

Měření tvrdosti konstrukčních ocelí

Roman Hanák

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Roman Hanák

Osobní číslo: T10777

Studijní program: B3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Forma studia: prezenční

Téma práce: Měření tvrdosti konstrukčních ocelí

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii na dané téma.**
- 2. Připravte zkušební tělesa pro zkoušku tvrdosti.**
- 3. Provedení zkoušky tvrdosti.**
- 4. Vyhodnocení naměřených výsledků.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

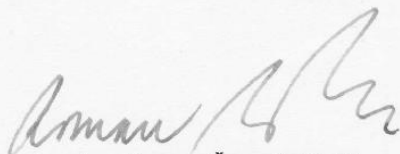
Dle doporučení vedoucího BP.

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

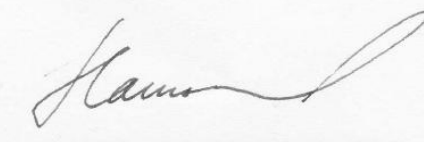
Datum zadání bakalářské práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: HANÁK ROMAN

Obor: TŽ

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 9.5.2013

Hanák

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 nevýdělečně 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 vzdělávacího 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 užit 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

Cílem bakalářské práce je měření tvrdosti konstrukčních ocelí s různým tepelným a chemicko-tepelným zpracováním metodami HRA, HRC, HR15N, HR30N a HR45N. V teoretické části jsou rozděleny a popsány jednotlivé způsoby měření tvrdosti kovů a také vysvětleny principy přístrojů pro tato měření. V praktické části dochází ke zpracování naměřených hodnot. Výsledky jsou vyhodnocovány a dochází ke srovnání tvrdostí jednotlivých vzorků.

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

ABSTRACT

The goal of my Bachelor work is by the way of hardness test (HRA, HRC, HR15N, HR30N and HR45N), establishing the hardness of engineering steel with different thermal and chemical-thermal processing. 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. Practical part is engaged to process measured values. Result are analysed and results of hardness test of different materials are confrontation.

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

Chtěl bych co nejsrdečněji poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Davidu Maňasovi Ph.D., za jeho odborné vedení, trpělivost, podporu a především cenné rady a připomínky. Rovněž patří mé díky všem, kteří mě při práci podporovali.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové 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 TVRDOSTI VNIKACÍ.....	13
2.1 ROCKWELLOVA ZKOUŠKA	13
2.1.1 Princip zkoušky	14
2.1.2 Provedení zkoušky.....	15
2.1.3 Zápis hodnoty tvrdosti	16
2.1.4 Vnikací tělesa a zkušební síly	17
2.1.5 Zkušební vzorky	17
2.1.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Rockwell	18
2.2 BRINELLOVA ZKOUŠKA	19
2.2.1 Měřicí zařízení	20
2.2.2 Princip zkoušky	20
2.2.3 Vztahy pro výpočet tvrdosti.....	20
2.2.4 Provedení zkoušky.....	22
2.2.5 Vnikací tělesa a zkušební síly	23
2.2.6 Zkušební vzorky	24
2.2.7 Zápis hodnoty tvrdosti	25
2.2.8 Přesnost výsledků zkoušky	26
2.3 VICKERSOVA ZKOUŠKA	26
2.3.1 Měřicí zařízení	26
2.3.2 Princip zkoušky.....	27
2.3.3 Vztahy pro výpočet tvrdosti	28
2.3.4 Provedení zkoušky	28
2.3.5 Vnikací tělesa a zkušební síly	29
2.3.6 Zkušební vzorky.....	30
2.3.7 Zápis hodnoty tvrdosti.....	30
2.3.8 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Vickers	31
2.4 LUDWIKOVA ZKOUŠKA.....	31
3 ZKOUŠKY DYNAMICKE	32
3.1 ZKOUŠKY ELASTICKÉ	32
3.1.1 Metoda odrazová (Shoreho skleroskop).....	32
3.1.2 Metoda kyvadlová (Duroskop).....	34
3.2 ZKOUŠKY PLASTICKÉ	34
3.2.1 Metoda stlačenou pružinou (Baumanovo kladívko)	34
3.2.2 Metoda volným pádem.....	35
3.2.3 Metoda porovnávací (Kladívko Poldi).....	35
4 ZKOUŠKY VRYPOVÉ.....	37
5 DALŠÍ METODY MEŘENÍ TVRDOSTI.....	39
5.1 KNOOPOVA ZKOUŠKA	39
5.2 UNIVERZÁLNÍ TVRDOST	40
5.2.1 Princip zkoušky.....	40
5.2.2 Značení zkoušky	41

5.3	ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI.....	41
5.3.1	Princip zkoušky.....	41
II.	PRAKTICKÁ ČÁST.....	43
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	44
6.1	ZVOLENÉ TYPY ZKOUŠEK.....	44
6.2	POSTUP MĚŘENÍ.....	45
7	OCEL 13240	47
7.1	ZÁKLADNÍ MATERIÁL OCEL 13240	48
7.2	POVRCHOVĚ KALENÁ OCEL 13240	49
8	OCEL 16220	50
8.1	ZÁKLADNÍ MATERIÁL OCEL 16220	50
8.2	CEMENTOVANÁ OCEL 16220.....	51
9	OCEL 14260	53
9.1	ZÁKLADNÍ MATERIÁL OCEL 14260	53
10	OCEL 12060	54
10.1	POVRCHOVĚ KALENÁ OCEL 12060	55
11	DISKUZE VÝSLEDKŮ	56
11.1	VÝHODNOCENÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HRA	56
11.2	VÝHODNOCENÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HRC	57
11.3	VÝHODNOCENÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HR15N.....	57
11.4	VÝHODNOCENÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HR30N.....	58
11.5	VÝHODNOCENÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HR45N.....	59
12	ZÁVĚR.....	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	61
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	63
	SEZNAM TABULEK	65

ÚVOD

Zkoušky tvrdosti v dnešní době patří mezi nejrozšířenější zkoušky materiálů v technické praxi. Výhodou těchto zkoušek je rychlé a levné provedení a to i na hotových výrobcích. S jejich pomocí získáváme 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 vyvozujeme další vlastnosti materiálu jako např. pevnost v tahu, obrobitelnost atd. Člověk je schopen svými smysly rozlišit měkké látky 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.

Hlavní cílem bakalářské práce je porovnat tvrdosti různých kovových vzorků vybranými druhy zkoušek. V teoretické části se zaměřím na jednotlivé metody měření tvrdosti kovů, jejich rozdělení a využití. Seznámení s geometrií testovacích tělísek a jejich následný otisk, 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 porovnáám, které zpracování je z hlediska tvrdosti nejvhodnější.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Zkoušky tvrdosti patří mezi nejstarší zkoušky kovů a jiných technických materiálů. Ve srovnání s ostatními mechanickými zkouškami jsou rychlé a jednoduché. Jedná se prakticky o zkoušky nedestruktivní, protože funkční a vzhledové porušení zkoušených dílů je většinou bezvýznamné a to je velkou výhodou pro hotové výrobky, které nepoškodíme. Proto patří zkoušky tvrdosti mezi provozně i laboratorně nejvíce používané mechanické zkoušky. [5]

1.1 ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK TVRDOSTI

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

Tab. 1. Rozdělení zkoušek tvrdosti [1]

2 ZKOUŠKY TVRDOSTI VNIKACÍ

Tyto zkoušky jsou nejrozšířenější a nejvýznamnější. Vtisk se vytváří pozvolným vtlačováním příslušného vnikacího tělesa plynule se zvětšující se silou. Všeobecného rozšíření dosáhly statické vnikací metody, u kterých je měřítkem tvrdosti velikost plastické deformace nebo metody, u kterých je měřítkem tvrdosti velikost elasticko-plastické deformace. [10]

Odolnost proti vnikání cizího tělesa je dána velikostí sil, kterými jsou atomy kovu navzájem vázány. Při vazbě kovové, umožňující plastickou deformaci, vznikají deformace tím snáze, čím jsou síly vyrovnanější.

Rozhodujícími činiteli jsou hlavně:

- a) Tvar krystalových elementů
- b) Jemnost krystalizace – jemnozrná struktura má v objemu více krystalografických rozhraní, které více odolávají vnikání cizích těles a z toho důvodu vykazuje jemnozrná struktura větší tvrdost
- c) Teplota – čím větší teplota, tím se vlivem roztahování stávají vazby méně pevné a kov je měkčí. Teplotu je nutno uvažovat relativně s ohledem na bod tání (kovy s nízkým bodem tání jsou při stejné krystalizaci za normální teploty měkčí než kovy tající při vysoké teplotě)
- d) Cizí příměsi – všechny příměsi snižují plasticitu kovu, a tím zvětšují jeho tvrdost
- e) Vnitřní pnutí – tvrdost zvětšují různá pnutí, způsobená např. tvářením za studena, tepelná pnutí od ochlazování, pnutí způsobena nestabilními fázemi atd. [10]

2.1 ROCKWELLOVA ZKOUŠKA

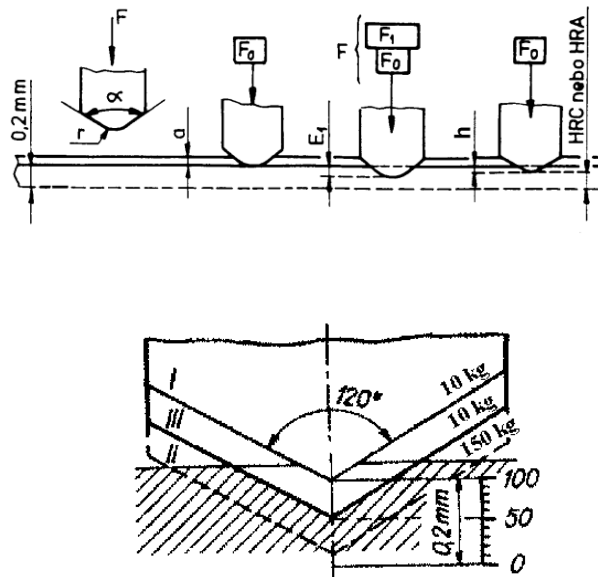
Autorem této metody je S. P. Rockwel a poprvé byla použita v roce 1922. Na rozdíl od metody Brinella a Vickerse se tvrdost Rockwela vyjadřuje hloubkou trvalého vtisku. Tato metoda je velmi rychlá a praktická, jelikož tvrdost vzorku odečteme přímo na tvrdoměru a tudíž není potřeba měřit velikost vtisku, provádět výpočty nebo vyhledávat hodnoty tvrdosti v tabulkách jako u metod Brinella a Vickerse. Proto je tato metoda nejčastěji používána v provozu. [10]

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 $0,002mm$. [11]

2.1.1 Princip zkoušky

Metoda je vypracována pro sériové kontrolní zkoušky kalených, zušlechťovaných nebo jinak tepelně zpracovaných ocelí. Tato zkouška tvrdosti nevyžaduje upravený povrch, neboť hloubka vtisku se měří tak, že při zatížení $98N$ se ustaví hloubkoměr na nulu, zatíží se hlavní silou viz (Tab. 2.). Po odlehčení na hodnotu původní $98N$ se odečte hloubka vtisku. Kdyby se odečítalo při plném zatížení, jevila by se tvrdost značně menší nejen o pružné deformace vtisku, ale také o veškeré pružné deformace stojanu stroje, podložku apod.

Celková měřitelná hloubka při použití kuželového indentoru je $0,2mm$. Tato hloubka je rozdělena na 100 dílků. Tvrdost materiálu je rovna tvrdosti diamantu v případě, že se hrot po odlehčení na $98N$ vrátí do původní, nulové polohy. [7]



Obr. 1 Princip zkoušky tvrdosti podle Rockwella [9]

α	vrcholový úhel $\alpha = 120^\circ$
F_0	předběžné zatížení [N]
F_1	přidané zatížení [N]
F	celkové zatížení [N] $F_0 + F_1 = F$
h	hloubka vtisku [mm]
r	poloměr zaoblení na vrcholu $r = 0,2\text{mm}$ dle EN 10109-2

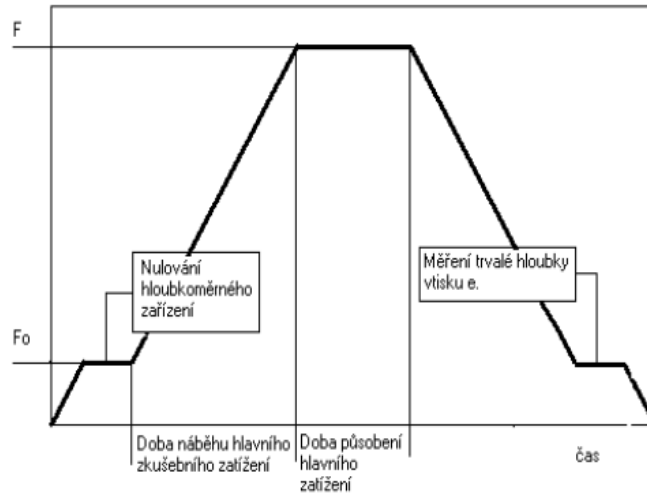
Nejměkčí kov, který jde touto metodou zkoušet, odpovídá pevnosti v tahu 80MPa . Metodu HRC lze dle naší normy použít od minimální tvrdosti HRC 20. Doporučuje se ji však použít od HRC 30, neboť při menších tvrdostech jsou naměřené tvrdosti málo přesné.

Pro měkčí materiály je nutno použít na místo diamantového kužele ocelovou kuličku s menším zatížením. U nejtvrděších materiálů např. slinutých karbidů, je bezpečí, že při zatížení 1471N dojde k poškození diamantového indentoru. Z toho důvodu se u nejtvrděších materiálů používá zatížení pouze 588N (HRA). [7]

2.1.2 Provedení zkoušky

- Vzorek musí být při zkoušce umístěn na tuhé podložce. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělisek. Je důležité, aby vzorek ležel na podložce tak, aby při zkoušce nedošlo k pohnutí.
- Zkouška se provádí nejčastěji při teplotě 10 až 35°C .
- Vnikací těleso se vtlačuje do povrchu vzorku zatížením směřujícím kolmo na jeho povrch, bez rázů a chvění až na hodnotu předzatížení. Po dosažení předzatížení se nuluje měřicí zařízení hloubky vtisku.
- Doba náběhu hlavního zatížení je v rozmezí 2 až 8s .
- Doba působení hlavního zatížení je:
 - 1 až 3s u materiálů, které nevykazují závislost na plastické deformaci na čase
 - 1 až 5s u materiálů, které vykazují omezenou závislost plastické deformace na čase

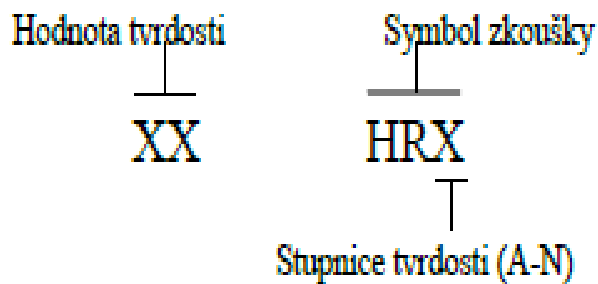
- 10 až 15s u materiálů, které vykazují silnou závislost na plastické deformaci na čase



Obr. 2. Průběh zkušebního zatížení- metoda Rockwell [8]

- Vzdálenost mezi středy dvou soudních vtisků musí být alespoň 4 násobek průměru vtisku, ale nejméně 2mm. Vzdálenost středu vtisku od kraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku.
- Vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být minimálně 2,5 násobkem průměru vtisku. [8]

2.1.3 Zápis hodnoty tvrdosti



Obr. 3. Označení zkoušky- metoda Rockwell [8]

Tvrdość podle Rockwella se vyjadřuje čísly určující hodnotu tvrdosti a písmeny HR s uvedením stupnice tvrdosti (Obr. 3.). [8]

Příklad: 59 HRC, 70 HR30 N

2.1.4 Vnikací tělesa a zkušební síly

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Vnikací těleso	Předzatížení Fo [N]	Celkové zatížení F [N]	Oblast použití
A	HRA	Diamantový kužel	98,07 (10 kg)	588,4 (60 kg)	20 až 88 HRA
B	HRB	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")		980,7 (100 kg)	20 až 100 HRB
C	HRC	Diamantový kužel		1471 (150 kg)	20 až 70 HRC
D	HRD	Diamantový kužel		980,7 (100 kg)	40 až 70 HRD
E	HRE	Ocelová kulička 3,175 mm (1/8")		980,7 (100 kg)	70 až 100 HRE
F	HRF	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")		588,4 (60 kg)	60 až 100 HRF
G	HRG	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")		1471 (150 kg)	30 až 94 HRG
H	HRH	Ocelová kulička 3,175 mm (1/8")		588,4 (60 kg)	80 až 100 HRH
K	HRK	Ocelová kulička 3,175 mm (1/8")		1471 (150 kg)	40 až 100 HRK
15 N	HR 15 N	Diamantový kužel		29,42 (3 kg)	147,1
30 N	HR 30 N	Diamantový kužel	294,2		42 až 86 HR 30 N
45 N	HR 45 N	Diamantový kužel	441,3		20 až 77 HR 45 N
15 T	HR 15 T	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")	147,1		67 až 93 HR 15 T
30 T	HR 30 T	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")	294,2		29 až 82 HR 30 T
45 T	HR 45 T	Ocelová kulička 1,5875 mm (1/16")	441,3		1 až 72 HR 45 T

Tab. 2. Vnikací tělesa a zkušební síly pro různé metody Rockwella [8]

2.1.5 Zkušební vzorky

- Zkouška se provádí na povrchu, který je hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména zcela bez mazadel (s výjimkou titanu, kde mazadlo může být použito, ale tato skutečnost musí být uvedena v protokolu).
- Příprava povrchu zkušební tělesa se provádí tak, aby byla co nejvíce omezena změna jeho vlastností vyvolaná např: ohřevem nebo tvářením při řezání, broušením a leštěním vzorku.

- Tloušťka vzorku musí být nejméně 10 násobkem hodnoty e (trvalá hloubka vtisku). Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být patrné stopy deformace způsobené vnikacím tělesem.
- Při zkouškách na vypuklých površích (válcové, kulové) se používá opravných součinitelů. Součinitelé jsou uvedeni v příloze normy.
- V případě, že nejsou k dispozici opravné součinitele pro kulové a vyduté válcové plochy, musí být zkoušky na těchto plochách předmětem zvláštní dohody.
- *Mimořádnou pozornost je třeba věnovat zkoušce na zaobleném povrchu. Vypuklá strana musí být obrácena ke vnitřnímu tělesu. Jestliže je k vnikacímu tělesu obrácen vydutý povrch, může dojít k chybám v důsledku zploštění v podložce. [8]*

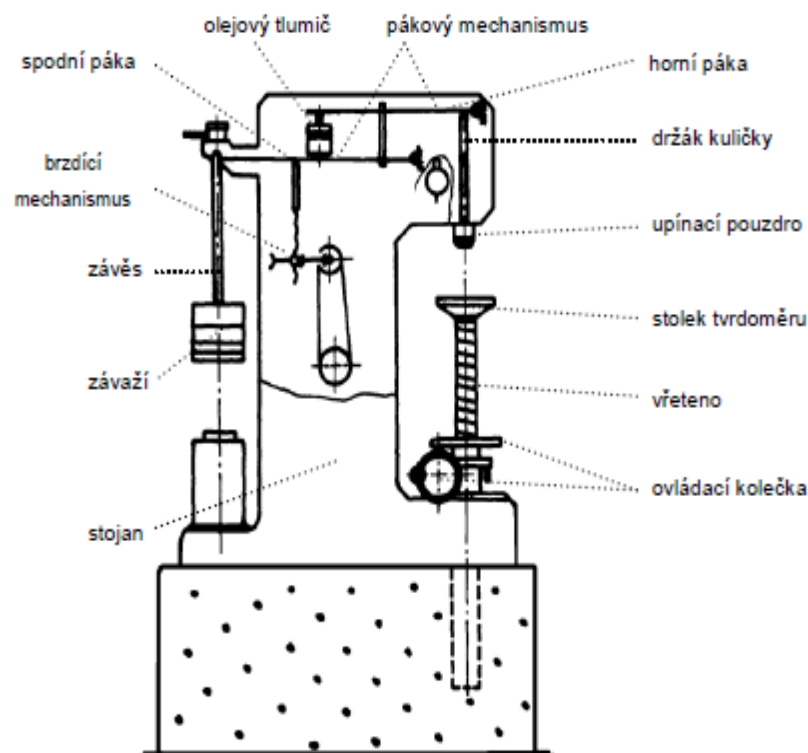
2.1.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Rockwell

- a) Chyby způsobené odchylkou zatěžovací síly:
- Chyba předběžného zatížení o velikosti + 2% vyvolá v závislosti na tvrdosti zkoušeného vzorku chybu hodnoty tvrdosti v rozmezí + 0,1 až +0,3%.
 - Chyba celkového zatížení o velikosti – 1% vyvolá v závislosti na tvrdosti zkoušeného vzorku chybu hodnoty tvrdosti v rozmezí + 0,25 až + 0,6% u stupnice HRC, + 0,45 až 1,2% u stupnice HRB je velikost odchylky nepřímo úměrná tvrdosti zkoušeného vzorku.
- b) Odchylky vrcholového úhlu kužele a odchylka průměru kuličky:
- Odchylka pro vrcholový úhel diamantového hrotu + 0,5° způsobí chybu v naměřené hodnotě tvrdosti v rozmezí + 0,2 až + 0,8%.
 - Odchylka pro průměr kuličky 1/16“ o velikosti + 10 μ m způsobí odchylku v rozmezí + 0,2 až + 0,5%.
- c) Chyby způsobené nedodržením předepsaných zkušebních podmínek:
- Rozdílné rychlosti přisunu vnikacího tělesa.
 - Rozdílná rychlost vnikání.
 - Rozdílné doby působení zatěžující síly.
 - Oduhličení povrchové vrstvy v důsledku nežádoucího ohřevu povrchové vrstvy během přípravy vzorku.
 - Nedostatečná úprava povrchu v místě zkoušky (*drsnot*).
 - Vibrace a ráze během zkoušky.
 - Nedodržení předepsaných vzdáleností mezi jednotlivými vtisky nebo mezi vtiskem a okrajem zkušební vzorku. [8]

2.2 BRINELLOVA ZKOUŠKA

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. Dnes je všech průmyslových státech normovaná (ČSN 42 0371). [5]

2.2.1 Měřicí zařízení



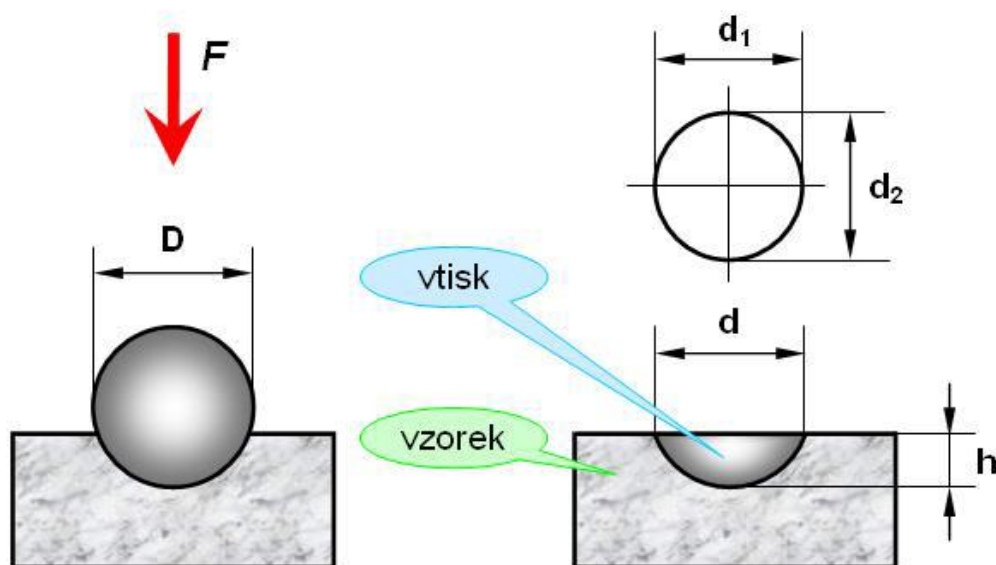
Obr. 4. Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Brinella [5]

„Tvrdoměr má masivní stojan ve tvaru písmene C. Zatěžovací sílu vyvozuje pákový mechanismus. Horní páka s olejovým tlumičem je spojena prostřednictvím bříty 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 (Obr. 4.)“ [5]

2.2.2 Princip zkoušky

Zkouška spočívá v zatlačování určitou silou vnikací tělísko (ocelové kuličky nebo kuličky z tvrdokovu o průměru D) do povrchu vzorku. Tvrdost se vyjadřuje poměrem zatížení k ploše kulovitého vtisku. Ocelová kulička se používá pro materiály s tvrdostí podle Brinella ne vyšší než 450 HB. Kulička z tvrdokovu se používá pro materiály s tvrdostí podle Brinella ne vyšší než 650 HB. Hodnoty tvrdosti získané použitím ocelové kuličky a kuličky z tvrdokovu se podstatně liší při tvrdostech nad 350 HB (Obr. 5.). [2]



Obr. 5. Schéma Brinellovi zkoušky [10]

2.2.3 Vztahy pro výpočet tvrdosti

- Tvrdost podle Brinella HBS, nebo HBW je dána vztahem:

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

d aritmetický průměr vtisku [mm] $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

D průměr kuličky [mm]

F působící síla [N]

Koeficient 0,102 $0,102 = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,80665}$

- Mezi tvrdostí HB a pevností v tahu je pro některé materiály (zejména oceli) přímá závislost, daná vztahem: [7]

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

- Modifikovaná metoda měření tvrdosti HBT:

Princip spočívá ve vyhodnocení tvrdosti hloubky vtisku.

$$HBT = \frac{F \cdot 0,102}{\pi \cdot D \cdot h} + k_1 + k_2$$

HBT tvrdost podle Brinella určená z hloubky

d aritmetický průměr vtisku [mm] $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

F působící síla [N]

h hloubka vtisku [mm] $h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$

k_1 korekční konstanta tvrdoměru

k_2 korekční konstanta materiálu

F působící síla [N]

D průměr kuličky [mm]

Uvedená metoda se obvykle používá v případě nutnosti automatizace měřícího procesu např. na lince pro zušlechťení materiálu apod. Odchyšky tvrdosti zjištěné měřením z hloubky vtisku (HB – HBT) jsou korigovány konstantami k_1 a k_2 . Velikost odchylek se pohybuje při měření měkkých materiálu cca 3 – 4%, u středně tvrdých 1% a u tvrdých materiálů dosahuje 3,5% naměřené hodnoty tvrdosti. [7,8]

2.2.4 Provedení zkoušky

- Zkouška se obvykle provádí při teplotě 10 až 35°C, v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Při zkoušce musí být použito zkušební zatížení odpovídající zkušného materiálu a velikosti kuličky.
- Zkušební 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 do dosažení zkušební síly nesmí být menší než 2s a delší než 8s.
- Doba působení zkušební síly je v rozmezí 10 až 15s. Pro některé materiály mohou být použity delší časy, ty však musí být dodržovány s tolerancí $\pm 2s$ (Obr. 6.).



Obr. 6. Průběh zkušebního zatížení- metoda Brinell [8]

- Vzdálenost středu vtisku od kraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek vtisku (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a minimálně 3 násobek vtisku při zkoušce lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin (Tab. 3.).

- Vzdálenost středů dvou sousedních vtisků musí být nejméně 4 násobek průměru v tisku (platí pro ocel, litinu, měď a jejich slitiny) a minimálně 6 násobek průměru vtisku při zkoušce lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin.
- Po zkoušce se změří průměr každého vtisku ve dvou na sebe kolmých směrech. Pro stanovení tvrdosti se bere průměrná hodnota velikosti vtisku. [8]

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 $5 \cdot d$

Tab. 3. Umístění vtisku při zkoušce tvrdosti podle Brinella [10]

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 stanovení 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. [8]

2.2.5 Vnikací tělesa a zkušební síly

Pro zkoušky tvrdosti podle Brinella se používají ocelové nebo tvrdokovové kuličky průměrů v (*mm*), zkušební síly uvedené v následující tabulce. Pro úplnost jsou uvedeny také síly v původních, dnes neplatných jednotkách *kp* (kilopondy) (Tab. 4.).

Kilopond je definován jako síla, vyvolaná závažím o hmotnosti 1kg v gravitačním poli s tíhovým zrychlením $9,80665\text{m/s}^2$. Jeden kilopond je z definice roven $9,80665\text{N}$. [7]

Průměr kuličky v mm		10	5	2,5	2	1
Zkušební síla		Poměr $0,102 F / D^2$				
N	(kp)					
29 400	3 000	30				
14 710	1 500	15				
9 807	1 000	10				
7 355	750		30			
4 903	500	5				
2 452	250	2,5	10			
1 839	187,5			30		
1 226	125	1,25	5			
1 177	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	
24,52	2,5					2,5
12,26	1,25					1,25
9,807	1					1

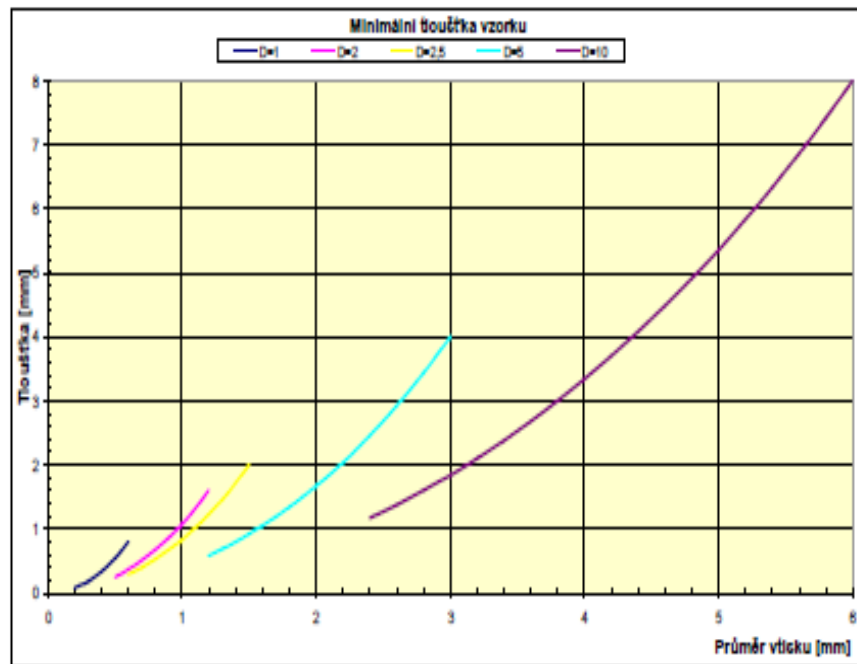
Tab. 4. Vztah průměru kuličky a zatěžující síly u metody Brinell [8]

Materiál	Tvrdość HB	Poměr $0,102F / D^2$
Ocel	do 650	30
Litina ¹	< 140 HB	10
¹ Při zkouškách litiny musí být průměr kuličky 2,5 mm, 5 mm, nebo 10 mm.	≥ 140 HB	30
Měď a slitiny mědi	< 35	5
	35 až 200	10
	> 200	300
Lehké kovy a jejich slitiny	< 35	1,25 nebo 2,5
	35 až 80	5, 10, nebo 15
	> 80	10 nebo 15
Olovo, cín		1 nebo 1,25
Spékané kovy		viz ISO 4498 - 1

Tab. 5. Volba poloměru $0,102F/D^2$ pro různé materiály [8]

2.2.6 Zkušební vzorky

- Zkouška se provádí na povrchu, který je hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména úplně bez mazadel.
- Povrch vzorku musí být co nejméně ovlivněn ohřevem nebo tvářením.
- Tloušťka vzorku musí být nejméně osminásobek hloubky vtisku h . Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být patrné stopy deformace od vnikacího tělesa.

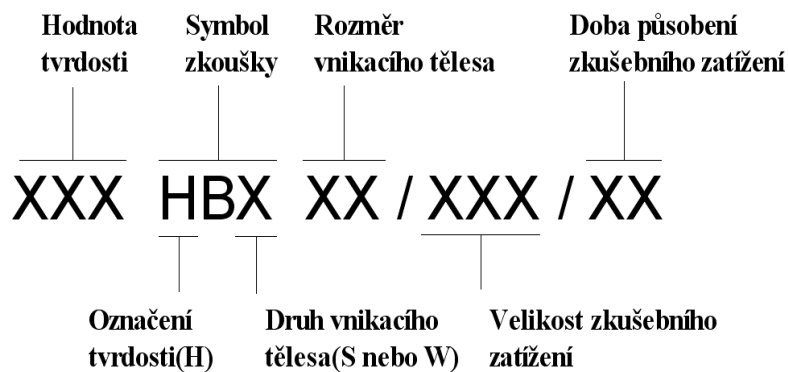


Tab. 6. Minimální tloušťka vzorku u metody Brinell [8]

2.2.7 Zápis hodnoty tvrdosti

Výsledek měření tvrdosti obsahuje číslo tvrdosti, symboly HBS nebo HBW a dále podmínky zkoušky v pořadí:

- průměr kuličky D [mm]
- velikost zkušebního zatížení F [N]
- Doba působení zkušebního zatížení v sekundách, liší-li se od doby stanovené touto normou. [8]



Obr. 7. Označení zkoušky- metoda Brinell [4]

Př. 1: 350 HBS 5/750 – tvrdost podle Brinella 350 stanovená ocelovou kuličkou o průměru 5mm při zkušebním zatížení 7,355kN působícím podobu od 10s do 15s.

Př. 2: 600 HBW 1/30/20 – tvrdost podle Brinella 600 stanovená kuličkou z tvrdokovu o průměru 1mm při zkušebním zatížení $294,2\text{N}$ působícím po dobu 20s . [4]

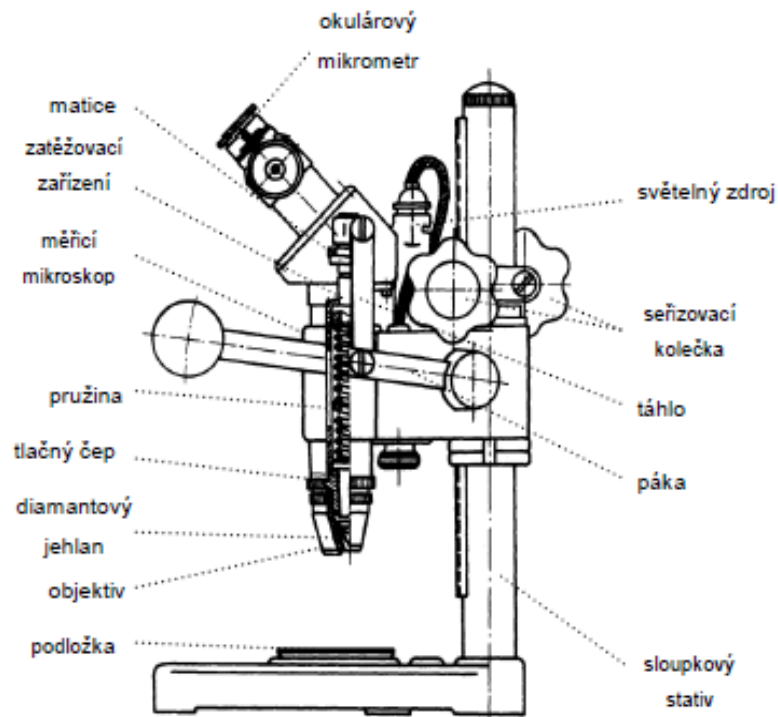
2.2.8 Přesnost výsledků zkoušky

Přesnost výsledků zkoušky závisí ve velké míře na správném proměření vtisku. Po odlehčení kuličky a jejím oddálení z místa vtisku se měří průměr vtisku d , který se určuje u kuliček průměru $D = 10\text{mm}$ a 5mm s přesností $0,05\text{mm}$, u kuliček zbylých průměrů je to $0,01\text{mm}$. Otisk kuličky bývá nezřetelný a nesouměrný v případě, že jsou krystaly velké, struktura usměrněná po mechanickém zpracování, nebo je-li mezi krystaly vyloučena cizí látka o značně odlišné tvrdosti (grafit v litině). [3]

2.3 VICKERSOVA ZKOUŠKA

Tato zkouška byla poprvé popsána v Anglii v roce 1922 R. L. Smithem a G. E. Sandlandem. Název této metody je odvozen podle prvního tvrdoměru tohoto typu, který byl zkonstruován ve firmě Vickers. Metoda je používána hlavně v laboratořích, protože je velmi přesná a citlivá. [10]

2.3.1 Měřicí zařízení



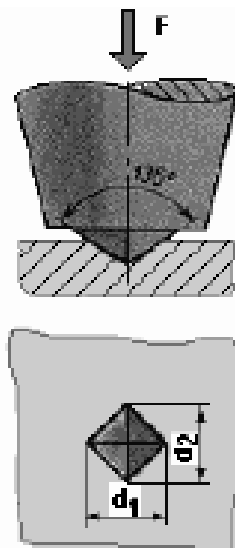
Obr. 8. Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Vickerse [10]

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 (Obr. 8.). [7,8,9]

2.3.2 Princip zkoušky

Vickersova metoda je principiálně stejná jako Brinellova, odlišuje se pouze tím, že vnikacím tělesem je diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Do zkušebního tělesa je vtlačován zatížením působící v kolmém směru stanovenou dobu.

Po odlehčení se změří úhlopříčka vtisku. Tvrdost podle Vickerse je stanovena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku (Obr. 9.). [10]



Obr. 9. Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse [7]

2.3.3 Vztahy pro výpočet tvrdosti

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

HV tvrdost podle Vickerse

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

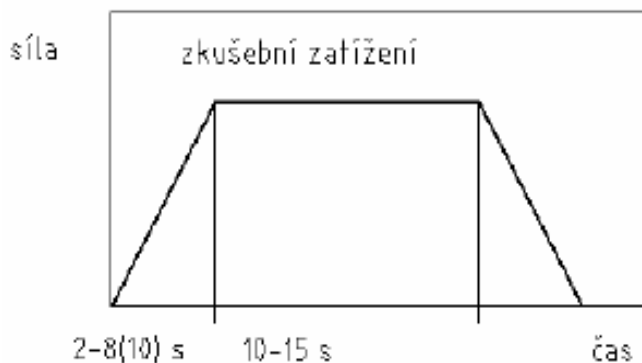
F zkušební zatížení [N]

d úhlopříčka vtisku [mm] $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

Koeficient 0,102 $0,102 = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,80665}$ [2]

2.3.4 Provedení zkoušky

- Zkouška se provádí obvykle při teplotě 10 až 35° v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ$.
- 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 začátku zatěžování do dosažení zkušební síly nesmí být menší než 2s a delší než 8s. Při zkouškách tvrdosti při nízkém zatížení nesmí překročit 10s.
- Doba působení zkušební síly je v rozmezí 10 až 15s. Pro některé případy materiály být použity delší časy, ty však musí být dodržovány s tolerancí $\pm 2s$ (Obr. 10.).



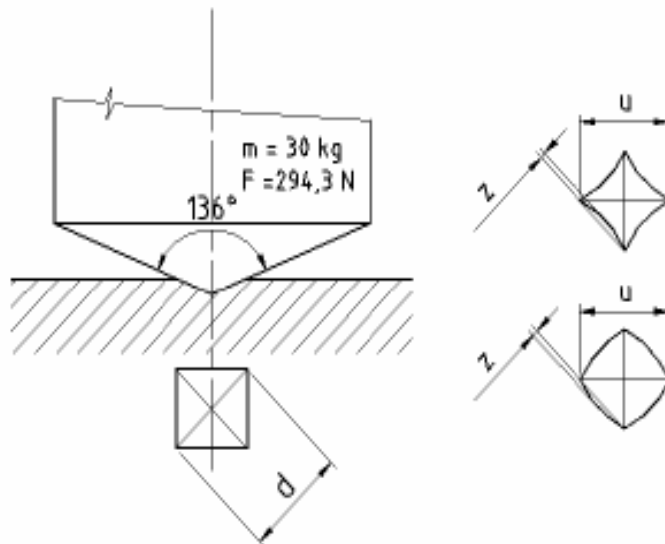
Obr. 10. Průběh zkušebního zatížení [5]

- Vzdálenost středu vtisku od okraje vorku 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 a více než o 5% střední hodnoty. [8]

2.3.5 Vnikací tělesa a zkušební síly

Vnikací těleso je shodné pro všechny metody Vickers. Tvoří ho diamant ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou (pyramida). Vrcholový úhel $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Vickersova zkouška je ze všech dosavadních zkoušek metod jediná, která splňuje všechny teoretické požadavky. Dává jednotnou stupnici tvrdosti od nejměkčích kovů až po nejtvrďší kalené ocele. Hodnoty tvrdosti jsou na velikosti zatížení prakticky nezávislá.

Následkem rozdílného zpevnění při hranách jehlanu a uprostřed ploch nemusí být průměr vtisku přesně čtvercový, nýbrž strany mohou být buď vyduté u měkkých materiálů A, nebo naopak vypouklé u zpevněných materiálů B viz (Obr. 11.). [7,8]



Obr. 11. Schéma zkoušky dle Vickerse - deformace vtisku [7]

Při zkoušce musí být použito některého následujícího zkušebního zatížení:

Zkouška tvrdosti ¹⁾		Zkouška tvrdosti při malém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti ²⁾	
Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení [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 0,02	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
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

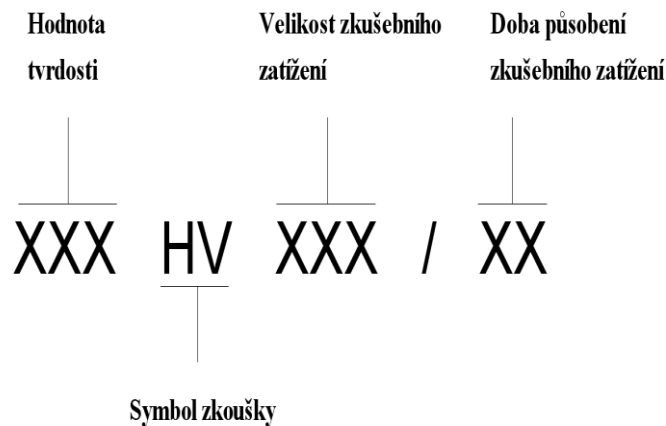
Tab. 7. Zkušební zatížení pro zkoušku dle Vickerse [8]

2.3.6 Zkušební vzorky

- Zkouška se provádí na povrchu, který je hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména zcela bez mazadel. Konečná úprava povrchu musí umožnit přesné stanovení rozměrů úhlopříček vtisku.
- Příprava povrchu zkušebního tělesa se provádí tak, aby byla co nejvíce omezena změna jeho vlastností vyvolaná např. ohřevem nebo tvářením při řezání, broušení a leštění vzorku.
- Tloušťka vzorku musí být nejméně 1,5 násobek délky úhlopříčky. Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být patrné stopy deformace způsobené vnikacím tělesem.
- Při zkouškách na zakřivených površích (válcové, kulové) se používá opravných součinitelů. Součinitele jsou uvedeny v příloze normy ČSN EU 6507-2. [2,10]

2.3.7 Zápis hodnoty tvrdosti

Výsledek měření tvrdosti obsahuje číslo tvrdosti a symbol HV s číslem odpovídajícím použitému zkušebnímu zatížení.



Obr. 12. Označení zkoušky- metoda Vickers [4]

Př. 1. 640 HV 30 – tvrdost podle Vickerse 640 stanovená při zkušebním zatížení 294,2N působícím po dobu od 10s do 15s.

Př. 2. 640 HV 30/20 - tvrdost podle Vickerse 640 stanovená při zkušebním zatížení 294,2N působícím po dobu 20s. [4]

2.3.8 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Vickers

Při měření tvrdosti je výsledek ovlivněn chybami, které jsou způsobeny jak vlastnostmi zkoušené látky, tak zkoušecím zařízením. Je-li struktura zkoušeného materiálu příliš hrubá a síla, kterou je jehlan do materiálu vtlačován malá, může nastat případ, že vtisk se bude rozprostírat pouze na jedné strukturní součásti a výsledná tvrdost nebude odpovídat celkové tvrdosti. Proto se tato zkouška nehodí pro měření hrubých a nesterodných struktur jako je litina. Jako u zkoušky podle Brinella se objevují rozdílné vtisky u materiálů nezpevněných a zpevněných. Pokusy bylo zjištěno (Fisher), že v závislosti na stupni zpevnění zkoušeného materiálu se mění hodnoty tvrdosti se zvyšujícím zatížením v kladném nebo záporném směru. [3]

2.4 LUDWIKOVA ZKOUŠKA

Přes rychlé rozšíření Brinellovy zkoušky byla pocíťována její velká nevýhoda v tom, že tvrdost je závislá na velikosti zatížení. (V roce 1885 vyslovil Kick známý zákon o úměrnosti přetvárné práce a příslušného deformovaného objemu.

Tento zákon pro Brinellovu zkoušku neplatí, neboť poměry napjatosti se při změně zatížení mění složitějším způsobem). Tento nedostatek odstranil *Ludvik* v roce 1907 náhradou kuželky kuželem, kde zůstává při všech zatíženích poměr tangenciálního a normálového napětí stejný a hodnota tvrdosti je na zatížení nezávislá.

Ludvik použil kužele z kalené ocele s vrcholovým úhlem 120, 90 a 60° z praktických se zaoblenými vrcholy s poloměrem 0,2mm. Williams zkoušel na mědi zpevnění materiálu v okolí vtisku v souvislosti s vrcholovým úhlem. Při 120° je měď nejvíce zpevněna při dně vtisku a ke kraji její tvrdost zcela rovnoměrně ubývá. Při 90° je tvrdost rozdělena rovnoměrněji, s tím, že ve dně je podstatně menší a okraj je naopak více zpevněn, než v předěšlém případě. Při 60° tento trend pokračuje, dno je minimálně zpevněno, zatímco deformace v okolí vtisku jsou do značné vzdálenosti výrazné.

Tato metoda se i přes svoje nesporné výhody neujala. Měla však velký vliv na rozvoj dalších metod zjišťování tvrdosti. Přestože tato metoda ukázala nevýhody Brinellovy zkoušky, používá se Brinellova metoda do dnes, zatímco Ludwikova metoda se používá pouze ve speciálních případech. [7]

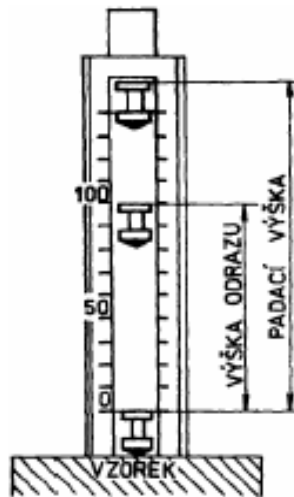
3 ZKOUŠKY DYNAMICKÉ

3.1 ZKOUŠKY ELASTICKÉ

3.1.1 Metoda odrazová (Shoreho skleroskop)

U původního Shoreho skleroskopu se pohybuje válcový čep ve skleněné trubce opatřené stupnicí, na které se odečte pomocí lupy dosažená výška odrazu tělesa. Nastavení počáteční výšky tělesa je možné buď vysátím vzduch nad tělesem pomocí gumového balónku, nebo u některých přístrojů pomocí pružiny (Obr. 13.).

Shoreho skleroskopy se používali především měření válců do válcových stolic a používali se ve 2 stupnicích – HSC a HSD. Pádové těleso je válcového tvaru a je ukončené diamantovým hrotem a poloměrem zaoblení 1 mm. [2,7,8]



Obr. 13. Schéma Shoreho skleroskopu [7]

Stupnice HSC:

h_1 padací výška $h_1 = 254\text{mm}$

Hmotnost pádového tělesa $2,5\text{g}$

$$HSC = \frac{10^4 \cdot h_2}{65 \cdot h_1}$$

h_1 padací výška [mm]

h_2 výška odrazu [mm]

Stupnice HSD:

h_1 padací výška $h_1 = 19\text{mm}$

Hmotnost pádového tělesa $36,2\text{g}$

$$HSD = \frac{140 \cdot h_2}{h_1}$$

h_1 padací výška [mm]

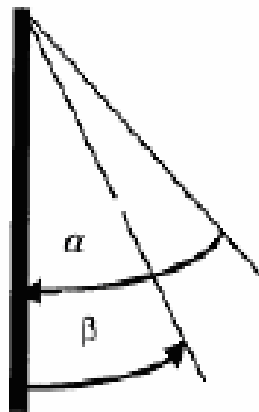
h_2 výška odskoku [mm] [7]

U moderních přístrojů pro dynamické zkoušky tvrdosti se používají tělíska o jiném tvaru i hmotnosti než u původní metody a k udělení počáteční energie se využívá energie pružiny nebo elektromagnetického pole. Vyhodnocení je prováděno výlučně elektronicky s možností přepočtu na jiné stupnice tvrdosti.

Přesnost měření závisí na mnoha faktorech, jako je hladkost povrchu, kolmost dopadu tělíska, hmotnosti zkoušeného předmětu a také především na modulu pružnosti zkoušeného materiálu, takže porovnávat lze výsledky měření jen materiálů s přibližně stejným modulem pružnosti. [8]

3.1.2 Metoda kyvadlová (Duroskop)

Postatou zkoušky je spuštění definovaného zkušební tělíska z úhlu α na svislou stěnu zkoušeného materiálu. Sleduje se úhel β , do něhož zkušební tělíska po dopadu odskočí. Někdy bývá měřítko odskoku kalibrováno přímo v jednotkách tvrdosti. Vzhledem k tomu, že zkouška je založena na elastické deformaci zkoušeného povrchu, nemohou být na tělese patrné viditelné stopy deformace (Obr. 14.). [7]



Obr. 14. Schéma Durokopu [7]

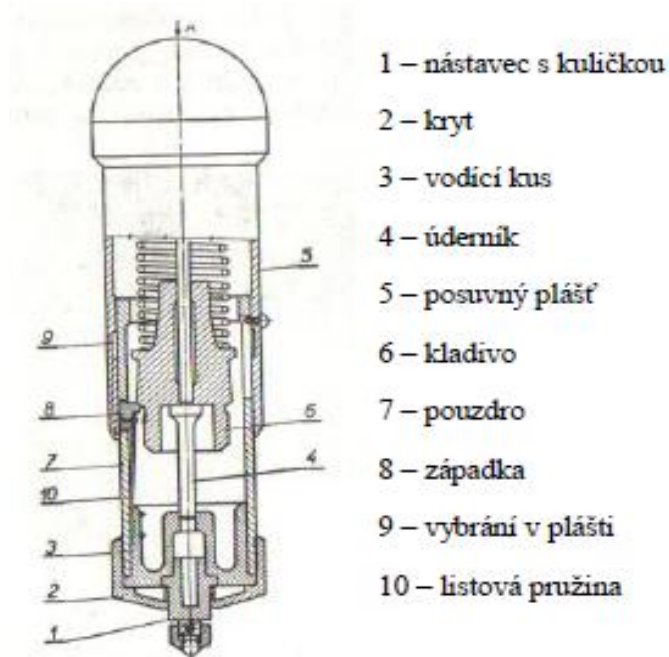
3.2 ZKOUŠKY PLASTICKÉ

3.2.1 Metoda stlačenou pružinou (Baumanovo kladívko)

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

Může pracovat s průměrem kuličky 5mm nebo 10mm. 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 pro-střední části 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. [1]

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 západka vychýlí pomocí vybrání v plášti, tak je kladivo pružinou vymrštěno a úderník přenesení ráz na nástavec s kuličkou. Vzniklý vtisk se změří pomocí lupy s měřítkem a z tabulek se stanoví tvrdost zkoušeného vzorku. [3]



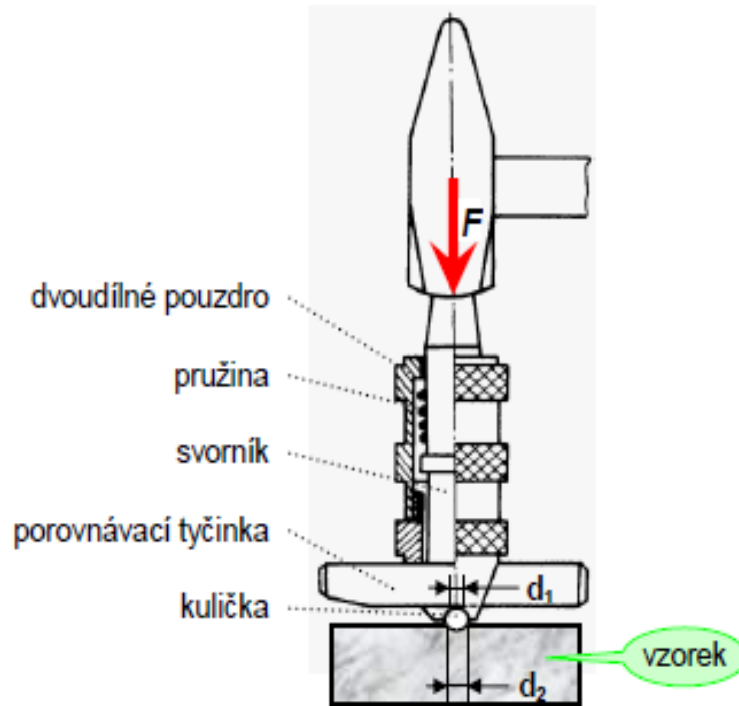
Obr. 15. Schéma Baumanova kladívka [3]

3.2.2 Metoda volným pádem

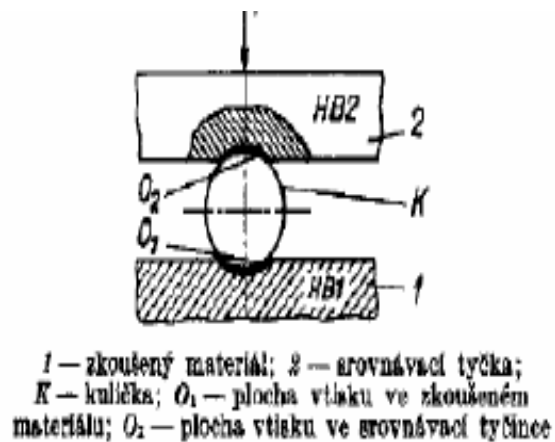
Do povrchu vzorku je vtlačována kulička silou, která je vyvozena pádem beranu z určité výšky. Tvrdost se vypočítá jako měrná deformační práce (podíl celkové spotřebované práce objemu vtisku). [1]

3.2.3 Metoda porovnávání (Kladívko 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 roce 1921. [7,8]



Obr. 16. Schéma kladívka Poldi [7]



Obr. 17. Zkouška tvrdosti Poldiho kladívkem [7]

Tvrdoměr se skládá z pouzdra a odpruženého pístu. Pouzdro je ukončeno držákem ocelové kuličky o průměru 10mm. Mezi kuličku a píst se vkládá porovnávací kalibrovaná tyčka čtvercového průřezu o hraně 11mm a tvrdosti cca 200 HBS.

Tyčinka je svorníkem a pružinou přitlačovaná ke kuličce. Při vlastní zkoušce se tvrdoměr přiloží ke zkoušenému materiálu tak, aby kulička dosedla na zkoušené místo a osa tvrdoměru byla kolmá k povrchu zkoušeného předmětu. Na horní část tvrdoměru se udeří ručním kladivem, ráz se přenesse na kuličku a ta vytvoří vtisky ve zkoušeném předmětu i v etalonu (sílu úderu není třeba měřit, jelikož poměr velikosti obou vtisků zůstává zachován nezávisle na působící síle). Po vyjmutí porovnávací tyčinky z přístroje se lupou s měřítkem stanoví průměr vtisku d_1 v etalonu i průměr vtisku d_2 ve zkoušeném materiálu. Tvrdost zkoušeného materiálu je potom stanovena z tabulek podle hodnot d_1 a d_2 . Tabulky platí pro porovnávací tyčinku z oceli o pevnosti $R_m = 686,5 \text{ MPa}$. Měření je ovšem zatíženo poměrně značnou chybou (až $\pm 10\%$) a na zjištěnou hodnotu je nutné hledět jen jako na hodnotu informativní (Obr. 16.).

Výsledná informace o hodnotě tvrdosti je zapisována následujícím způsobem: HB POLDI [7,8]

4 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.

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	

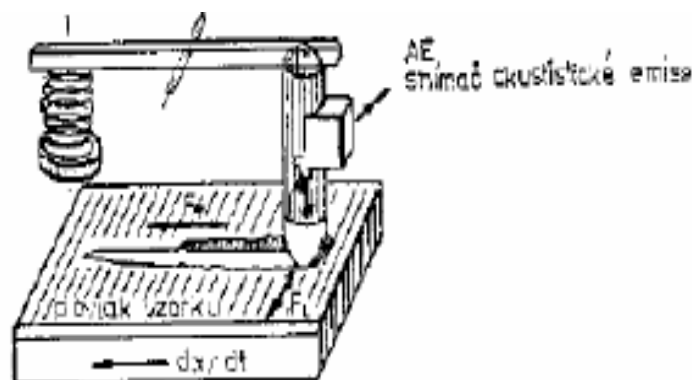
Tab. 8. Srovnání Mohsovy mineralogické stupnice a materiálů ve strojírenství [11]

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 Martens (Tab. 8.).

Po vyhlazené ploše zkoušeného kovu pojíždí diamantový kužel s vrcholovým úhlem 90° , který lze zatížit silou, až $19,8N$. Vytvořený vryp se měří pomocí optického mikroskopu. Číslem tvrdosti dle Martense je zatížení, které vytvoří vryp šířky $0,01mm$. 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*. [11]

V tomto případě je zatěžující síla proměnná. Na určité délce se vytvoří vryp a narůstající silou, např. od 0 do $1,96N$. 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 $0,2mm$. V tomto případě se pak určuje kritické zatížení L_c , které mělo za následek adhezivní odtržení vrstvy.



Obr. 18. Schematické znázornění vrypové zkoušky [11]

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

„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 adhezivním i kohezivním 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 adhezivní vlastnosti systému tenká vrstva-substrát.“ [11]

5 DALŠÍ METODY MĚŘENÍ TRDOSTI

5.1 KNOOPOVA ZKOUŠKA

V roce 1939 byla v americkém National Bureau of Standards vypracována nová metoda zkoušky tvrdosti, jež se od metody Vickersovy odlišuje tvarem indentoru. Metoda je určena pro měření velmi tenkých vrstev (např. nitridových vrstev), s poměrem úhlopříček asi 7,11:1. Hloubka vtisku je asi 1/30 délky dlouhé úhlopříčky.

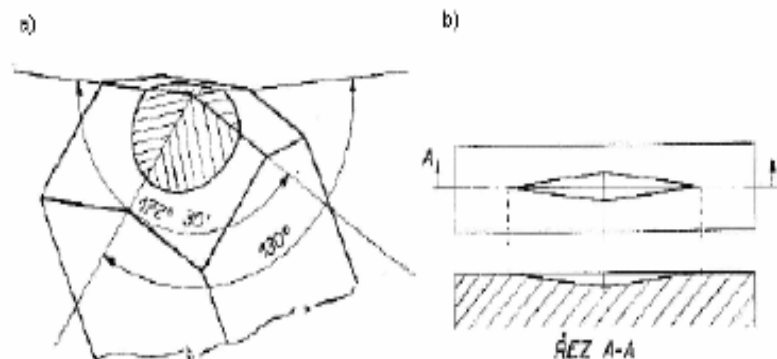
Metoda je založena na vlačování diamantového vnikacího tělesa ve tvaru čtyřbokého jehlanu s vrcholovými úhly 172,5° a 130° do zkoušeného materiálu definovanou silou.

Vtisk má tvar protáhlého kosočtverce a na rozdíl od metody Vickers se měří pouze delší úhlopříčka. [9]

Tvrdot podle Knoop je definována jako podíl zatěžovací síly a druhé mocniny delší úhlopříčky vtisku:

F působící síla [N]

l délka delší úhlopříčky [mm]



Obr. 19. Indentor podle Knoop [9]

a) Tvar diamantového jehlanu podle Knoop.

b) Vzhled vtisku Knoopova jehlanu.

Výhodou Knoopova indentoru je, že deformace jsou relativně největší u krátké úhlopříčky a v tomto směru je tedy největší odpružení při odlehčení. Ve směru dlouhé úhlopříčky je odpružení zanedbatelné. Další výhodou je možnost vtisky vytvořit tak, že lze s velkou přesností změřit tvrdost u úzkých součástí např. drátů (Obr. 19.).

Klade-li se delší úhlopříčka rovnoběžně s povrchem lze u cementovaných popř. nitridovaných povrchů zachytit podstatně citlivěji změny tvrdosti, než Vickersovým indentorem. S ohledem na malou hloubku průniku indentoru se tato metoda může s výhodou použít i u materiálů se slabou povrchovou vrstvou. [7]

Zatížení se volí od 1,96; 2,94; 4,9; 9,8N

Tvrdost dle Knoop se značí jako HK 0,2; HK 0,3; HK 0,5 nebo HK 1

Chyby vznikající u metody Knoop mají obdobné příčiny u metody Vickers, větší nároky jsou kladeny na ostrost hran vnikacího tělesa a úpravu zkoušeného povrchu. [8]

5.2 UNIVERZÁLNÍ TVRDOST

„Univerzální tvrdost byla v době svého vzniku označována za moderní metodu, která by měla nahradit stávající zkušební metody. Teprve budoucnost ukáže použitelnost této metody.“ [10]

5.2.1 Princip zkoušky

Diamantové vnikací těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a s daným vrcholovým úhlem (136°) mezi protilehlými stěnami je vtlačováno do povrchu vzorku. Zkušební síla je aplikována buď v režimu posuvu, nebo řízené síly. Zkušební síla F a hloubka vtisku h se průběžně měří ve fázi zatěžování i odlehčování. Univerzální tvrdost je definována jako podíl zkušební síly F a plochy vtisku $A(h)$ vypočítané z hloubky vtisku pod zatížením.

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

$$A(h) = \frac{4 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot h^2$$

F zkušební síla [N]

h hloubka vtisku [mm]

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

$A(h)$ plocha vtisku [mm²]

Univerzální tvrdost se vypočítává z odpovídajících párů zkušební síly F a hloubky vtisku, ale pouze při zvyšování síly.

Metoda univerzální tvrdost umožňuje dále vyhodnocovat zjištěné závislosti $F=f(h)$. Je možno vyhodnotit podíly elastické a plastické práce, plastickou tvrdost, elastický tvrdostní modul, creep, relaxaci a další. Metody popisují přílohy norem. [8]

5.2.2 Značení zkoušky

Univerzální tvrdost je označována symbolem HU, za kterým následují zkušební podmínky v pořadí:

- a) zatížení v N
- b) za lomítkem čas dosažení zkušební síly, je-li čas odlišný od v normě uvedeného rozsahu 3 až 10s
- c) za lomítkem počet kroků do dosažení maximální zkušební síly, není-li síla aplikována kontinuálně
- d) za rovnítkem hodnota tvrdosti

Příklad 1:

$HU\ 0,5 = 8700N/mm^2$ (univerzální tvrdost zjištěná při zkušební síle 0,5N aplikované kontinuálně v čase ve shodě s normou).

Příklad 2:

$HU\ 0,5/20/3 = 8700N/mm^2$ (univerzální tvrdost zjištěná při zkušební síle 0,5N aplikované v průběhu 20 s ve 3 krocích). [8]

5.3 ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI

5.3.1 Princip zkoušky mikrotvrdomosti

Název mikrotvrdomost se ustálil pro tvrdost určenou použitím zcela malých zatížení, tak aby vznikly vtisky nepatrné velikosti. Často se uvádí 19,8 N jako hranice mezi makro a mikrotvrdomostí. Zatímco při makrotvrdomosti se zjišťuje tvrdost kovu jako krystalického celku je možno při mikrotvrdomosti stanovit tvrdosti jednotlivých strukturních součástí kovu.

Mikrotvrdomost nelze určovat obvyklými tvrdoměry, neboť vyžaduje nesrovnatelně větší přesnost jak při zatěžování, tak i při proměřování vtisku.

Nejpřesnější je přímé zatěžování závažím nebo přesně cejchovanou pružinkou. K proměřování vtisku slouží přesná optika. [7]

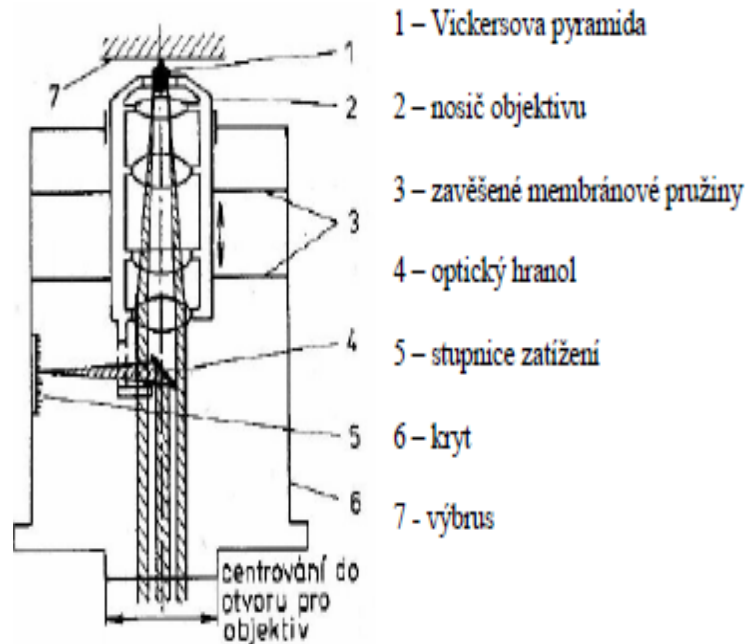
Pro zkoušky mikrotvrdosti jsou použitelné jedině vnikací metody s diamantovým indentorem. Prakticky přichází v úvahu pouze metoda Vickersova, Knoopova nebo Biekovičova. Jednou z nejpřesnějších konstrukcí je u nás používaný *Hanemannův* mikrotvrdoměr (1940). Vnikací tělísko – Vickersův jehlan – je usazen přímo do speciálního objektivu, který se vloží místo normálního objektivu do metalografického mikroskopu. Objektiv je zavěšen na pružných membránách, které dovolují pohyb ve směru optické osy. Prohnutí membránových pružin, kterému odpovídá zatížení působící na diamant, se měří na obrazu zatěžovací stupnice uvnitř objektivu. Po odlehčení a zaostření na strukturu se pomocí měřícího okuláru změří vytvořený vtisk (Obr. 20.). Odpovídající mikrotvrdost se vypočítá dle vztahu:

$$HV = 0,189 \frac{F}{u^2}$$

u průměrná hodnota úhlopříčky [mm]

F zátěžná síla [N]

Podle použitého zatížení se mikrotvrdost značí např. HV 0,05 (0,49N – 50g) [8]



Obr. 20. Schéma Hanemannova mikrotvrdoměru [7]

„Hodnoty mikrotvrdosti jsou vždy vyšší než makrotvrdosti. Je to způsobeno zmenšením vtisku po odlehčení o elastickou deformaci, jejíž podíl na celkové velikosti vtisku se zvětšuje s jeho klesající velikostí.“ [7]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

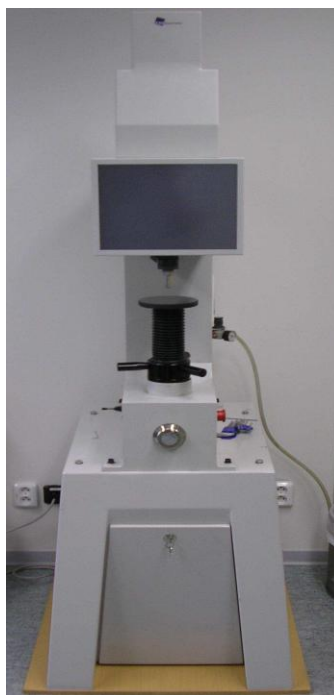
Bakalářská práce se zabývá měřením tvrdosti u vybraných konstrukčních ocelí metodou Rockwell. Pro experimentální část byly zvoleny oceli 12060, 13240, 14260 a 16220. Konstrukční oceli byly chemicko-tepelně zpracovány.

Cílem bakalářské práce bylo:

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Připravit zkušební tělesa pro zkoušku tvrdosti.
3. Provedení zkoušky tvrdosti.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.

6.1 ZVOLENÉ TYPY ZKOUŠEK

Z důvodu použití chemicko-tepelného zpracování na vybraných vzorcích, bylo nezbytné zvolit takový typ zkoušky, který přesně určí hodnotu tvrdosti zkušebních vzorků s ohledem na to, že chemicko-tepelným zpracováním byla ovlivněna jen velmi tenká povrchová vrstva zkušebního vzorku a proto byla zvolena zkouška podle Rockwella. U tohoto typu zkoušky není nutná úprava povrchu zkušebního vzorku, proto nedojde k ovlivnění struktury a vlastností modifikované vrstvy. Měření bylo prováděno na stroji Easydur Italiana (Obr. 21.) podle stanovených norem.



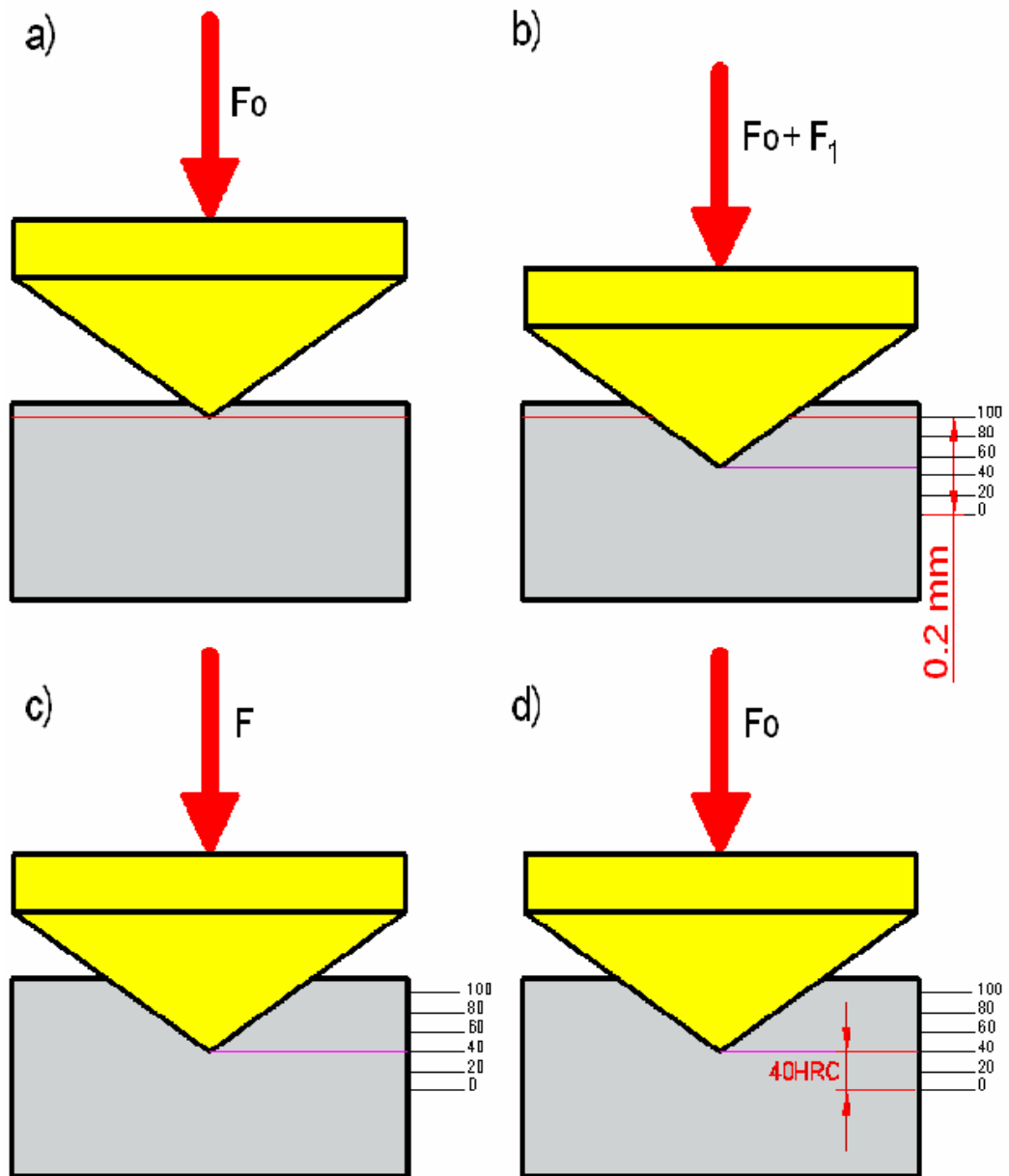
Obr. 21. Stroj Easydur Italiana

Poř. číslo	Název	Norma
1	Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Zkušební metoda A	ČSN EN ISO 6508-1
2	Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Zkušební metoda C	ČSN EN ISO 6508-1
3	Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Zkušební metoda 15N	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 45N	ČSN EN ISO 6508-1

Tab. 9. Použité normy při měření

6.2 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 (Obr. 22), která se měnila podle zadané 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 $0,2\text{mm}$. Výsledná tvrdost se stanovuje z trvalé hloubky, která je způsobena zatěžující silou. Tvrdost je rozdíl hloubky předzatěžující síly před působením přídavného zatížení a po ukončení působení přídavného zatížení.



Obr. 22. Schéma metody

- F_0 předzatěžující síla [N]
- F_1 přídavné zatížení [N]
- F zatěžující síla [N]

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Vnikací těleso	F_0 [N]	F_1 [N]	F [N]
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	588,41
C	HRC	Diamantový kužel	98,07	1373	1471
15N	HR15N	Diamantový kužel	29,42	117,7	147,1
30N	HR30N	Diamantový kužel	29,42	294,2	294,2
45N	HR45N	Diamantový kužel	29,42	441,3	441,3

Tab. 10. Vnikací tělesa a zkušební síly pro zadané metody podle Rockwella

7 OCEL 13240

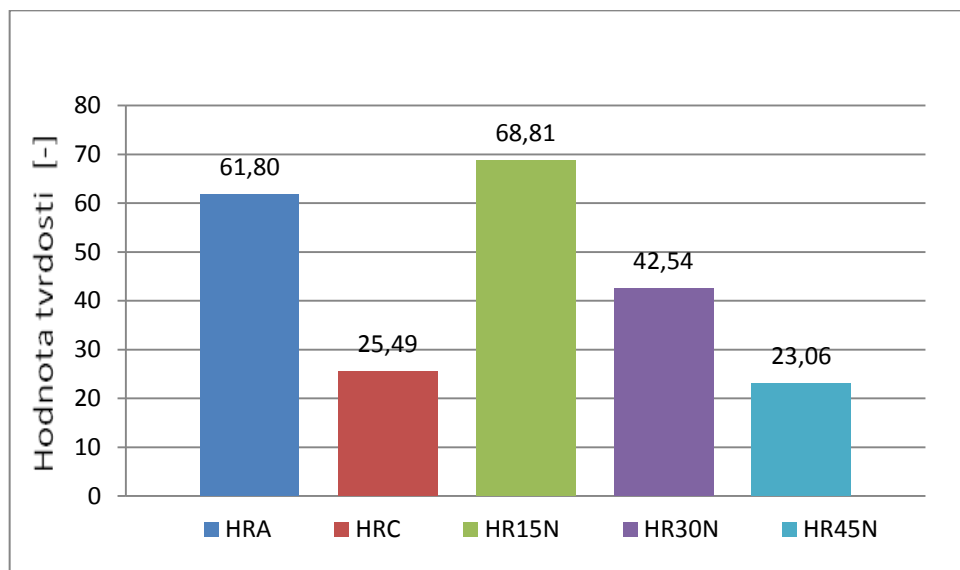
Ocel k zušlechťování, pro velké výkovky. Ocel je dobře tvářitelná a dobře obrobitelná. Je náchylná na popouštěcí křehkost. Používá se na středně namáhané strojní součásti. Optimální průměr pro zušlechtění je 50mm. Svařitelnost obtížná.

- Obsah prvků v %: 0,37 C, 1,25 Mn, 1,25 Si
- Kování 800 až 1100°C
- Normalizační žíhání 870 až 890°C
- Žíhání na měkko 630 až 680°C
- Cementování 850 až 880°C
- 1. Kalení do vody (oleje) 870 až 900°C
- Mezižíhání 650 až 680°C
- 2. Kalení do vody (oleje) 770 až 800°C
- Jednoduché kalení do vody (oleje) 820 až 840°C
- Popouštění 150 až 180°C [12]

7.1 ZÁKLADNÍ MATERIÁL OCEL 13240

13240					
Číslo měření	HRA	HRC	HR15N	HR30N	HR45N
1	60,17	24,61	63,32	29,77	24,32
2	59,09	29,18	63,70	44,56	29,78
3	60,10	24,77	72,04	37,40	22,23
4	64,72	27,69	71,18	51,67	18,45
5	61,74	25,53	76,31	44,56	24,80
6	65,79	29,25	68,20	42,94	18,82
7	57,71	28,68	69,25	46,93	14,56
8	62,28	27,28	70,95	37,26	27,45
9	63,75	23,92	65,74	46,97	21,15
10	62,64	13,95	67,40	43,37	29,06
Arit. průměr	61,80	25,49	68,81	42,54	23,06
Nejist. typu A	2,43	4,28	3,81	5,90	4,70

Tab. 11. Naměřené hodnoty nezpracovaného základního zkoušeného vzorku 13240



Obr. 23. Porovnání hodnot tvrdosti nezpracovaného materiálu 13240

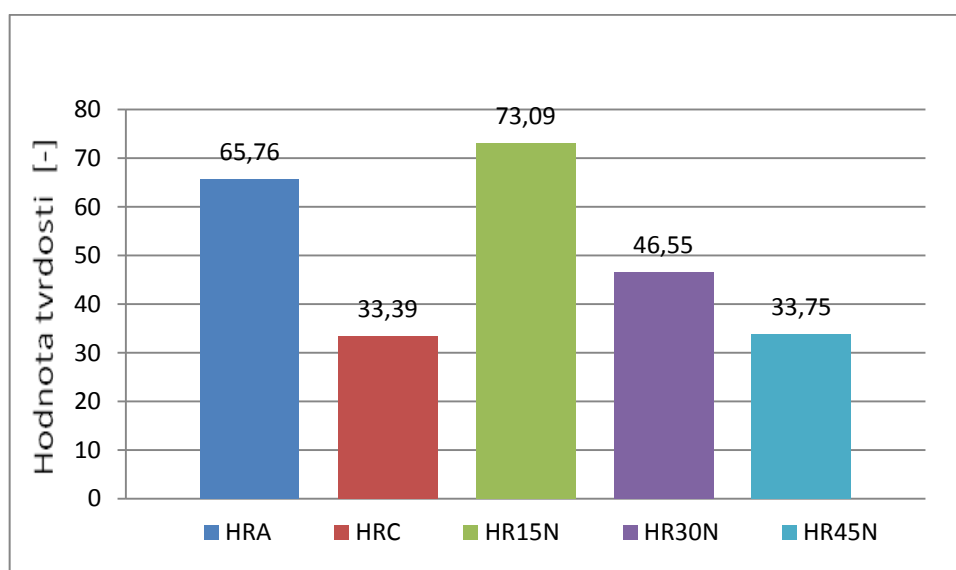
Nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti pro základní nezpracovaný zkušební vzorek 13240 je HR15N, která činí 68,81 a naopak nejnižší naměřená hodnota tvrdosti pro základní nezpracovaný zkušební vzorek je HR45N o hodnotě 23,06 (Tab. 11., Obr. 23.)

7.2 POVRCHOVĚ KALENÁ OCEL 13240

Povrchové kalení se provádí tak, že se materiál rychle ohřeje na kalicí teplotu (u tohoto vzorku to je 890°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 překrytali a zůstává měkké a houževnaté. Zakalená vrstva je tenká (1 – 3mm, 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).[5]

13240 Povrchově kaleno					
Číslo měření	HRA	HRC	HR15N	HR30N	HR45N
1	66,71	30,77	67,69	46,17	28,92
2	65,43	30,34	66,87	38,30	37,50
3	65,39	33,92	77,31	51,24	46,36
4	65,84	29,47	70,81	48,25	17,26
5	58,49	34,56	76,68	48,68	35,84
6	68,73	34,98	80,58	46,03	25,08
7	73,04	34,87	72,99	41,90	41,00
8	65,88	33,16	71,99	48,87	39,86
9	64,39	34,18	72,24	40,96	33,99
10	63,65	37,62	73,75	55,13	31,71
Arit. průměr	65,76	33,39	73,09	46,55	33,75
Nejist. typu A	3,50	2,38	4,03	4,79	8,01

Tab. 12. Naměřené hodnoty povrchově kaleného vzorku 13240



Obr. 24. Porovnání hodnot tvrdosti povrchově kaleného vzorku 13240

Nejvyšší hodnota tvrdosti pro povrchově kalenou konstrukční ocel 13240 je HR15N, zatímco nejnižší tvrdostí je HRC (Tab. 12., Obr. 24.).

8 OCEL 16220

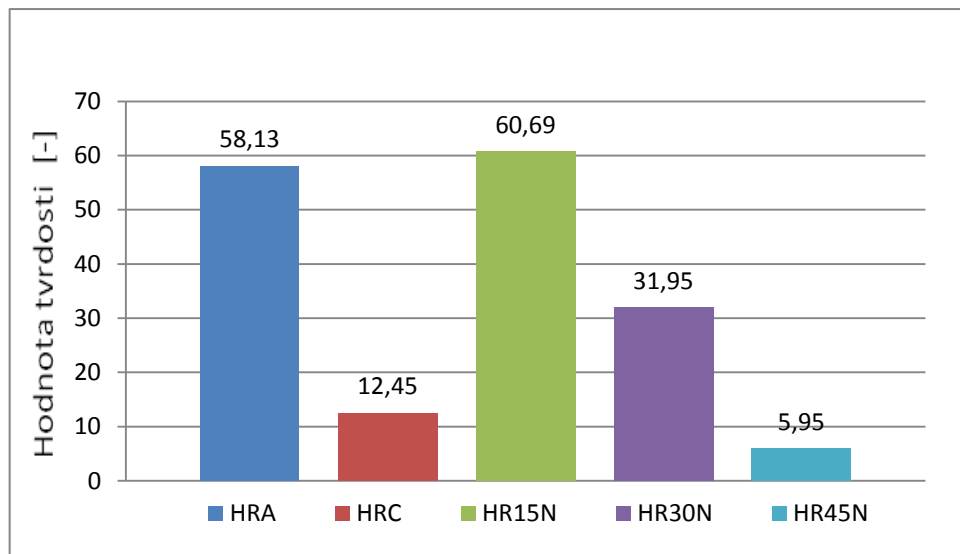
Ocel Ni-Cr k cementování. Tvárná za tepla a dobře obrobitelná, prokalení do hloubky asi 30mm. Vhodná na velmi namáhavé strojní součásti s cementovaným povrchem, s vyšší pevností a houževnatostí v jádře, např. pastorky, talířová a ozubená kola převodových skříní, drážkové hřídele, zvláště namáhavé čepy, hřídele hnacích kol vozidel, kladky atp.

- Obsah prvků v %: 0,16C, 1 Cr, 1,5 Ni
- Kování 800 až 1100°C
- Normalizační žíhání 880 až 900°C
- Žíhání na měkko 680 až 720°C
- Cementování 860 až 880°C
- 1. Kalení do oleje 830 až 860°C
- Mezižíhání 620 až 640°C
- 2. Kalení do oleje 810 až 830°C
- Jednoduché kalení do oleje 820 až 840°C
- Popouštění 150 až 200°C [12]

8.1 ZÁKLADNÍ MATERIÁL OCEL 16220

16220					
Číslo měření	HRA	HRC	HR15N	HR30N	HR45N
1	49,27	12,19	77,06	29,06	0,91
2	55,67	11,10	60,19	28,35	4,09
3	60,98	20,70	55,46	38,39	10,58
4	59,48	9,18	63,18	29,96	-4,68
5	57,09	12,26	45,03	37,59	2,00
6	59,18	16,06	70,38	21,86	4,51
7	55,13	9,49	49,06	42,70	17,83
8	63,71	15,61	60,58	25,56	8,35
9	64,67	7,17	74,03	30,58	0,63
10	56,12	10,70	51,95	35,46	15,27
Arit. průměr	58,13	12,45	60,69	31,95	5,95
Nejist. typu A	4,29	3,79	10,15	6,09	6,66

Tab. 13. Naměřené hodnoty nezpracovaného základního zkoušeného vzorku 16220



Obr. 25. Porovnání hodnot tvrdosti nezpracovaného materiálu 16220

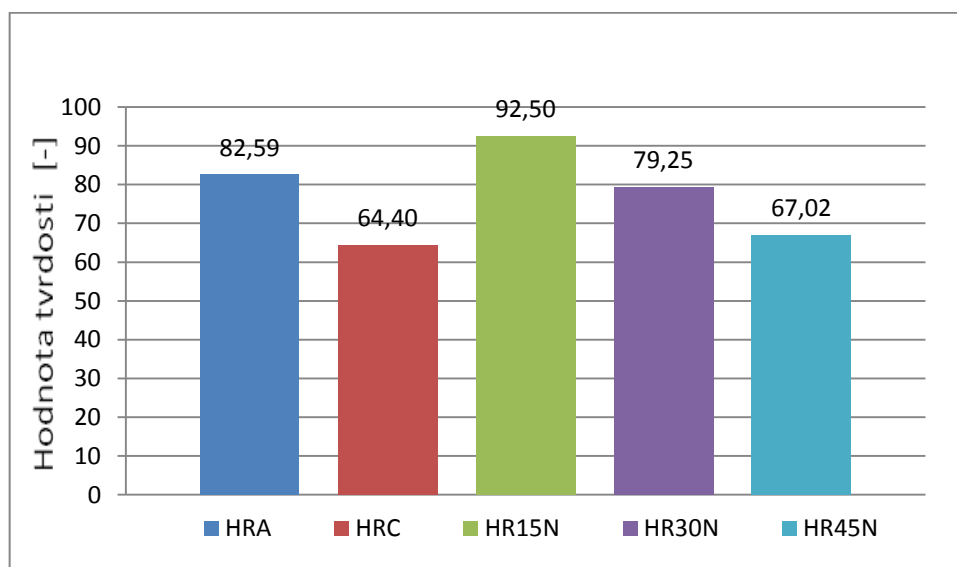
Při měření tvrdosti zkušební tělesa oceli 16220, byla zjištěna nejvyšší tvrdost 60,69 HR15N a nejnižší hodnota tvrdosti 5,95 HR45N (Tab. 13., Obr. 25.).

8.2 CEMENTOVANÁ OCEL 16220

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 AC3 (850 - 950°C). Tvrdost vrstvy dosahuje 50 až 60HRC. Kalení se provádí buď z přímo cementační teploty, jednoduchým kalením po novém ohřevu nebo dvojitým kalením (zjemnění zrna). [5]

16220 Cementováno					
Číslo měření	HRA	HRC	HR15N	HR30N	HR45N
1	72,99	59,89	95,40	77,73	70,33
2	87,54	64,60	91,28	78,82	66,54
3	85,26	60,58	81,85	82,08	72,70
4	82,04	66,50	91,00	80,91	68,77
5	87,14	65,91	90,91	78,91	67,11
6	84,24	70,50	96,35	76,02	61,72
7	82,94	70,79	97,82	77,58	59,67
8	79,60	64,98	88,11	86,07	71,57
9	81,71	61,83	94,31	73,56	61,52
10	82,39	58,42	97,96	80,86	70,29
Arit. průměr	82,59	64,40	92,50	79,25	67,02
Nejist. typu A	3,97	4,03	4,73	3,29	4,36

Tab. 14. Naměřené hodnoty cementovaného zkoušeného vzorku 16220



Obr. 26. Porovnání hodnot tvrdosti cementovaného materiálu 16220

Měření tvrdosti cementované oceli 16220 ukázalo, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena metodou HR15N (92,50 HR15N). Nejmenší hodnota byla naopak zjištěna metodou HRC a to hodnota 64,40 HRC (Tab. 14., Obr. 26.).

9 OCEL 14260

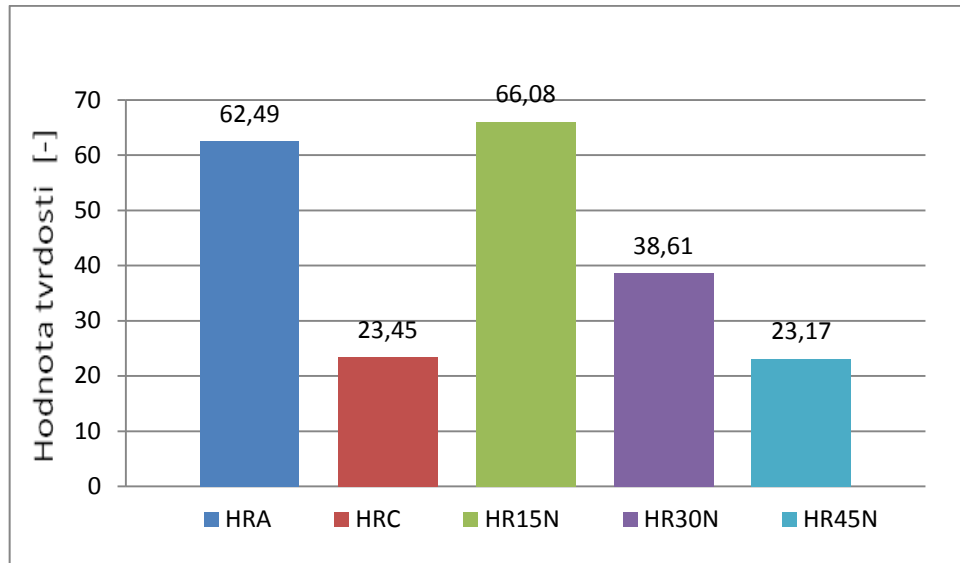
Ocel je vhodná k zušlechťování. Dále je vhodná na více namáhané pružiny v konečném stavu .7 nebo .8, používané zvláště pro automobily a železniční vozy.

- Obsah prvků v %: 0,55 C, 0,6 Cr, 1,5 Si
- Kování 800 až 1100°C
- Normalizační žíhaní 890 až 910°C
- Základní žíhaní 770 až 790°C
- Ochlazování v peci až na 650°C, výdrž asi 2h, dále volně na vzduchu
- Žíhaní na měkko 720 až 730°C
- Žíhaní ke snížení pnutí 500 až 550°C
- Kalení do oleje 870 až 900°C
- Popouštění 480 až 500°C [12]

9.1 ZÁKLADNÍ MATERIÁL OCEL 14260

14260					
č.m.	HRA	HRC	HR15N	HR30N	HR45N
1	83,39	24,09	58,68	36,59	14,61
2	62,85	22,29	54,94	41,30	38,54
3	60,65	23,99	65,73	33,23	22,81
4	57,97	21,20	79,10	41,90	14,94
5	55,79	25,84	73,98	41,19	31,10
6	54,47	19,30	64,84	31,95	21,85
7	61,03	28,37	69,15	44,99	26,55
8	66,07	18,11	72,61	35,37	23,80
9	62,66	24,16	62,42	38,06	14,89
10	60,03	27,17	59,34	41,53	22,57
Arit. průměr	62,49	23,45	66,08	38,61	23,17
Nejist. typu A	7,69	3,12	7,23	4,03	7,23

Tab. 15. Naměřené hodnoty nezpracovaného základního zkoušeného vzorku 14260



Obr. 27. Porovnání hodnot tvrdosti nezpracovaného materiálu 14260

Z porovnání výsledků tvrdosti základního materiálu oceli 14260 je patrné, že nejvyšší tvrdostí je 66,08 HR15N oproti tomu nejmenší tvrdost 23,15 HR45N (Tab. 15., Obr. 27.).

10 OCEL 12060

Ocel vhodná k zušlechťování. Ocel je vhodná na hřídele turbokompresorů karuselů, zalomené a jiné hřídele, ozubená kola, ozubené věnce, plunžry pístnice, vřetena, čepy, lamely, spojky, pojistky, západky, páky, destičky abnormálních řetězů, různé spojovací součásti apod. Konstrukční elementy lisovacích nářadí.

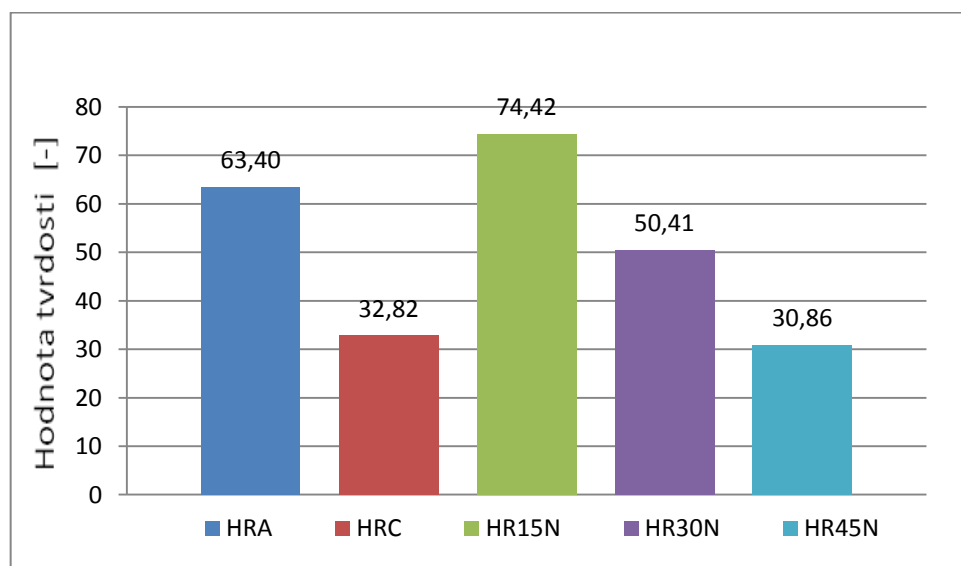
- Obsah prvků v %: 0,55 C
- Kování 800 až 1100°C
- Normalizační žíhání 810 až 840°C
- Žíhání na měkko 680 až 720°C
- Kalení do vody 790 až 830°C
- Kalení do oleje 800 až 840°C
- Popouštění 530 až 670°C [12]

10.1 POVRCHOVĚ KALENÁ OCEL 12060

Povrchové kalení se provádí tak, že se materiál rychle ohřeje na kalicí teplotu (u tohoto vzorku to je 800°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 – 3mm, 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 (530°C).[2]

12060 Kaleno a Popuštěno					
Číslo měření	HRA	HRC	HR15N	HR30N	HR45N
1	63,06	36,12	65,93	51,71	28,39
2	65,74	31,55	76,83	54,69	32,24
3	66,86	37,90	86,07	47,87	41,38
4	61,72	30,37	77,97	45,53	34,46
5	61,69	31,20	82,28	55,98	30,06
6	63,92	32,88	76,78	44,13	35,12
7	60,01	30,72	76,02	48,30	20,16
8	66,71	29,49	65,88	46,36	27,78
9	64,58	40,08	73,33	58,39	35,23
10	59,75	27,93	63,08	51,15	23,80
Arit. průměr	63,40	32,82	74,42	50,41	30,86
Nejist. typu A	2,46	3,73	7,06	4,54	5,86

Tab. 16. Naměřené hodnoty povrchově kaleného zkoušeného vzorku 12060



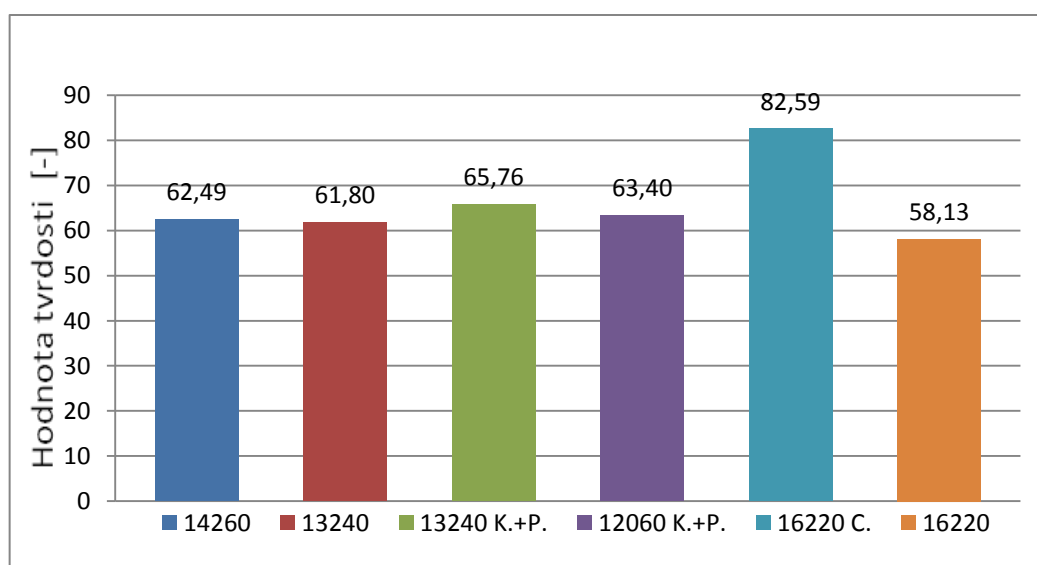
Obr. 28. Porovnání hodnot tvrdosti povrchově kaleného materiálu 12060

Z výsledků zkoušky tvrdosti povrchově kaleného vzorku oceli 12060 je nejvyšší hodnota tvrdosti 74,42 HR15N a nejnižší hodnota tvrdosti 30,86 HR45N (Tab. 16., Obr 28.).

11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Bakalářská práce se zabývá měřením tvrdosti podle Rockwella u vybraných typů konstrukčních ocelí po tepelném a chemicko-tepelném zpracování. Měření bylo prováděno v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství. Pro měření bylo zvoleno pět zkoušek tvrdosti a to HRA, HRC, HR15N, HR30N a HR45N. Měření bylo prováděno vždy pro každou metodu 10x na různých místech plochy zkušební vzorku. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány a vyhodnoceny.

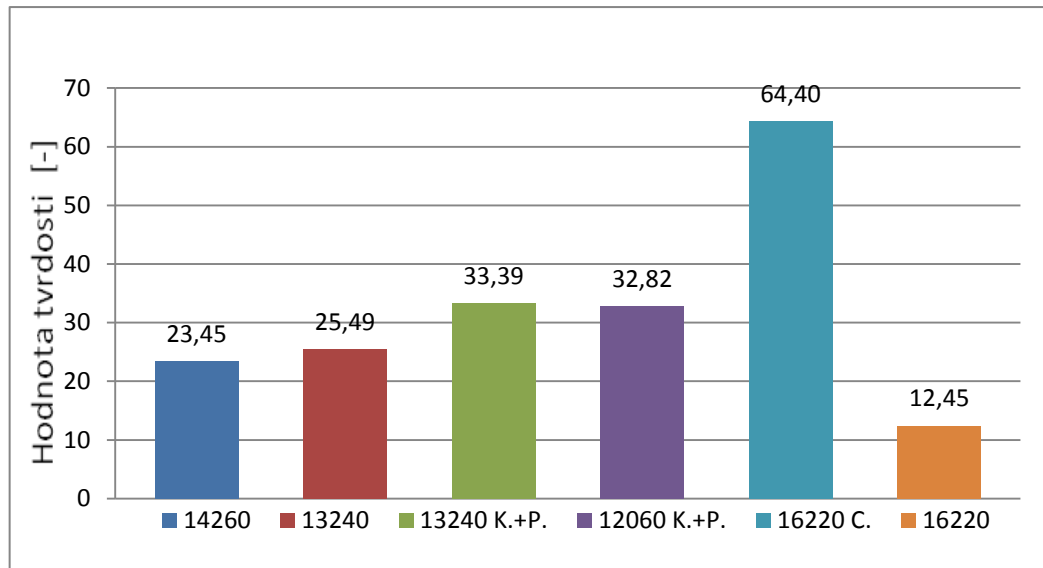
11.1 VYHODNOCENÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HRA



Obr. 29. Měření tvrdosti metodou HRA

Měření tvrdosti metodou HRA bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot tvrdosti dosahuje zkušební vzorek chemicko-tepelně zpracovaný. Bylo zde dosaženo velmi tvrdých struktur martenzitu. Nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti touto metodou byla zjištěna u cementované vrstvy. Nižších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u tepelně zpracovaných vzorků, které byly povrchově kaleny. Zde bylo dosaženo bainitické nebo dokonce martenzitické struktury. Nejmenší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u tepelně nezpracovaných (základních) vzorků (Obr. 29.).

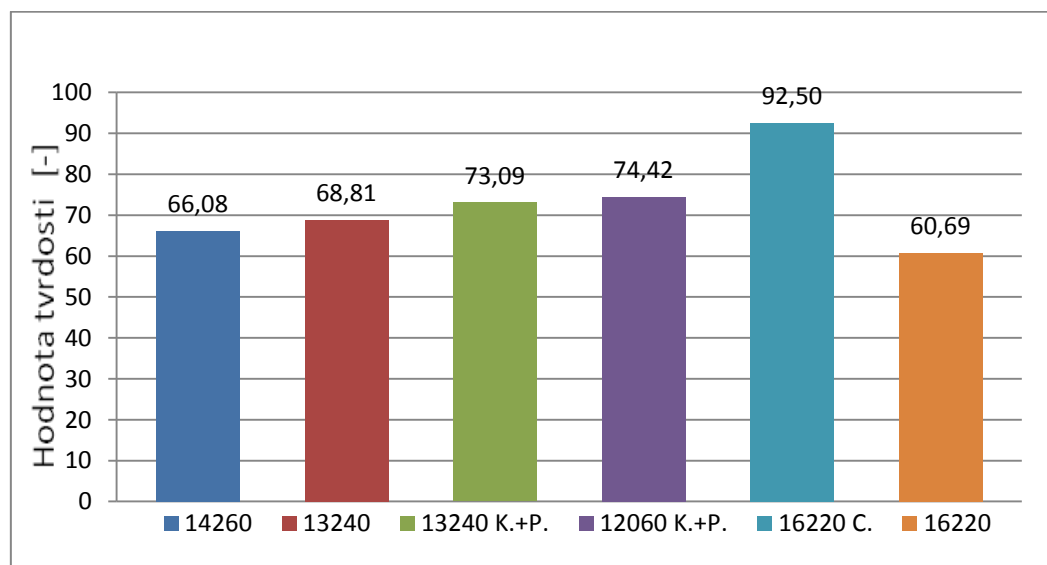
11.2 VYHODNOCENÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HRC



Obr. 30. Měření tvrdosti metodou HRC

Měřením tvrdosti metodou HRC bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot tvrdosti dosahuje zkušební vzorek chemicko-tepelně zpracovaný. Bylo zde dosaženo velmi tvrdých struktur martenzitu. Nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti touto metodou byla zjištěna u cementované vrstvy. Nižších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u tepelně zpracovaných vzorků, které byly povrchově kaleny. Zde bylo dosaženo bainitické nebo dokonce martenzitické struktury. Nejmenší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u tepelně nezpracovaných (základních) vzorků (Obr. 30.).

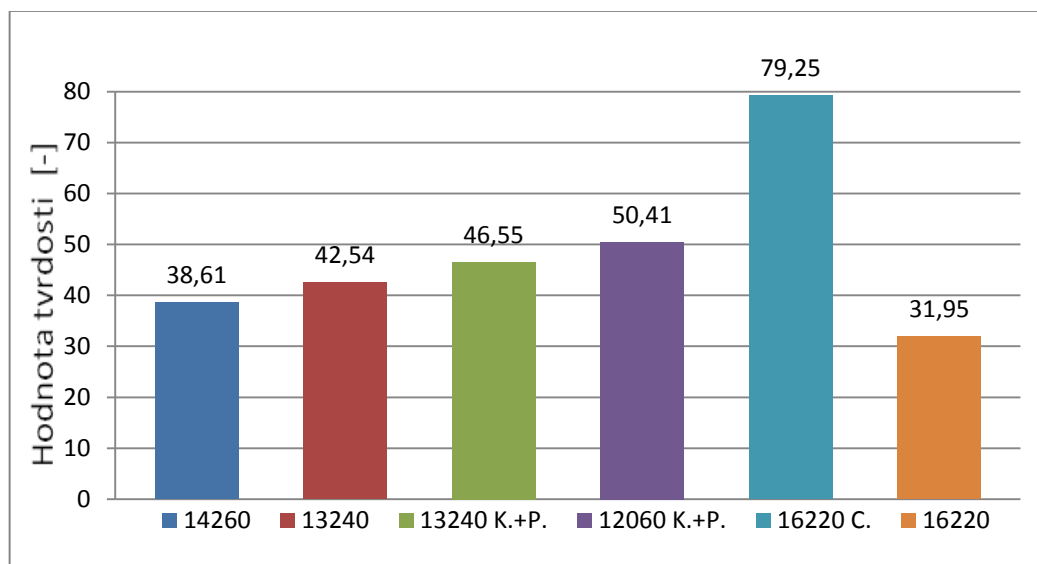
11.3 VYHODNOCENÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HR15N



Obr. 31. Měření tvrdosti metodou HR15N

Měřením tvrdosti metodou HR15N bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot tvrdosti dosahuje zkušební vzorek chemicko-tepelně zpracovaný. Bylo zde dosaženo velmi tvrdých struktur martenzitu. Nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti touto metodou byla zjištěna u cementované vrstvy. Nižších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u tepelně zpracovaných vzorků, které byly povrchově kaleny. Zde bylo dosaženo bainitické nebo dokonce martenzitické struktury. Nejmenší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u tepelně nezpracovaných (základních) vzorků (Obr. 31.).

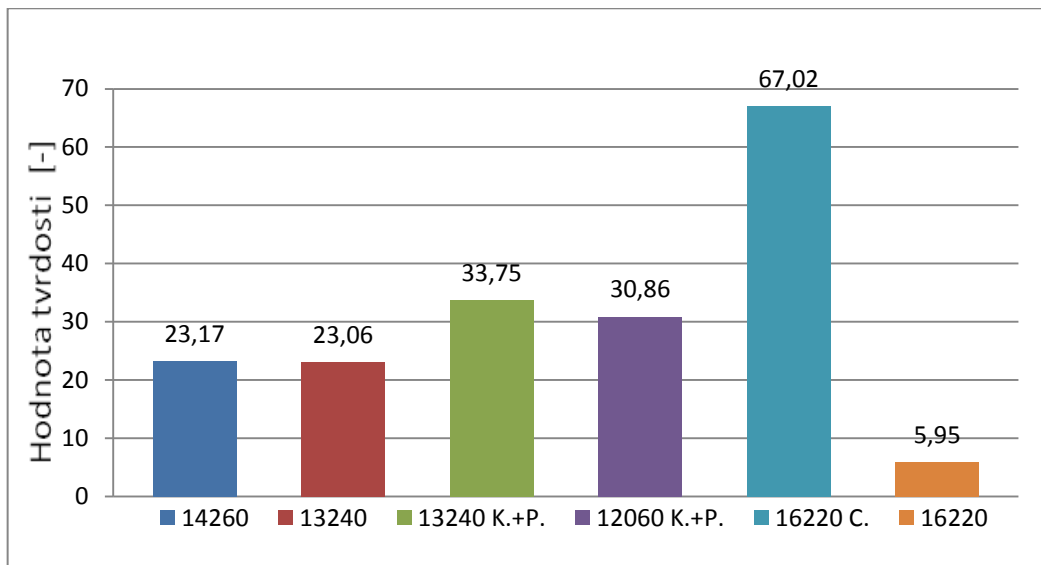
11.4 VYHODNOCENÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HR30N



Obr. 32. Měření tvrdosti metodou HR30N

Měřením tvrdosti metodou HR30N bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot tvrdosti dosahuje zkušební vzorek chemicko-tepelně zpracovaný. Bylo zde dosaženo velmi tvrdých struktur martenzitu. Nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti touto metodou byla zjištěna u cementované vrstvy. Nižších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u tepelně zpracovaných vzorků, které byly povrchově kaleny. Zde bylo dosaženo bainitické nebo dokonce martenzitické struktury. Nejmenší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u tepelně nezpracovaných (základních) vzorků (Obr. 32.).

11.5 VYHODNOCENÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HR45N



Obr. 33. Měření tvrdosti metodou HR45N

Měřením tvrdosti metodou HRC bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot tvrdosti dosahuje zkušební vzorek chemicko-tepelně zpracovaný. Bylo zde dosaženo velmi tvrdých struktur martenzitu. Nejvyšší naměřená hodnota tvrdosti touto metodou byla zjištěna u cementované vrstvy. Nižších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u tepelně zpracovaných vzorků, které byly povrchově kaleny. Zde bylo dosaženo bainitické nebo dokonce martenzitické struktury. Nejmenší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u tepelně nezpracovaných (základních) vzorků (Obr. 33.).

12 ZÁVĚR

Bakalářská práce řeší problém měření tvrdosti u čtyř typů konstrukční ocelí třídy 12, 13, 14 a 16. Byly vybrány oceli 12060, 13240, 14260 a 16220. Měření tvrdosti bylo realizováno na základním materiálu, ale i na chemicko-tepelně zpracovaném materiálu daných ocelí. Zvolena byla metoda Rockwell (HRA, HRC, HR15N, HR30N a HR45N). Měření bylo prováděno vždy pro každou metodu 10x na různých místech plochy zkušebního vzorku.

Z naměřených výsledků tvrdosti bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot tvrdosti dosáhl materiál 16220, u kterého bylo provedeno chemicko – tepelné zpracování (cementování). Druhou nejvyšší hodnotu tvrdosti vykázal materiál 13240, který byl kalen a popouštěn. Podobné hodnoty tvrdosti byly zjištěny také u materiálu 12060. Nejmenší hodnoty tvrdosti byly naopak naměřeny u materiálu 16220, které byl měřen v základním stavu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Monografie:

- [1] SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R., BENEDIKT, V. *Základní zkoušky kovových materiálů*. [s.l.], 2005. ISBN 80-7043-417-1.
- [2] PLUHAŘ J. a kol. *Nauka o materiálech*. vyd. Praha: SNTL, 1989. 552 s. bez ISBN
- [3] PÍŠEK F. *Nauka o materiálu II (1. svazek)*. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. 660 s. bez ISBN
- [4] HLUCHÝ, M.; KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie I*. [s.l.] : Scientia, 1999. ISBN 80-7183-150-6.
- [5] VELES, P.: *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 2nd ed. Nakladatelství technické literatury Praha, 1999
- [6] DORAZIL, E. – a KOLEKTIV: *Nauka o materiálu I*. Vysoké učení technické v Brně, 1976

Internetové zdroje:

- [7] ATEAM, [online]. 2005 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z :
<www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf>
- [8] METROTEST, s.r.o Kladno. [online]. 1994 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z :
<www.metrotest.cz/hardness/zkousky_tvrlosti.pdf>
- [9] CONVERTER, [online]. 2002 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z :
<www.converter.cz>
- [10] *Vysoké učení technické v Brně* [online]. [cit. 2013-01-24]. Dostupný z WWW:
<<http://ime.fme.vutbr.cz/>>.
- [11] QUIDO. [online]. 2003 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z:
<www.quido.cz/mereni/brinell.htm>
- [12] TUMLIKOVO. [online]. 2011 [cit. 2013-04-24]. Dostupné z:
<<http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/konstrukcni-oceli>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	Úhel spuštění zkušebního tělíska	[°]
β	Úhel odrazu zkušebního tělíska	[°]
σ_{pt}	Pevnost v tahu	[MPa]
A(h)	Plocha vtisku	[mm ²]
D	Průměr kuličky	[mm]
d	Aritmetický průměr vtisku	[mm]
d _{1,2}	Délky úhlopříček d ₁ ,d ₂	[mm]
e	Trvalá hloubka vtisku	[mm]
F ₀	Předběžné zatížení	[N]
F ₁	Přidané zatížení	[N]
F	Celkové zatížení	[N]
F _n	Normálová síla	[N]
F _t	Tangenciální síla	[N]
h	Hloubka vtisku	[mm]
h ₁	Padací výška tělíska	[mm]
h ₂	Výška odrazu tělíska	[mm]
k ₁	Korekční konstanta tvrdoměru	[-]
k ₂	Korekční konstanta materiálu	[-]
l	Délka úhlopříčky	[mm]
R _a	Drsnost povrchu	[μm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Princip zkoušky tvrdosti podle Rockwella [9].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2. Průběh zkušebního zatížení- metoda Rockwell [8].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3. Označení zkoušky- metoda Rockwell [8].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 4. Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Brinella [5].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 5. Schéma Brinellovi zkoušky [10].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 6. Průběh zkušebního zatížení- metoda Brinell [8].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 7. Označení zkoušky- metoda Brinell [4].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 8. Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Vickerse [10].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 9. Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse [7].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 10. Průběh zkušebního zatížení [5].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 11. Schéma zkoušky dle Vickerse - deformace vtisku [7].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 12. Označení zkoušky- metoda Vickers [4].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 13. Schéma Shoreho skleroskopu [7].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 14. Schéma Duroskopu [7].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 15. Schéma Baumanova kladívka [3].....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 16. Schéma kladívka Poldi [7].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 17. Zkouška tvrdosti Poldiho kladívkem [7].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 18. Schematické znázornění vrypové zkoušky [11].....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 19. Indentor podle Knoopa [9].....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 20. Schéma Hanemannova mikrotvrdoměru [7].....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 21. Stroj Easydur Italiana.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 22. Schéma měření</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 23. Porovnání hodnot tvrdosti nezpracovaného materiálu 13240.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 24. Porovnání hodnot tvrdosti povrchově kaleného materiálu 13240.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 25. Porovnání hodnot tvrdosti nezpracovaného materiálu 16220.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 26. Porovnání hodnot tvrdosti cementovaného materiálu 16220.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 27. Porovnání hodnot tvrdosti nezpracovaného materiálu 14260.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 28. Porovnání hodnot tvrdosti povrchově kaleného materiálu 12060.....</i>	<i>55</i>

<i>Obr. 29. Měření tvrdosti metodou HRA</i>	56
<i>Obr. 30. Měření tvrdosti metodou HRC</i>	57
<i>Obr. 31. Měření tvrdosti metodou HR15N</i>	57
<i>Obr. 32. Měření tvrdosti metodou HR30N</i>	58
<i>Obr. 33. Měření tvrdosti metodou HR45N</i>	59

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Rozdělení zkoušek tvrdosti [1].....</i>	<i>12</i>
<i>Tab. 2. Vnikací tělesa a zkušební síly pro různé metody Rockwella [8].....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 3. Umístění vtisku při zkoušce tvrdosti podle Brinella [10].....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 4. Vztah průměru kuličky a zatěžující síly u metody Brinell [8].....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 5. Volba poloměru $0,102F/D^2$ pro různé materiály [8].....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 6. Minimální tloušťka vzorku u metody Brinell [8].....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 7. Zkušební zatížení pro zkoušku dle Vickerse [8].....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 8. Srovnání Mohsovy mineralogické stupnice a materiálů ve strojírenství [11].....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 9. Použité normy při měření</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 10. Vnikací tělesa a zkušební síly pro zadané metody podle Rockwella</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 11. Naměřené hodnoty nezpracovaného základního zkoušeného vzorku 13240.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 12. Naměřené hodnoty povrchově kaleného zkoušeného vzorku 13240.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 13. Naměřené hodnoty nezpracovaného základního zkoušeného vzorku 16220.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 14. Naměřené hodnoty cementovaného zkoušeného vzorku 16220.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 15. Naměřené hodnoty nezpracovaného základního zkoušeného vzorku 14260.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 16. Naměřené hodnoty povrchově kaleného zkoušeného vzorku 12060.....</i>	<i>55</i>