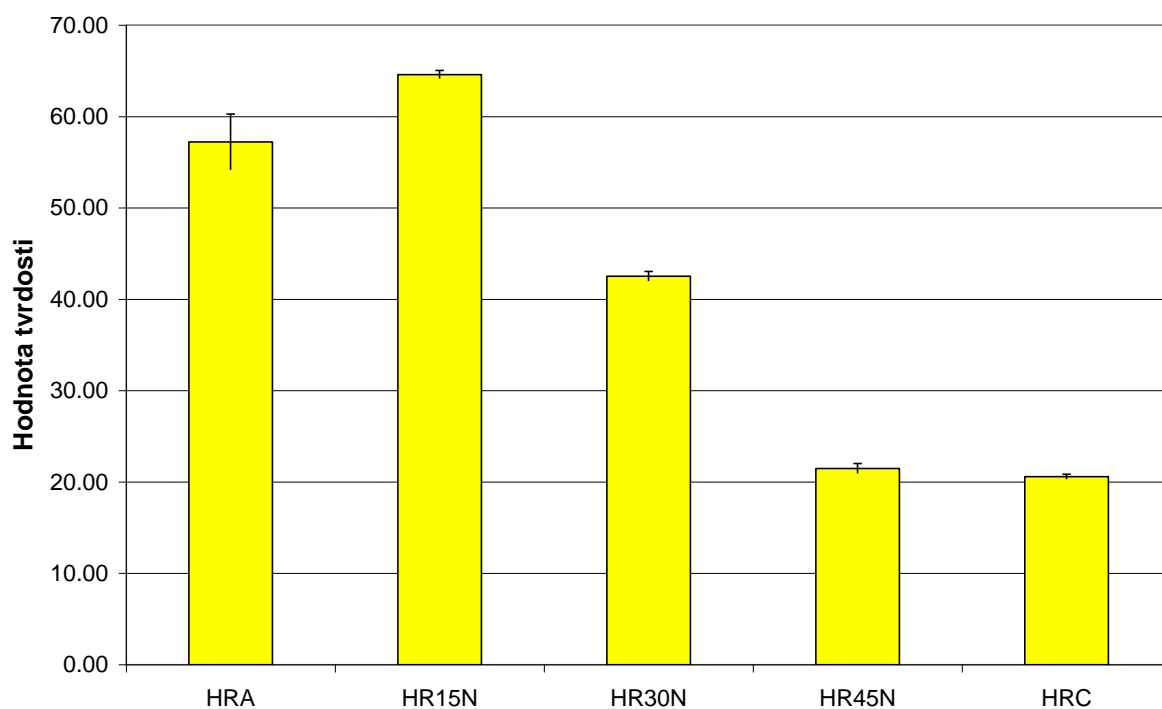
7 OCELI 14 220

Ocel Mn-Cr se používá k cementování a ke kyanování. Ocel je dobře tvářitelná za tepla, po žihání na měkko i za studena, se zaručeným rozmezím prokalitelnosti. Je dobře obrobitelná - pro hladké obrábění se doporučuje ocel zušlechtěná na pevnost 690 - 880 MPa. Je vhodná pro strojní součásti pro zušlechtění do průměru 35mm, k cementování s velmi tvrdou cementovanou vrstvou s velkou pevností v jádře (volné a zápustkové výkovky, ozubená kola, taliřová kola, kardanovy klouby, hřídele, svorníky, čepy, vačkové hřídele, zdviháky ventilů, pístní čepy, zubové spojky), pro sériovou výrobu strojních součástí za předpokladu dodržení téže technologie tepelného zpracování také u odběratele. Svařitelnost je dobrá - ocel 14220 je vhodná ke svařování. Předehřev 200 – 250°C. [12]

7.1 Základní materiál oceli 14 220

Tab.15. Tvrdost základního materiálu oceli 14220

n	HRA	HR15N	HR30N	HR45N	HRC
1	59.75	65.32	38.87	22.58	21.96
2	60.15	65.23	43.85	23.35	21.12
3	60.55	65.84	43.25	19.35	21.52
4	60.52	64.52	44.56	22.94	20.78
5	60.58	65.35	43.85	20.63	19.73
6	59.98	66.21	42.29	22.28	19.52
7	29.87	65.52	42.1	21.68	20.46
8	59.63	63.28	42.55	19.52	21.06
9	61.65	62.35	43.05	23.54	19.98
10	59.53	62.35	40.96	18.99	19.64
X	57.22	64.60	42.53	21.49	20.58
Směr.odch.	9.63	1.43	1.65	1.73	0.85
Nej.měr.A	3.05	0.45	0.52	0.55	0.27



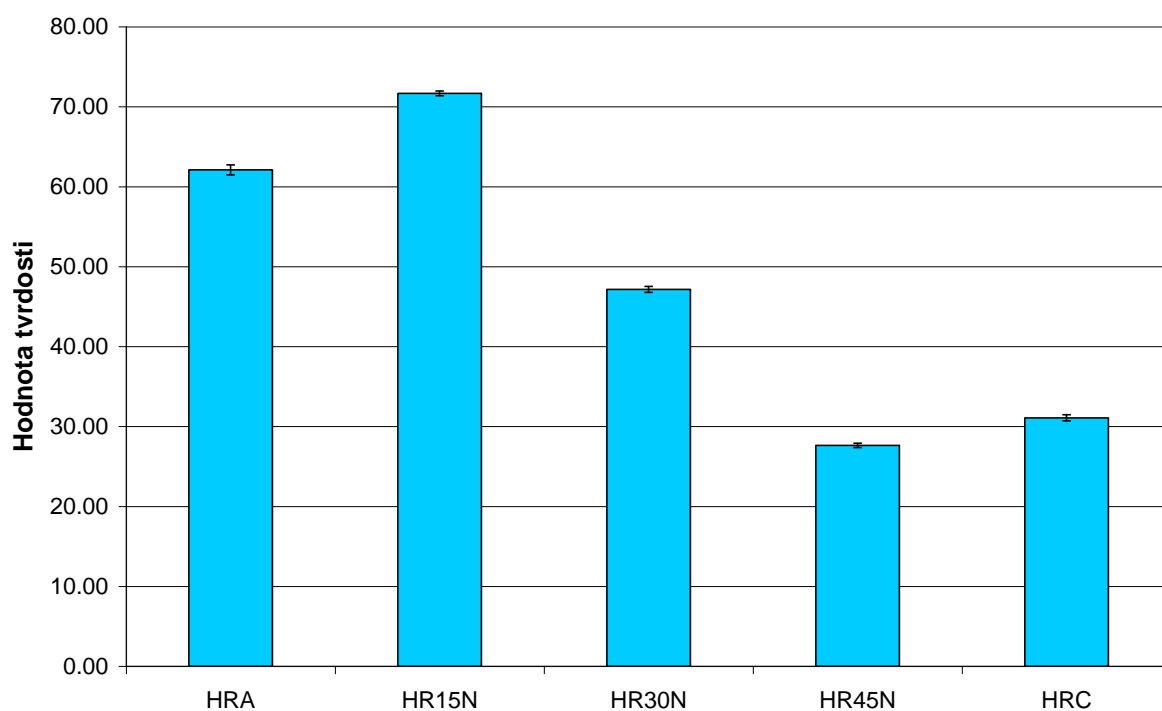
Obr.18 - Tvrdost 14220 – základní materiál

Při měření tvrdosti u základního materiálu oceli 14220 (tepelně a chemicko – tepelně nezpracovaného) bylo zjištěno, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena metodou HR15N (64,6 HR15N) a nejmenší hodnota byla zjištěna metodou HRC a to 20,58 HRC (Tab. 15, obr.18).

7.2 Zušlechtěná ocel 14 220

Tab.16. Tvrdość oceli 14220 zušlechtěna

n	HRA	HR15N	HR30N	HR45N	HRC
1	65.55	71.55	48.75	27.85	33.25
2	64.12	72.55	48.23	27.56	32.85
3	63.25	72.04	47.89	28.21	30.81
4	62.15	73.02	48.22	28.63	31.37
5	63.14	72.54	45.36	28.65	31.25
6	62.52	71.54	46.85	26.89	30.78
7	60.32	70.01	45.87	26.11	31.12
8	59.89	71.89	47.93	28.03	29.85
9	59.65	71.12	46.35	27.85	30.02
10	60.45	70.58	46.17	26.54	29.52
X	62.10	71.68	47.16	27.63	31.08
Směr.odch.	1.98	0.93	1.18	0.86	1.21
Nej.měr.A	0.63	0.29	0.37	0.27	0.38



Obr.19 - Tvrdość oceli 14220 zušlechtěna

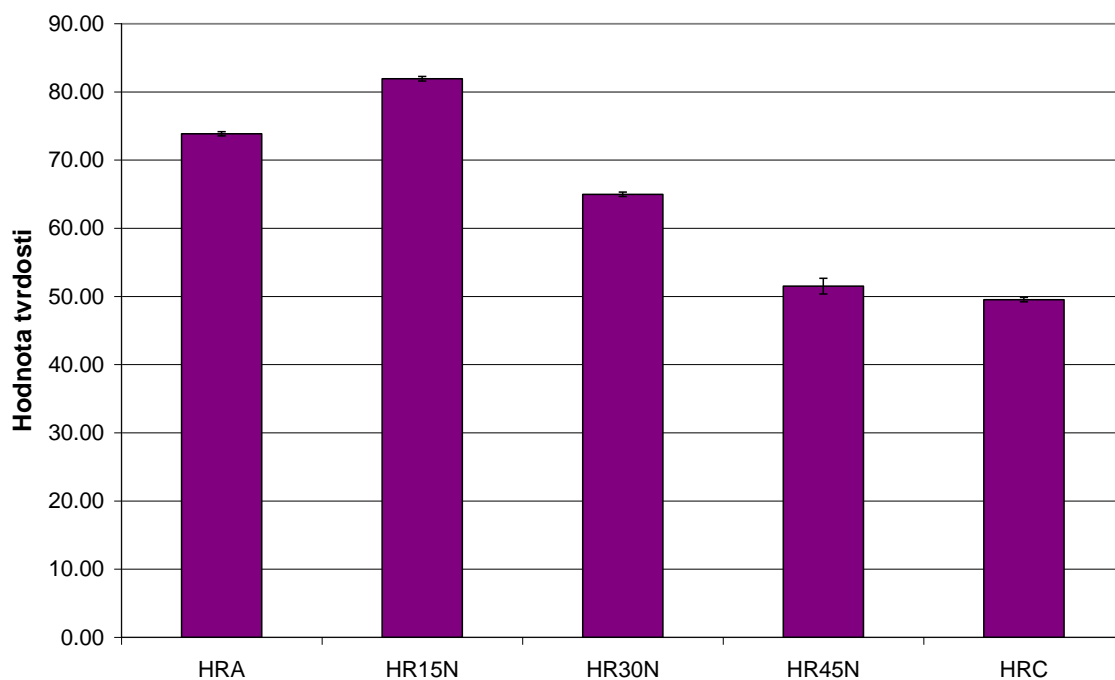
Při měření tvrdosti u zušlechtěné oceli 14220 bylo zjištěno, že nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti byla zjištěna metodou HR15N a to 71,68 HR15N. Naopak nejmenší hodnota byla

zjištěna metodou HRC, kde naměřená tvrdost dosáhla velikosti 31,08 HRC (Tab. 16, obr.19).

7.3 Povrchově kalená ocel 14 220

Tab.17. Tvrdost oceli 14220 povrchově kalené

n	HRA	HR15N	HR30N	HR45N	HRC
1	75.25	81.22	64.83	54.2	49.27
2	72.89	82.35	63.55	51.87	49.65
3	73.25	81.75	64.87	50.21	49.58
4	73.68	84.02	65.56	42.55	50.21
5	73.84	82.45	65.32	52.89	48.89
6	73.12	82.8	65.98	51.42	50.32
7	75.8	80.52	63.85	53.21	49.65
8	74.12	81.03	63.65	52.1	49.41
9	73.02	81.2	66.12	50.32	51.02
10	73.52	80,38	66.03	56.32	47.25
X	73.85	81.93	64.98	51.51	49.53
Směr.odch.	0.97	1.09	1.00	3.64	1.00
Nej.měr.A	0.31	0.34	0.32	1.15	0.32



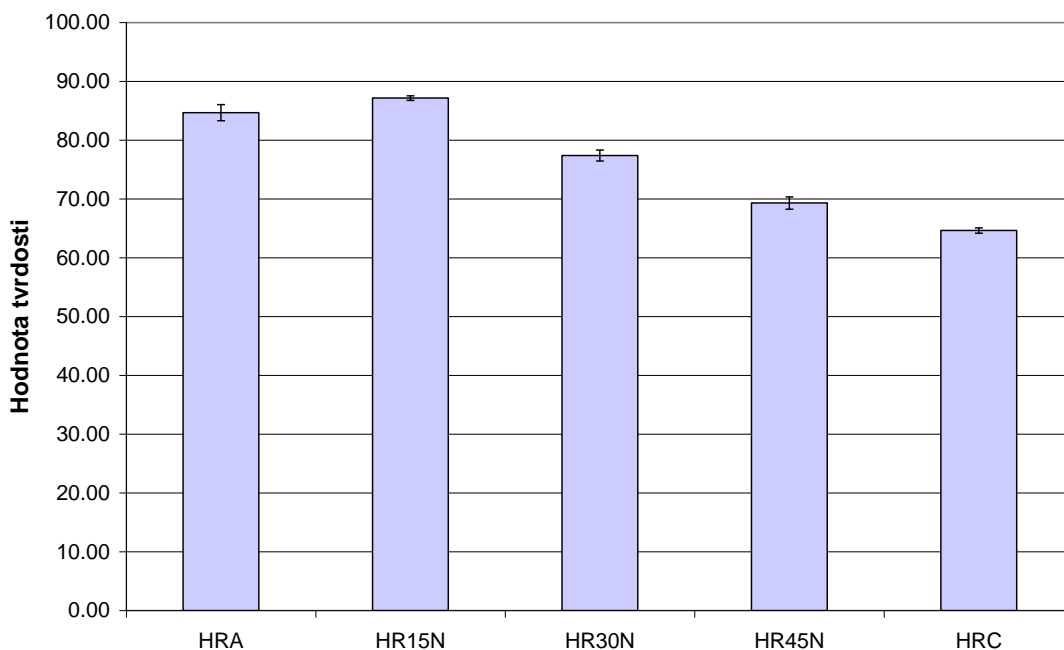
Obr.20 - Tvrđost ocel 14220 povrchově kalena

Při měření tvrdosti zkušebního tělesa oceli 14220, které bylo povrchově zakaleno vyšlo najevo, že nejvyšší hodnota byla naměřena metodou HR15N a to 80,38 HR15N. Naopak nejmenší hodnota byla zjištěna metodou HRC, kde byla naměřena hodnota tvrdosti 49,53 HRC (Tab. 17, obr.20).

7.4 Cementovaná ocel 14 220

Tab.18. Tvrdost oceli 14220 cementována

n	HRA	HR15N	HR30N	HR45N	HRC
1	81.35	88.62	76.87	66.54	65.46
2	81.99	89.34	84.64	75.6	64.31
3	83.12	86.97	77.49	68.39	64.51
4	82.14	85.64	75.03	66.93	64.33
5	83.55	86.82	78.48	69.7	65.81
6	91.79	87.44	77.25	66.54	66.17
7	93.65	85.69	75.65	67.98	62.32
8	82.38	85.92	73.95	68.54	65.89
9	83.12	87.97	78.5	67.78	65.25
10	83.66	87.16	75.9	75.02	62.23
X	84.68	87.16	77.38	69.30	64.63
Směr.odch.	4.32	1.24	2.94	3.31	1.40
Nej.měr.A	1.37	0.39	0.93	1.05	0.44



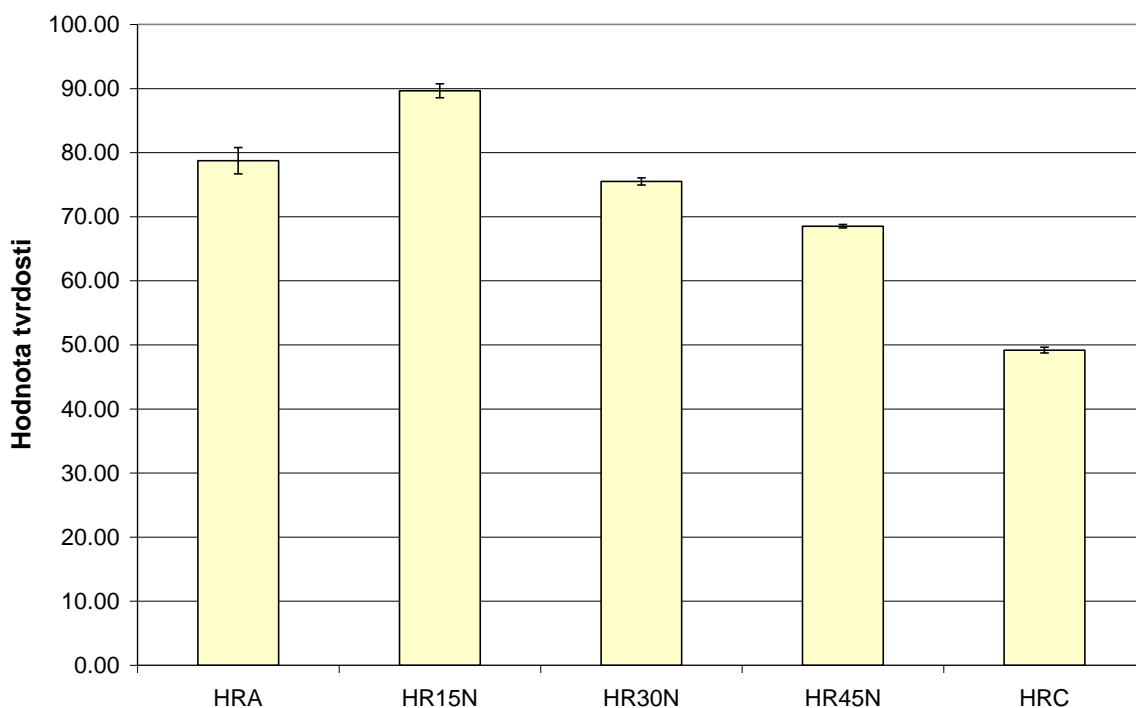
Obr.2 - Tvrdost ocel 14220 cementována

Měření tvrdosti cementované oceli 14220 ukázalo, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena metodou HR15N (87,16 HR15N). Nejmenší hodnota byla naopak zjištěna metodou HRC a to hodnotou 64,63 HRC (Tab. 18, obr.21).

7.5 Nitridovaná ocel 14 220

Tab.19. Tvrdost oceli 14220 nitridována

n	HRA	HR15N	HR30N	HR45N	HRC
1	80.25	90.58	74.12	67.2	49.32
2	79.58	91.32	75.41	69.3	47.85
3	81.52	87.63	77.81	68.52	48.23
4	60.32	87.89	75.78	68.59	47.54
5	81.02	87.5	74.57	67.45	47.56
6	81.45	88.69	71.89	68.54	48.52
7	80.58	89.03	75.84	69.71	51.32
8	80.98	88.77	75.12	68.32	50.87
9	81.03	98.56	76.98	67.91	50.38
10	80.54	86.53	77.45	69.52	50.12
X	78.73	89.65	75.50	68.51	49.17
Směr.odch.	6.49	3.44	1.75	0.84	1.42
Nej.měr.A	2.05	1.09	0.55	0.27	0.45

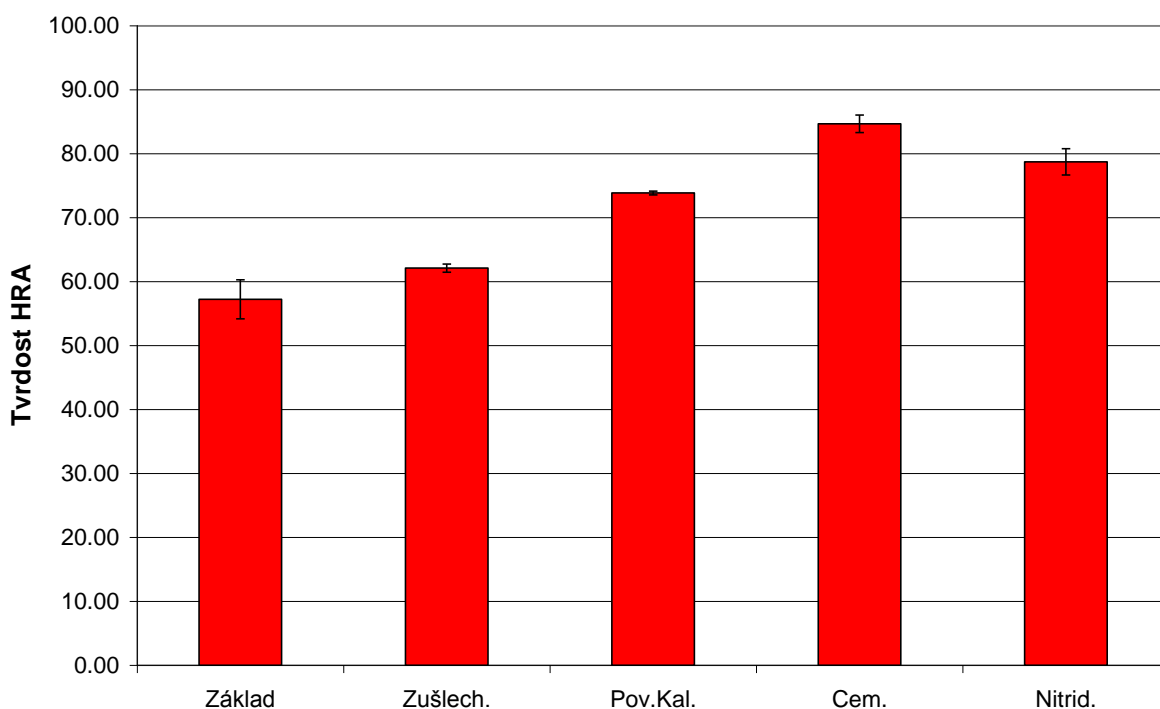


Obr. 22 - Tvrdost oceli 14220 nitridována

U nitridované oceli 14220 byla zjištěna nejvyšší hodnota tvrdosti metodou HR15N (89,65 HR15N). Nejmenší hodnota tvrdosti byla naopak zjištěna metodou HRC a to o velikosti 49,17HRC (Tab. 19, obr.22).

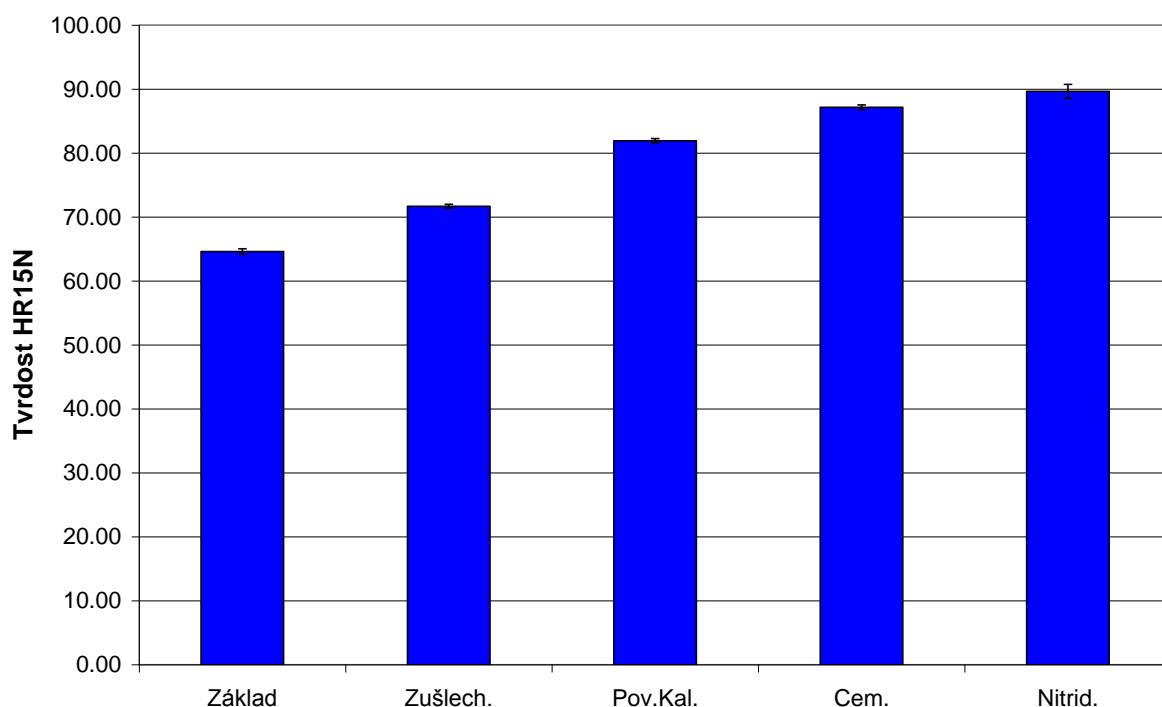
8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Bakalářská práce řeší problematiku měření tvrdosti dle Rockwella u vybraného typu kovového materiálu. Pro měření tvrdosti byl zvolen kovový materiál ocel 14220, ze které byla zhotovena zkušební tělesa. Ta byla následně tepelně (zušlechťování, kalení) nebo chemicko – tepelně (cementace, nitridace) zpracována. Pro měření tvrdosti byly použity metody HRA, HR15N, HR30N, HR45N, HRC. Měření bylo vždy provedeno 10 x na různých místech plochy zkušební tělesa.



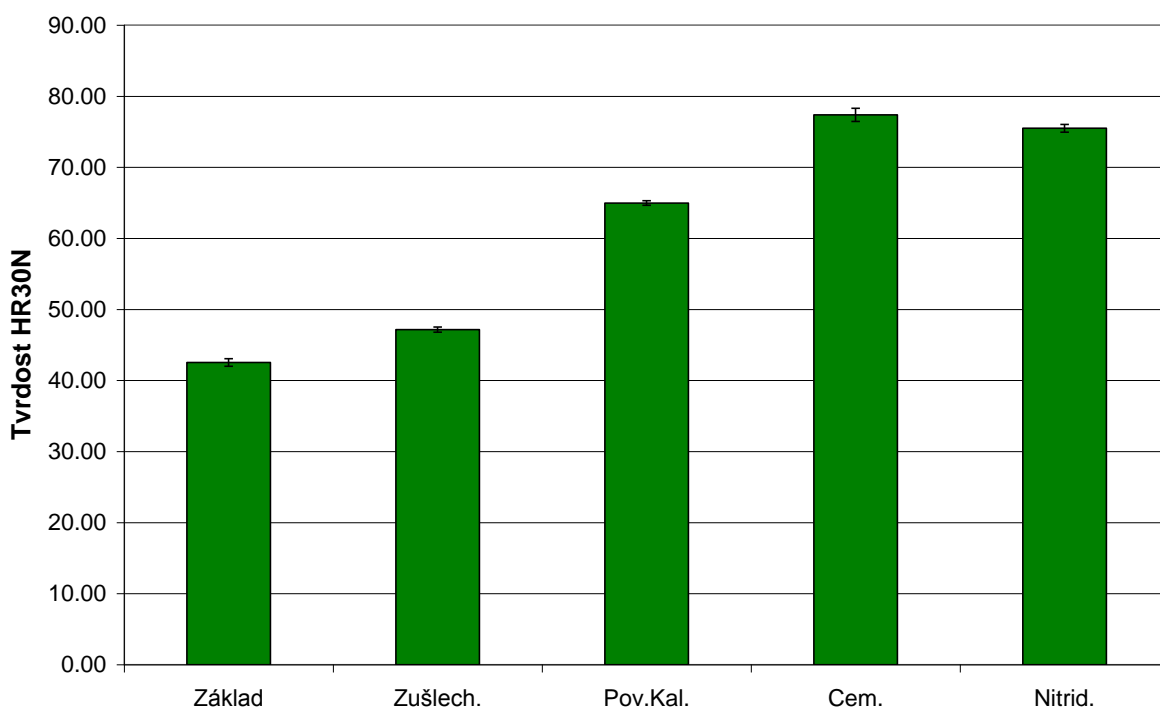
Obr.23 - Tvrdost oceli 14220 (metoda HRA)

Měření tvrdosti metodou HRA se potvrdilo, že nejmenší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u tepelně neovlivněného materiálu (základní). Vyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u tepelně zpracovaných zkušebních těles (kalení, zušlechťování). Zde bylo dosaženo bainitické nebo dokonce martenzitické struktury, která vykazovala vyšší hodnoty než tomu bylo u základního materiálu. Nejvyšších hodnot tvrdosti měřených metodou HRA bylo dosaženo u zkušebních těles chemicko – tepelně zpracovaných. Zde bylo dosaženo velmi tvrdých struktur martenzitu a tvrdých nitridů. Nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti touto metodou byla zjištěna u cementované vrstvy. U nitridované došlo zřejmě k prolomení vrstvy a tím k naměření menší hodnoty tvrdosti (obr.23).



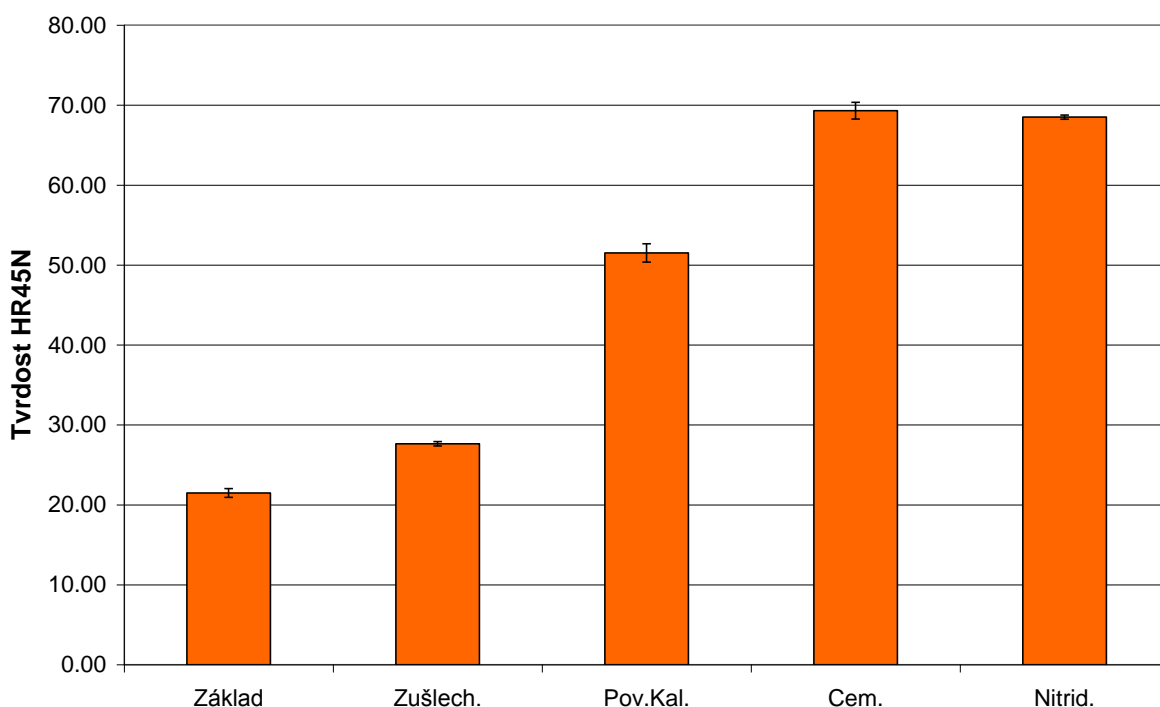
Obr.24 - Tvrdość oceli 14220 (metoda HR15N)

Měření tvrdosti metodou HR15N se potvrdilo, že nejmenší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u tepelně neovlivněného materiálu (základní). Vyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u tepelně zpracovaných zkušebních těles (kalení, zušlechťování). Zde bylo dosaženo bainitické nebo dokonce martenzitické struktury, která vykazovala vyšší hodnoty než tomu bylo u základního materiálu. Nejvyšších hodnot tvrdosti měřených metodou HR15N bylo dosaženo u zkušebních těles chemicko – tepelně zpracovaných. Zde bylo dosaženo velmi tvrdých struktur martenzitu a tvrdých nitridů. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla zjištěna u nitrinované vrstvy. Metoda HR15N se používá pro velmi tenké vrstvy, tudíž nedošlo k prolomení tenké nitrinovací vrstvy (obr.24).



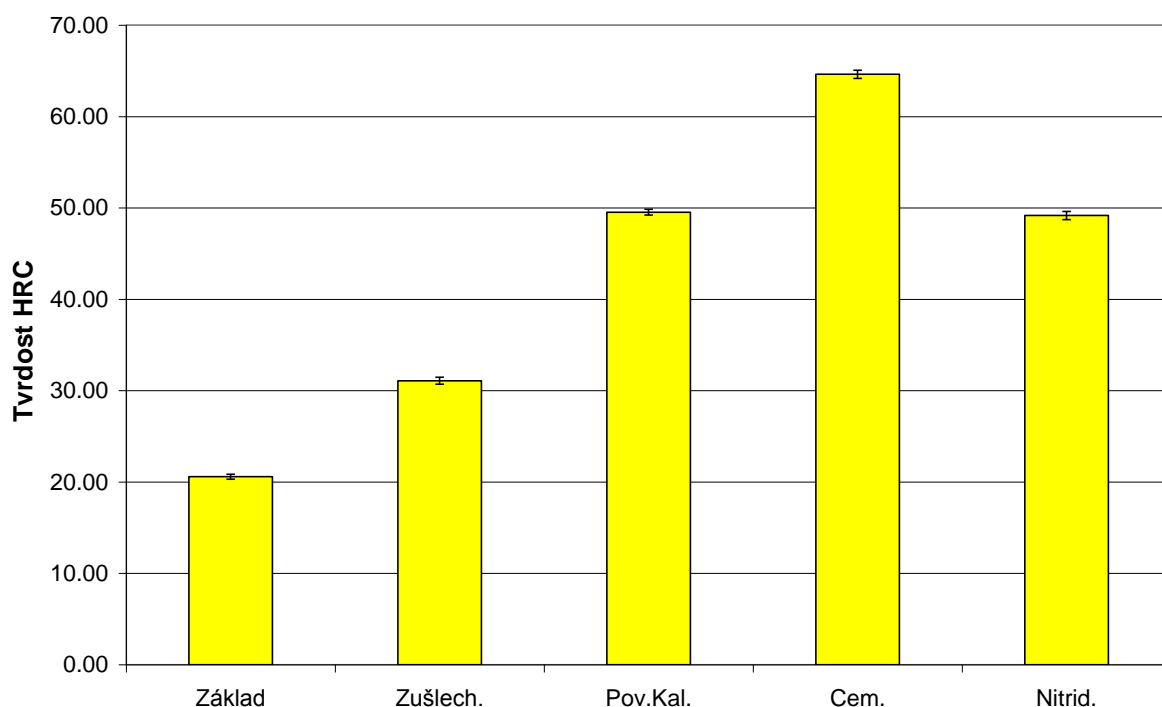
Obr.25 - Tvrdość oceli 14220 (metoda HR30N)

Měření tvrdosti metodou HR30N bylo potvrzeno, že nejmenší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u tepelně neovlivněného materiálu (základní). Vyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u tepelně zpracovaných zkušebních těles (kalení, zušlechtování). Zde bylo dosaženo bainitické nebo dokonce martenzitické struktury, která vykazovala vyšší hodnoty tvrdosti, než tomu bylo u základního materiálu. Nejvyšších hodnot tvrdosti měřených metodou HR30N bylo dosaženo u zkušebních těles chemicko – tepelně zpracovaných. Zde bylo dosaženo velmi tvrdých struktur martenzitu a tvrdých nitridů. Nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti touto metodou byla zjištěna u cementované vrstvy. U nitridované došlo zřejmě v průběhu zkoušky k prolomení vrstvy a tím k ovlivnění hodnot tvrdosti (obr.25).



Obr.26 - Tvrdość oceli 14220 (metoda HR45N)

Měření tvrdosti metodou HR45N bylo potvrzeno, že nejmenší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u tepelně neovlivněného materiálu (základní). Vyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u tepelně zpracovaných zkušebních těles (kalení, zušlechtování). Zde bylo dosaženo bainitické nebo dokonce martenzitické struktury, která vykazovala vyšší hodnoty tvrdosti, než tomu bylo u základního materiálu. Nejvyšších hodnot tvrdosti měřených metodou HR45N bylo dosaženo u zkušebních těles chemicko – tepelně zpracovaných. Zde bylo dosaženo velmi tvrdých struktur martenzitu a tvrdých nitridů. Nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti touto metodou byla zjištěna u cementované vrstvy. U nitridované došlo zřejmě během zkoušky k prolomení vrstvy a tím k ovlivnění hodnot tvrdosti (obr.26).



Obr. 27 - Tvrdość oceli 14220 (metoda HRC)

Měření tvrdosti metodou HRC bylo potvrzeno, že nejnižší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u tepelně neovlivněného materiálu (základní). Vyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u tepelně zpracovaných zkušebních těles (kalení, zušlechťování). Zde bylo dosaženo bainitické nebo dokonce martenzitické struktury, která vykazovala vyšší hodnoty tvrdosti, než tomu bylo u základního materiálu. Nejvyšších hodnot tvrdosti měřených metodou HRC bylo dosaženo u zkušebních těles chemicko – tepelně zpracovaných. Zde bylo dosaženo velmi tvrdých struktur martenzitu a tvrdých nitridů. Nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti touto metodou byla zjištěna u cementované vrstvy. U nitridované došlo zřejmě k prolomení vrstvy vysokou zatěžující silou při zkoušce a tím k ovlivnění hodnot tvrdosti (obr.27).

9 ZÁVĚR

Bakalářská práce řeší problém měření tvrdosti u oceli 14220, která je tepelně (zušlechťování, kalení) nebo chemicko – tepelně (cementace, nitridace) zpracována. Měření tvrdosti bylo realizováno v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství na tvrdoměru Affri Integral 2E. Zvolena byla metoda Rockwell (HRA, HR15N, HR30N, HR45N a HRC). Měření bylo prováděno vždy 10x na různých místech plochy zkušební tělesa.

Z naměřených výsledků tvrdosti vyplývá, že všechny použité metody byly vhodně zvoleny pro kvalifikaci a správné rozdělení připravených zkušebních těles. Každá použitá metoda velmi přesně určila hodnoty tvrdosti.

Dále bylo zjištěno, že čím větší byla zatěžující síla, tím výrazněji se lišily připravená zkušební tělesa svou tvrdostí. Při použití malé zatěžující síly (metoda HR15N), jsou hodnoty s velmi malým rozdílem tvrdosti. Touto metodou byla navíc změřena i nejtenčí nitridovaná vrstva.

Při použití větší zatěžující síly při zkoušce tvrdosti bylo zjištěno, že dochází k porušení tenkých vrstev (nitridované vrstvy). Cementovaná vrstva, která měla mnohem větší tloušťku porušena nebyla a vykazovala největší hodnoty tvrdosti. Nejmenší naopak byly naměřeny u základního materiálu oceli 14220. Mezi nimi ležely hodnoty tvrdosti zkušebních těles, které byly tepelně zpracovány (kalení, zušlechťování).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HLUCHÝ, M. – KOLOUCH, J.: *Strojírenská technologie I*. Scientia, spol. s.r.o., pedagogická nakladatelství, 1999. ISBN 80-7318-150-6
- [2] LUKOVICS, I.: *Konstrukční materiály a technologie*. 1st ed. Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1992. 272p. ISBN 80-214-0399-3
- [3] PÍŠEK, F.: *Nauka o materiálu II* (1.svazek). vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959
- [4] VELES, P.: *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 2nd ed. Nakladatelství technické literatury Praha, 1999
- [5] SKÁLOVÁ, J. – KOVAŘÍK, R. – BENEDIKT, V.: *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4th ed. Západočeská univerzita v Plzni, 2005. 178p. ISBN 80-7043-417-1
- [6] ATEAM, [online]. 2005 [cit. 2010-05-12]. Dostupné z: www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti_pdf
- [7] CONVERTER, [online]. 2002 [cit. 2010-05-12]. Dostupné z: www.converter.cz
- [8] METROTEST, s.r.o. Kladno. [online]. 1994 [cit. 2010-05-12]. Dostupné z: www.metrotest.cz/hardness/zkousky_tvrlosti.pdf
- [9] QUIDO. [online]. 2003 [cit. 2010-05-12]. Dostupné z: www.quido.cz/mereni/brinell.htm
- [10] Vysoké učení technické v Brně [online]. [cit. 2010-05-12]. Dostupné z: www.ime.fme.vutbr.cz/
- [11] DORAZIL, E. – a KOLEKTIV: *Nauka o materiálu I*. Vysoké učení technické v Brně, 1976
- [12] HLAVAČKA, T.: *Zkoušení tvrdosti kovů*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A (h)	Plocha vtisku
C	Cementování
D	Průměr kuličky
d	Průměr vtisku
d ₁	Délka úhlopříčky
d ₂	Délka uhlopříčky
d _{1,2}	Aritmetický průměr úhlopříček d ₁ , d ₂
e	Hloubka vtisku
F	Zkušební síla
h	Hloubka vtisku
K	Kalení
K ₁	Korekční konstanta tvrdoměru
K ₂	Korekční konstanta tvrdoměru
l	Délka úhlopříčky
n	Číslo měření
NŽ	Normalizační žihání
s	Empirická směrodatná odchylka
u	Průměrná hodnota úhlopříčky
ŽM	Žihání na měkko
α	Úhel spuštění zkušebního tělíska
β	Úhel odrazu zkušebního tělíska
φ	Aritmetický průměr

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Princip zkoušky tvrdosti podle Brinella
- Obr. 2 Průběh zkušebního zatížení – metoda Brinell
- Obr. 3 Závislost tvrdosti HB na velikosti zátěžné síly
- Obr. 4 Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Brinella
- Obr. 5 Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse
- Obr. 6 Průběh zkušebního zatížení – metoda Vickers
- Obr. 7 Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Vickerse
- Obr. 8 Princip zkoušky tvrdosti podle Rockwella
- Obr. 9 Průběh zkušebního zatížení – metoda Rockwell
- Obr. 10 Průběh zkušebního zatížení – metoda Rockwell
- Obr. 11 Poldi kladívko
- Obr. 12 Zkouška tvrdosti Poldino kladívkem
- Obr. 13 Schéma Duroskopu
- Obr. 14 Schéma Shořeno skleroskopu
- Obr. 15 Schématické znázornění vrypové zkoušky
- Obr. 16 Schéma metody
- Obr. 17 Měřicí hlava
- Obr. 18 Tvrdost 14220 – základní materiál
- Obr. 19 Tvrdost ocel 14220 zušlechtěna
- Obr. 20 Tvrdost ocel 14220 povrchově kalena
- Obr. 21 Tvrdost ocel 14220 cementována
- Obr. 22 Tvrdost ocel 14220 nitridována
- Obr. 23 Tvrdost oceli 14220 (metoda HRA)
- Obr. 24 Tvrdost oceli 14220 (metoda HR15N)
- Obr. 25 Tvrdost oceli 14220 (metoda HR30N)

Obr. 26 Tvrđost oceli 14220 (metoda HR45N)

Obr. 27 Tvrđost oceli 14220 (metoda HRC)

SEZNAM TABULEK

- Tab. 1 Rozdělení zkoušek tvrdosti
- Tab. 2 Srovnání Mohsovy mineralogické stupnice materiálů ve strojírenství
- Tab. 3 Související normy
- Tab. 4 Vztah průměru kuličky a zatěžující síly u metody Brinell
- Tab. 5 Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti podle Brinella
- Tab. 6 Umístění vtisků při zkoušce tvrdosti podle Brinella
- Tab. 7 Související normy (metrotest)
- Tab. 8 Druhy měření tvrdosti podle Vickerse
- Tab. 9 Zkušební zatížení při zkoušce tvrdosti metodou Vickers (metrotest)
- Tab. 10 Související normy (metrotest)
- Tab. 11 Vnikací tělesa a zkušební síly pro různé metody Rockwell
- Tab. 12. Srovnání Mohsovy mineralogické stupnice a materiálů ve strojírenství
- Tab. 13 Použité normy při měření
- Tab. 14 Vnikací těla a zkušební síly pro zadané metody podle Rockwella
- Tab. 15 Tvrdost základního materiálu oceli 14220
- Tab. 16 Tvrdost oceli 14220 zušlechtěna
- Tab. 17 Tvrdost oceli 14220 povrchově kalené
- Tab. 18 Tvrdost oceli 14220 cementována
- Tab. 19 Tvrdost oceli 14220 nitridována