

Měření tvrdosti ocelí se středním obsahem uhlíku

Radek Šimara

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek Šimara**
Osobní číslo: **T11294**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření tvrdosti ocelí se středním obsahem uhlíku**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava zkušebních vzorků pro experiment.
3. Provedení experimentu.
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: **10. února 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **23. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
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 užit 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 15. 2. 2014.....


.....

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 nevyjádřeně 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 díla:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-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

Bakalářská práce se zabývá měřením tvrdosti u vybrané oceli (12060). Pro praktickou část byly vybrány 4 zkušební vzorky oceli 12 060. Jeden vzorek byl v původním stavu, tedy tepelně nezpracovaný a zbylé tři vzorky byly tepelně zpracovány. Jednalo se o tepelné zpracování: povrchové kalení, kalení a zušlechťení. Měření tvrdosti bylo prováděno metodou Rockwell, dle příslušných zkoušek (HRA, HRC, HR15N a H30N). Nejvyšší hodnoty tvrdosti vykazoval testovaný zkušební vzorek, který byl zakalen.

Klíčová slova: ocel 12 060, tepelné zpracování, tvrdost

ABSTRACT

This Bachelor's thesis deals with hardness measurement at selected steel (12 060). There were chosen four test samples of steel 12 060 for experimental part. One of them was at its original quality, therefore not heat treated and the other three samples were heat treated. The types of heat treatment were: surface hardening, hardening and refinement. Hardness measurement was performed by Rockwell method, by the relevant tests (HRA, HRC, HR15N and HR30N). The highest hardness values showed a sample, which was hardened.

Keywords: steel 12 060, heat treatment, hardness

Poděkování:

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Davidovi Maňasovi, Ph.D. za pomoc, odborné vedení, rady, čas, ochotu a trpělivost, kterou mi věnoval, aby mi dopomohl zdokonalit a úspěšně dokončit tuto bakalářskou práci.

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

Ve Zlíně

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	10
1 TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ZKOUŠKY TVRDOSTI	12
1.1 ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK TVRDOSTI.....	12
1.2 ČINITELÉ OVLIVŇUJÍCÍ TVRDOST.....	13
1.3 HISTORIE ZKOUŠEK TVRDOSTI	13
2 ZKOUŠKY STATICKÉ	14
2.1 ZKOUŠKY VRYPOVÉ.....	14
2.1.1 Metoda Martense.....	14
2.1.1.1 Určení tvrdosti	14
2.1.2 Metoda Mohsova stupnice	15
2.2 ZKOUŠKY VNIKACÍ	15
2.2.1 Metoda Brinell.....	16
2.2.1.1 Podstata zkoušky.....	17
2.2.1.2 Provedení zkoušky	18
2.2.1.3 Určení tvrdosti	19
2.2.1.4 Zápis hodnoty tvrdosti	19
2.2.1.5 Přesnost zkoušky.....	20
2.2.1.6 Brinellovy tvrdoměry	20
2.2.1.7 Modifikovaná metoda měření tvrdosti HBT.....	21
2.2.2 Metoda Rockwell	21
2.2.2.1 Podstata zkoušky.....	21
2.2.2.2 Provedení zkoušky	22
2.2.2.3 Určení tvrdosti	24
2.2.2.4 Zápis hodnoty tvrdosti	25
2.2.2.5 Stupnice a rozsahy použití metody Rocwell.....	25
2.2.2.6 Zkušební vzorky.....	26
2.2.2.7 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Rockwell.....	27
2.2.3 Metoda Vickers	27
2.2.3.1 Podstata zkoušky.....	27
2.2.3.2 Typy zkoušek a rozsahy použití	28
2.2.3.3 Provedení zkoušky	28
2.2.3.4 Určení tvrdosti	29
2.2.3.5 Zápis hodnoty tvrdosti	30
2.2.3.6 Vnikací tělesa a zkušební síly	31
2.2.3.7 Přehled možných chyb při měření metodou Vickers	31
3 ZKOUŠKY DYNAMICKÉ	32
3.1 ZKOUŠKY DYNAMICKÉ – VNIKACÍ.....	32
3.1.1 Metoda Poldiho kladívka	32
3.1.2 Metoda Baumannova kladívka.....	33
3.2 ZKOUŠKY DYNAMICKÉ – ODRAZOVÉ	34
3.2.1 Metoda Shore	34

3.2.2	Metoda Duroskop.....	35
4	OCELI.....	36
4.1	ROZDĚLENÍ OCELÍ PODLE STUPNĚ LEGOVÁNÍ.....	36
4.2	ROZDĚLENÍ OCELÍ PODLE HLAVNÍCH SKUPIN JAKOSTI.....	36
4.3	TŘÍDY OCELÍ.....	37
4.4	ZNAČENÍ OCELÍ.....	37
4.4.1	Číselné značení ocelí.....	37
4.4.2	Barevné značení ocelí.....	38
4.5	OCELI SE STŘEDNÍM OBSAHEM UHLÍKU.....	38
4.5.1	Dělení ocelí k zušlechťování dle chemického složení.....	40
4.5.2	Zvláštní skupina ocelí k zušlechťování.....	40
4.5.3	Volba oceli.....	41
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	43
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	44
5.1	CÍL PRÁCE.....	44
5.2	TYPY ZKOUŠEK.....	44
5.3	POSTUP MĚŘENÍ.....	46
5.4	TEPELNÉ A CHEMICKY – TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	48
5.4.1	Zušlechťování.....	48
5.4.2	Kalení.....	48
5.4.3	Povrchové kalení.....	48
6	OCEL 12 060.....	49
6.1	OCEL 12 060 - NEZPRACOVANÁ.....	50
6.1.1	Interpretace výsledků měření oceli 12 060 – Nezpracovaná.....	50
6.2	OCEL 12 060 – ZUŠLECHTĚNÁ.....	51
6.2.1	Interpretace výsledků měření oceli 12 060 - Zušlechtěná.....	51
6.3	OCEL 12 060 – KALENÁ.....	52
6.3.1	Interpretace výsledků měření oceli 12 060 - Kalená.....	52
6.4	OCEL 12 060 – POVRCHOVĚ KALENÁ.....	53
6.4.1	Interpretace výsledků měření oceli 12 060 – Povrchově kalená.....	53
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	54
	ZÁVĚR.....	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	59
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	61
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	62
	SEZNAM TABULEK.....	64

ÚVOD

V dnešní době zkoušky tvrdosti v oboru zkoušení materiálů hrají jednu z nejvýznamnějších rolí. Vývoj zkušebních metod k měření tvrdosti započal již před 200 let a stále se vyvíjí a nepodařilo se dojít k jednotné koncepci. Údaje o tvrdosti prvků, jejich sloučenin a materiálu z nich vyrobených patří v praxi k charakteristikám látek. Člověk je svými smysly schopen rozeznat materiály měkké od tvrdých. Takové rozdělení už v dnešní době není dostačující, zvláště při stále se zvětšujících potřebách na kvalitu a jakost v nástrojovém průmyslu. K nejznámějším tvrdým přírodním látkám patří diamant, korund a topaz. U jednoho vzorku lze stanovit tolik tvrdostí, kolik je způsobů měření.

„Tvrdost, jako jedna z mechanických vlastností, má hlavně u kovových materiálů mimořádnou důležitost. Je to proto, že ze všech vlastností materiálu ji můžeme zjistit nejrychleji, nejlevněji a i na předmětech nejmenších rozměrů. Z tvrdosti často usuzujeme i na některé další vlastnosti materiálu (pevnost v tahu, obrobitelnost apod.). Zkouší se buď na zkušebních vzorcích, nebo přímo na hotových výrobcích.“ [1]

Hlavním cílem bakalářské práce je naměřit a vyhodnotit tvrdost 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. Postupem a zásadami měření. Seznámení s geometrií nástrojů pro měření tvrdosti a tvarem jejich vtisků, z nichž se určí výsledná tvrdost. Dále se v teoretické části také seznámíme s ocelmi, jejich rozdělením, značením a jejich zušlechťováním. Praktická část zahrne analýzu tvrdosti zkušebních vzorků různé struktury a seznámení s tepelným zpracováním zkušebních vzorků. Následně vyhodnotím a srovnám zkušební vzorky a rozhodnu, které zpracování a metoda je z hlediska tvrdosti nejvhodnější.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Vývoj metod zkoušek tvrdosti trvá již déle než 200 let a stále se nedospělo k jednotlivé koncepci. Měření tvrdosti spadá mezi zkoušky mechanické a to z toho důvodu, že vlastnosti materiálu získáváme při působení vnějších sil na zkušební vzorek. Zkoušky tvrdosti jsou nejpoužívanějšími mechanickými zkouškami jak v provozu, tak i v laboratořích.

„Tvrdość definujeme jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Na této definici je založena většina přístrojů k měření tvrdosti. Hodnoty tvrdosti se uvádějí buď bez jednotek, nebo, jsou-li odvozeny ze vztahu mezi tlakovou silou a plochou vtisku, přisuzujeme jim jednotku MPa. Protože však tento způsob může vést k omylům (k záměně za pevnost), je lépe uvádět tvrdost jako číslo nepojmenované, pouze s udáním způsobu měření nebo stupnice. Pro tvrdost používáme značku H. Zkoušky tvrdosti rozdělujeme na zkoušky vrypové, vnikací a odrazové.“ [1]

1.1 Rozdělení zkoušek tvrdosti

Zkoušky tvrdosti se člení na vrypové, vnikací a odrazové a dle charakteru zátěžné síly na statické a dynamické. [2]

Tab. 1. Rozdělení zkoušek tvrdosti [1]

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

1.2 Činitelé ovlivňující tvrdost

Výsledek měření tvrdosti je ovlivněn celou řadou podmínek provedení zkoušky. Při zkoušce tvrdosti dochází k plastické deformaci materiálu v místě vtisku. Jednoduché vyjádření poměrů při zkoušce tvrdosti je obtížné a zároveň tvrdost nelze vyjádřit jednoduchou fyzikální veličinou. Všeobecně je tvrdost funkcí řady činitelů a mezi ně patří:

- pružné vlastnosti zkoušeného materiálu
- plastické vlastnosti zkoušeného materiálu
- rozměry zkoušeného tělesa
- použité zatížení při zkoušce
- tvar vnikacího tělesa a rychlost vnikání
- mechanické vlastnosti vnikacího tělesa [3]

1.3 Historie zkoušek tvrdosti

„Kirsch (1891) navrhl zatlačování válcového indentoru zvětšující se silou až do okamžiku, kdy se objevil první trvalý vtisk. Příslušné tlakové napětí bylo mírou tvrdosti. Protože bylo skutečné zjištění tohoto napětí spojeno s jistými nepřesnostmi, bylo doporučeno čelní plochu bombírovat velkým poloměrem. Další vývoj směřoval ke zjištění souvislosti mezi tvrdostí a mezí kluzu. Z tohoto důvodu bylo prováděno např. několikastupňové zatěžování kuličkou ve stejném místě, přičemž po zatížení bylo provedeno rekrytalizační žihání. Tento cyklus se opakoval, dokud se vtisk již více nezvětšoval. Z dosaženého rozměru vtisku pak byla určena tvrdost – Hanriot 1912. Na začátku 20. století byla vyvinuta celá řada podobných metod, které však pro svoji zdlouhavost, ale i nepřesnost nenašly uplatnění.” [4]

2 ZKOUŠKY STATICKE

Statické zkoušky jsou základním mechanickým zkoušením materiálu. Při statických zkouškách těleso zatěžujeme poměrně zvolna. [1]

U statického měření je doba zatěžovací síly v řádech sekund narušena od zkoušek dynamických, kde se působící síla pohybuje ve zlomcích sekund.

2.1 Zkoušky vrypové

V současnosti se vrypové zkoušky používají už jen pro stanovení tvrdosti tvrdých a křehkých materiálů jako jsou sklo, porcelán aj.. V praxi se především používá zkouška podle Martense (Ma). [1]

Statické vrypové zkoušky tvrdosti mají v dnešní době jen malý význam. Tato metoda je obdobou metody převzaté z mineralogie, kde se pro určování tvrdosti používá známá Mohsova stupnice tvrdosti. U zkoušky kovových materiálů se k vytvoření vrypu používá diamantového kuželíku s hrotem o vrcholovém úhlu 90° . Tato metoda se nazývá Martensova zkouška. [5]

2.1.1 Metoda Martense

Měření podle Martense vynalezl A.Martense, německý hutník a také profesor techniky v Berlíně. Také byl jedním ze zakladatelů moderního oboru zkoušení a mikroskopického zkoušení materiálu. Zkouška tvrdosti podle Martense je od roku 2003 součástí ISO 14577. [6]

2.1.1.1 Určení tvrdosti

Hodnotu tvrdosti podle Martense (HMa) zjišťujeme tak, že přitlačujeme kuželový diamantový hrot na vyleštěný povrch zkoušeného materiálu. Působící tlak je měnitelný a zkoušený předmět se pohybuje určitou rychlostí. Jako míra tvrdosti je považována síla F , která do zkušebního předmětu vytvoří vryp o šířce 0,01 mm. [1]

2.1.2 Metoda Mohsova stupnice

Tato stupnice byla vynalezena Friedrichem Mohsem v roce 1822. Stupnice funguje způsobem, že materiál s vyšším číslem je schopen udělat vryp do materiálu s číslem nižším.

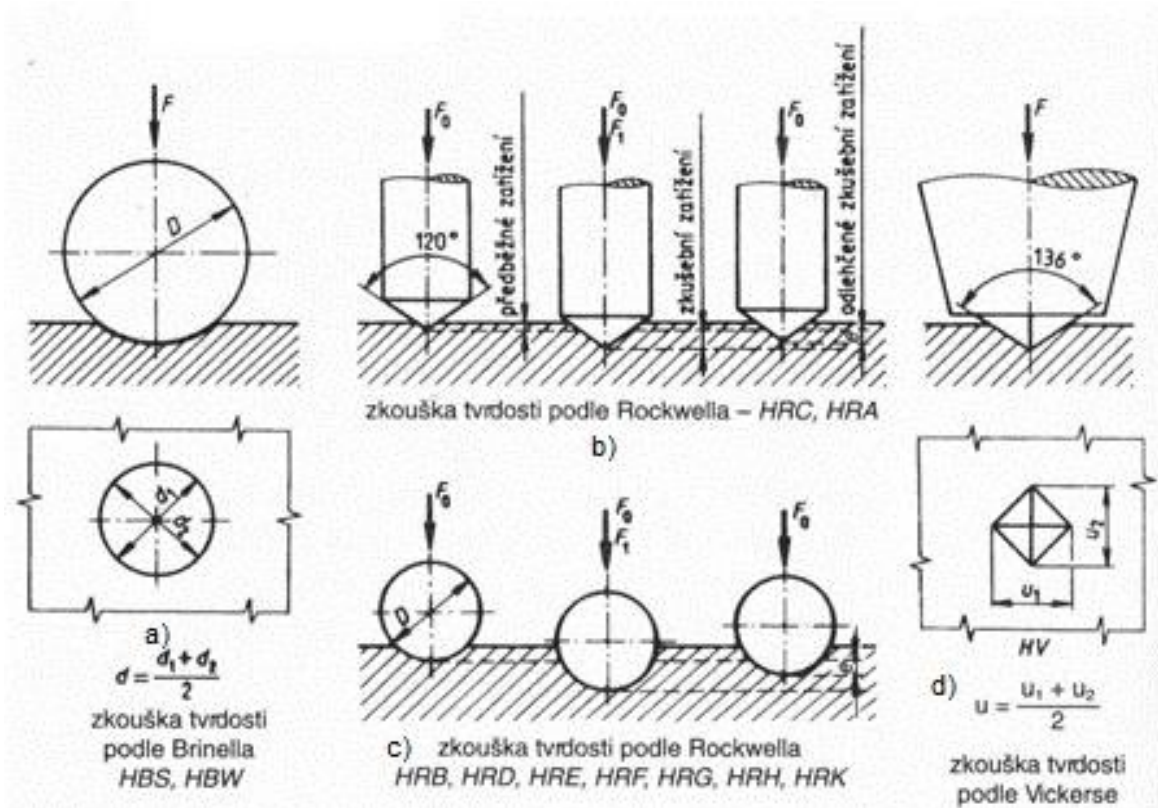
Určení tvrdosti se provádí vrypem do zkoušeného materiálu. Tato metoda se používá v mineralogii. U technických materiálů tato metoda není příliš vhodná z toho důvodu, že stupně Mohsovy stupnice jsou nerovnoměrně rozdělené a poměrně velké. [7]

Tab. 2. Mohsova stupnice tvrdosti a tvrdost některých látek podle této stupnice: [8]

Látka	Mohsova stupnice tvrdosti	Látka	Tvrdost podle Mohsovy stupnice
mastek	1	grafit	1,2
sádrovec	2	olovo	1,5
vápenec	3	cin	1,8
fluorit	4	asfalt	1.2
apatit	5	hliník	2,9
živec	6	měď	3
křemen	7	skla	4,5-6,5
topas	8	křemík	7
korund	9	oceli	5-8,5
diamant	10	karbid křemíku	9,5-10

2.2 Zkoušky vnikací

Pro zjišťování tvrdosti materiálů jsou vnikací zkoušky nejpoužívanější. U těchto zkoušek zatlačujeme do zkušebního materiálu velmi tvrdé těleso. Mezi tyto tělesa patří kulička, kužel a jehlan. Jako měřítko tvrdosti je považována velikost vzniklého vtisku (hloubka, průměr nebo úhlopříčka). K nejznámějším vnikacím zkouškám patří zkoušky podle Rockwella, Brinella a Vickerse. Neželezné kovy (Cu, Sn, Pb, Al a jejich slitiny) nejčastěji zkoušíme podle metody Brinella. Metoda Rockwell sou používá pro tvrdé a kalené materiály. Metoda Brinell a Rockwell mají určité nevýhody, tyto nevýhody odstraňuje metoda Vickers a je nejpoužívanější. [1]



Obr. 1. Zkoušky tvrdosti. a) kuličkou z tvrdokovu, b) diamantovým kuželem (HRC, HRA), c) kuličkou (HRB, HRD, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK), d) diamantovým hrotem-čtyřbokým jehlanem [1]

2.2.1 Metoda Brinell

„Při přípravě normy ČSN EN ISO 6506 se diskutovalo hodně o tom, zda nahradit používání ocelové kuličky – jako vnikacího tělesa – kuličkou z tvrdokovu („tvrdého materiálu“)*, a to z těchto důvodů“:

- kulička z tvrdokovu má ve srovnání s ocelovou kuličkou menší zbytkovou deformaci, což vede k vyšší spolehlivosti při měření tvrdosti;
- kulička z tvrdokovu dovoluje větší počet zkoušek;
- oba typy kuliček dávají prakticky shodné výsledky pro tvrdost jen do hodnoty tvrdosti 350 HB
- ocelová kulička je zavedena v odpovídající normě ISO.

*) Pro tvrdokov se doporučuje toto složení:

Kobalt (CO) 5 až 10 %,

Souhrn jiných karbidů 2 %,

Karbid wolframu (WC) zbytek do 100 %.

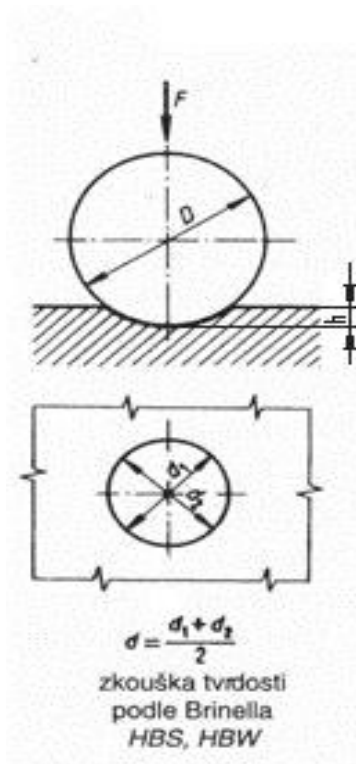
Hustota tvrdokovů je $14,8(\pm 0,2)\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Tvrdość kuličky nesmí být menší než 1000 HV (ISO 3878), kuličky se vyrábějí o průměru 10, 5, 2,5 a 1 mm. [1]

2.2.1.1 Podstata zkoušky

Zkouška se provádí na povrchu dané součástky nebo na povrchu zkušební tělesa. Povrch musí být rovný, hladký, bez okují a důležité je, aby byl bez mazadel.

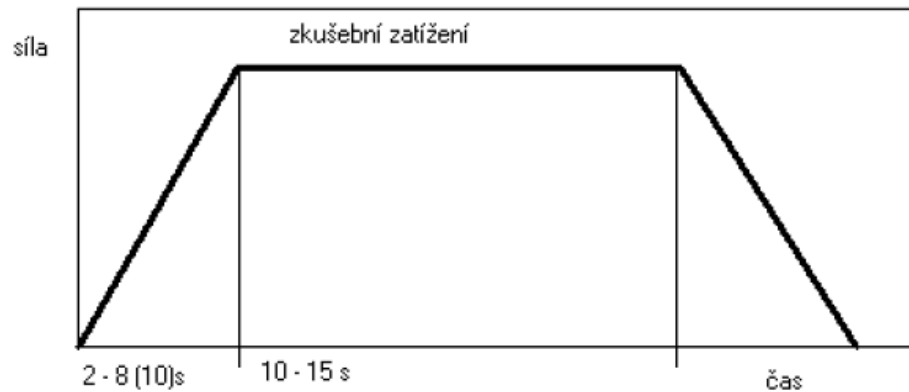
Podstata zkoušky spočívá ve vtlačování vnikacího tělesa do povrchu zkoušeného tělesa. Změření vtisku o průměru d , který je aritmetickým průměrem dvou na sebe kolmých rozměrů d_1 a d_2 . Tento vtisk zůstane na povrchu tělesa po odlehčení zatížení F . Jako vnikací těleso se používá kulička z tvrdokovu, kterou můžeme používat pro tvrdość do 650 HBW. [1]



Obr. 2. Metoda Brinell [1]

2.2.1.2 Provedení zkoušky

- Tloušťka zkušební vzorku musí mít minimální tloušťku alespoň osminásobek hloubky vtisku h (Obr. 2).
- Při zkoušce je nutné zvolit zkušební zatížení, které odpovídá zkoušenému materiálu a velikosti kuličky. Poměr zatížení k průměru kuličky musí být vybrán s ohledem na zkoušený materiál a jeho tvrdost.
- Teplota měření musí být 10 až 35 °C, v arbitrážních případech je teplota 23 ± 5 °C
- Doba počátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí být kratší než 2 s a nesmí být delší než 8 s. Doba působení plné zkušební síly je v rozmezí 10 až 15 s.
- Zkušební zatížení musí být zvoleno tak, aby průměr vtisku byl v rozmezí $0,24D$ až $0,60D$.
- Vzorek musí být při zkoušce na tuhé podložce a upevněn tak, aby se při zkoušce nepohnul.
- Vnikací těleso se zatlačuje do povrchu vzorku zatížením, které směřuje kolmo k jeho povrchu.
- Vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku je nutné volit větší, než 2,5 násobek průměru vtisku (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny). A větší než 3 násobek průměru vtisku pro měření lehkých kovů (olovo, cín a jejich slitiny).
- Vzdálenost středů dvou sousedních vtisků je nutné volit větší, než 4 násobek průměru vtisku (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny). A minimálně 6 násobek průměru vtisku pro měření lehkých kovů (olovo, cín a jejich slitiny).
- Po provedení zkoušky se měří průměr každého vtisku ve dvou na sebe kolmých směrech. Jako směrodatná hodnota vtisku pro stanovení tvrdosti se bere průměrná hodnota velikosti vtisku. [1,9]



Obr. 3. Průběh zkušebního zatížení – Metoda Brinell [9]

2.2.1.3 Určení tvrdosti

Tvrдость podle Brinella se označuje HBW. Určuje se jako poměr zatížení a povrchu vtisku. Hodnota tvrdosti se následně zjistí v normách. [1]

Tvrдость podle Brinella HBS, nebo podle HBW je dána vzorcem :

$$HB = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

F zkušební síla [N]

D průměr kuličky [mm]

d průměr vtisku [mm]

koeficient $0,102 = 1 / 9,80665$ [9]

2.2.1.4 Zápis hodnoty tvrdosti

Hodnota tvrdosti	Symbol tvrdosti	Rozměr vnikacího tělesa	Velikost zkušebního zatížení	Doba působení zkušebního zatížení *)
XXX	HBW	XX	XXX	XX

Obr. 4. Obecné schéma značení zkoušky tvrdosti podle Brinella [1]

*) Uvádí se tehdy, liší-li se od stanovené doby, tj. (10 až 15) s.

Pro názornost uvedu příklad značení:

350 HBW 5/750 - Tvrdost podle Brinella o velikosti 350 stanovená kuličkou z tvrdokovu. Průměr kuličky 5 mm při zkušebním zatížení 7,355 kN, trvajícím po dobu od 10 do 15 s. [1]

2.2.1.5 Přesnost zkoušky

Přesnost zkoušky podle Brinella především závisí na správném proměření vtisku. Toto je jedna z několika nevýhod zkoušky podle Brinella, protože je to mnohdy obtížné. V současné době se k měření vtisků více a více používá optických měřicích zařízení (optický světelný displej, číselníkový úchylkoměr nebo digitálně elektronické údaje).

Hodnoty tvrdosti obecně nelze převést na jiné tvrdosti nebo pevnost v tahu. Přepočty lze použít jen tehdy, jsou-li k dispozici spolehlivé podklady. [1]

„Praxe uvádí empiricky zjištěnou přímou závislost mezi tvrdostí a pevností v tahu u kovových material vztahem: $R_m \approx (3,1 \text{ až } 4,1) \text{ HBW}$. Pro nelegované oceli platí $R_m \approx 3,6 \text{ HBW}$.“ [1]

Přehled možných chyb:

- Chyby zapříčiněné odchylkou zatěžovací síly
- Odchylky od předepsaného průměru kuličky
- Chyby vzniklé měřením rozměrů vtisku
- Chyby zapříčiněné nedodržením předepsaných podmínek zkoušky [9]

2.2.1.6 Brinellové tvrdoměry

Brinellové tvrdoměry mají různé provedení a různou velikost. Pro malé dílny, montáže, sklady nebo pro zkušební účely na stavbách byly vyrobeny malé a jednoduché přístroje. Nejznámějším a nejpoužívanějším z nich je ruční přenosný tvrdoměr Poldi. V laboratořích a továrnách, kde zkoušky probíhají celý pracovní den, byly zkonstruovány velké a stabilní přístroje. [1]

2.2.1.7 Modifikovaná metoda měření tvrdosti HBT

Princip této metody spočívá ve zjištění tvrdosti zkoušeného materiálu z hloubky vtisku, který vznikne při působení síly na indentor. Tato metoda se většinou používá v případech, kdy je nutno automatizovat měřicí proces (linka pro zušlechťování materiálu apod.).

$$HBT = \frac{F \cdot 0,102}{\pi \cdot D \cdot h} + k_1 + k_2 \quad (2)$$

HBT tvrdost podle Brinella určená z hloubky vtisku

F působící síla [N]

D průměr kuličky [mm]

h hloubka vtisku [mm]

k_1 korekční konstanta tvrdoměru

k_2 korekční konstanta materiálu

U měření hloubky vtisku (HB- HBT) modifikovanou metodou jsou zjištěny odchylky tvrdosti. Tyto odchylky jsou korigovány konstantami k_1 a k_2 . Při měření měkkých materiálů se velikost odchylek pohybuje přibližně od 3 do 4 %. Pro středně tvrdé materiály je velikost odchylky 1 % a pro tvrdé materiály odchylka dosahuje velikosti 3,5 % naměřené hodnoty tvrdosti. [9]

2.2.2 Metoda Rockwell

Zkouška metodou Rockwell se podle normy ČSN EN ISO 6508 provádí na Rockwellově tvrdoměru. Tvrdost se zjišťuje jako rozdíl hloubky vtisku diamantového kužele nebo ocelové kuličky mezi předběžným a celkovým stupněm zatížení. Účel předběžného zatížení spočívá ve vyloučení nepřesností z měřené hloubky na povrchu měřeného vzorku. [1,10]

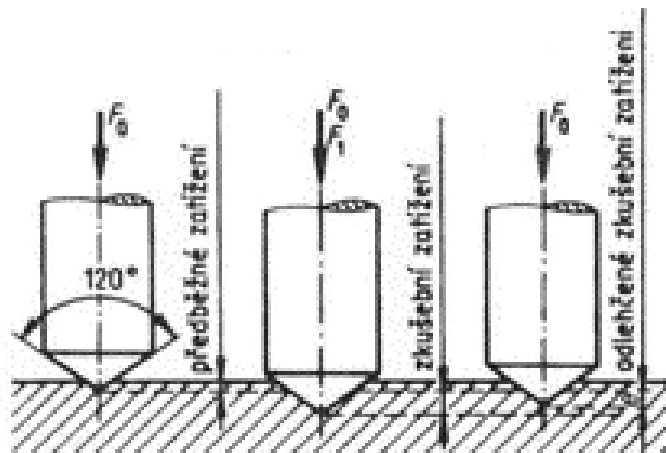
2.2.2.1 Podstata zkoušky

Zkouška tvrdosti podle Rockwella spočívá v postupném vtlačování indentoru do povrchu zkušebního tělesa. Vtlačování má dva stupně zatížení, předběžné a přidavné. Po vtlačení indentoru se měří hloubka vtisku h (jednotka měření $h = 0,002$ mm).

Indentorem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° nebo kulička z tvrdokovu o průměru 1,5857 nebo 3,175 mm. Celkové zkušební zatížení F je složeno ze dvou zatížení. Z předběžného $F_0 = 98,07$ N a přídavného F_1 , které je různé podle stupnice tvrdosti. [1]

$$F = F_0 + F_1 \quad (3)$$

F	celkové zkušební zatížení	[N]
F_0	předběžné zatížení	[N]
F_1	přídavné zatížení	[N]



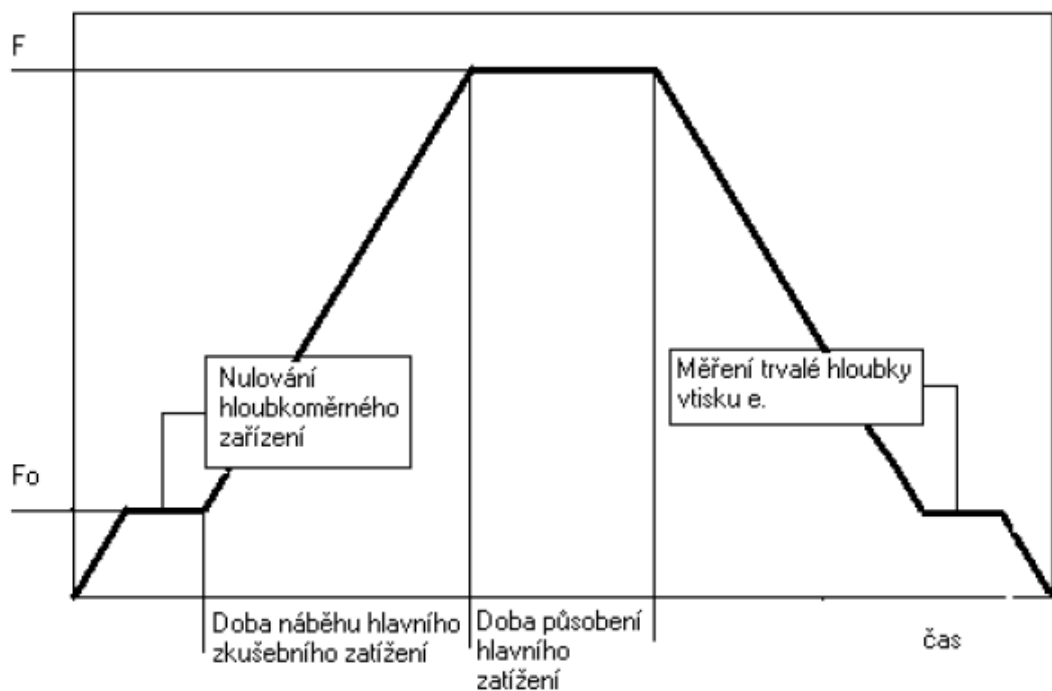
Obr. 5. Metoda Rockwell [1]

2.2.2.2 Provedení zkoušky

Diamantový kužel nebo kulička vyrobená z tvrdokovu se zatíží předběžnou silou F_0 . Indentoru musí být před zatížením ve výchozí poloze. Výchozí polohou je v tomto případě povrch zkoušeného tělesa. Poté sílu zvolna zvětšujeme o přídavné zatížení F_1 . Toto zatěžování trvá do doby, než dosáhneme celkového zatížení F předepsané normou. Následuje odlehčení přídavného zatížení až na předběžné zatížení F_0 a stanovení hloubky vtisku h . [1]

- Zkouška se obvykle provádí při teplotách 10 až 35°C , v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Při zkoušce musí být vzorek položen na tuhé podložce a zajištěn tak, aby při zatěžování nedošlo k pohybu zkoušeného vzorku. Styčné plochy musí být čisté a bez známek cizích tělísek.

- Indentor se zatlačuje do povrchu zkoušeného materiálu zatížením, které směřuje kolmo k jeho povrchu. Zatížení je bez rázů a chvění až na hodnotu předzatížení. Po dosažení této hodnoty se nuluje měřicí zatížení hloubky vtisku.
- Doba náběhu hlavního zatížení se pohybuje v rozmezí 2 až 8 sekund u metod HRA až K. Pro metody HRxx N a T je rozmezí 1 až 8 sekund.
- Doba působení hlavního zatížení:
 - 1 až 3 s pro materiály, které nevykazují závislost plastické deformace na čase.
 - 1 až 5 s pro materiály, které vykazují omezenou závislost plastické deformace na čase.
 - 10 až 15 s pro materiály, které vykazují silnou závislost plastické deformace na čase.



Obr. 6. Průběh zkušebního zatížení – Metoda Rockwell [9]

- Pro metody HRA až K platí:
 - Minimální vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být alespoň 4 násobek průměru vtisku. Ale nejméně 2 mm.
 - Minimální vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku.

- Pro metody HRxxN a T platí:
 - Minimální vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být alespoň 3 násobek průměru vtisku.
 - Minimální vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku. [9]

2.2.2.3 Určení tvrdosti

Tvrдость podle Rockwella se určuje z hodnoty h a dvou konstant, N (číslo charakterizující stupnici) a S (jednotková stupnice). Z těchto hodnot se pomocí vzorce (4) vypočítá tvrdost: [1]

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad (4)$$

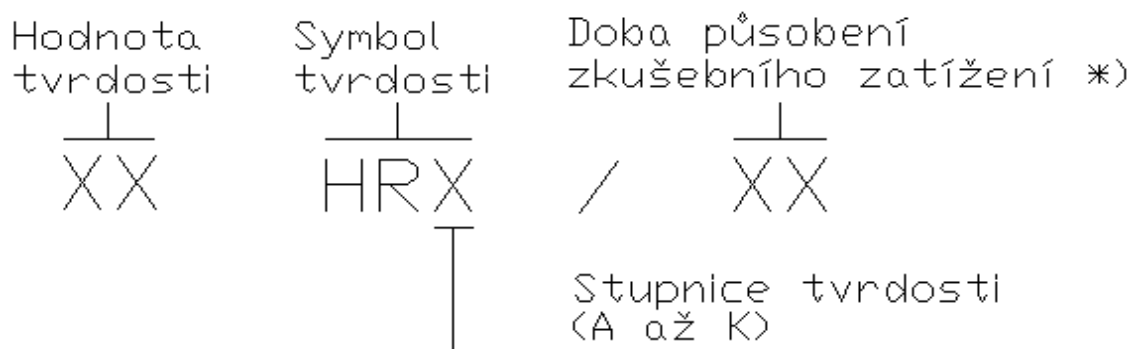
N	číslo charakterizující stupnici	[-]
h	hloubka vtisku	[mm]
S	jednotková stupnice	[-] [1]

U většiny tvrdoměrů, které jsou vyrobeny pro tuto zkoušku tvrdosti je provedena úprava. Úprava spočívá v tom, že je možné odečíst hloubku vtisku na číselníkovém úchylkoměru, kde ukazatel na tomto číselníku udává přímo tvrdost podle Rockwella. Tato zkouška je snadná, rychlá a na zkoušeném vzorku zanechává male vtisky o max. hloubce 0,2 mm.

Zkouška se provádí pro běžnou kontrolu velkosériových výrobků a tam, kde již není metoda Brinellova vhodná. Zkouška podle Rockwella se nejvíce osvědčila v kalírnách.

Hodnoty tvrdosti podle HR nelzou obecně převést na jiné tvrdosti, popř. pevnost v tahu. Přepočty mohou být použity jen tehdy, jsou-li k dispozici spolehlivé podklady. [1]

2.2.2.4 Zázpis hodnoty tvrdosti



Obr. 7. Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Rockwella [1]

*) Uvádí se tehdy, liší-li se od stanovené doby, tj. 10 až 15 s.

Pro názornost uvedu příklad značení:

59 HRC – Tvrdost podle Rockwella měřená na stupnici C. Indentor je diamantový kužel.

U materiálů s malou tloušťkou nebo pro malé tloušťky povrchových vrstev je postup měření tvrdosti podobný. Změna je jen ve velikosti zkušebního zatížení a způsobu jeho značení.

Pro názornost uvedu příklad značení:

70 HR30N – Tvrdost podle Rockwella naměřená na stupnici 30 N. Celkové zkušební zatížení činí 294,2 N. [1]

2.2.2.5 Stupnice a rozsahy použití metody Rocwell

Tab. 3. Vnikací tělesa a zkušební síly s předzatížením 98,07 N [1]

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Typ vnikacího tělesa	Předběžné zatížení F ₀ [N]	Přídavné zatížení F ₁ [N]	Celkové zatížení F [N]	Oblast použití
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 až 88
B	HRB	Ocelová kulička 1,5875 mm	98,07	822,6	980,7	20 až 100
C	HRC	Diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 až 70
D	HRD	Diamantový kužel	98,07	822,6	980,7	40 až 77
E	HRE	Ocelová kulička 3,175 mm	98,07	822,6	980,7	70 až 100
F	HRF	Ocelová kulička 1,5875 mm	98,07	490,3	588,4	60 až 100
G	HRG	Ocelová kulička 1,5875 mm	98,07	1373	1471	30 až 94
H	HRH	Ocelová kulička 3,175 mm	98,07	490,3	588,4	80 až 100
K	HRK	Ocelová kulička 3,175 mm	98,07	1373	1471	40 až 100

Tab. 4. Vnikací tělesa a zkušební síly s předzatížením 29,42 N [9]

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Typ vnikacího tělesa	Předběžné zatížení Fo [N]	Přídavné zatížení F ₁ [N]	Celkové zatížení F [N]	Oblast použití
15 N	HR 15 N	Diamantový kužel	29,42	117,7	147,1	70 až 94
30 N	HR 30 N	Diamantový kužel	29,42	264,8	294,2	42 až 86
45 N	HR 45 N	Diamantový kužel	29,42	411,9	441,3	20 až 77
15 T	HR 15 T	Ocelová kulička 1,5875 mm	29,42	117,7	147,1	67 až 93
30 T	HR 30 T	Ocelová kulička 1,5875 mm	29,42	264,8	294,2	29 až 82
45 T	HR 45 T	Ocelová kulička 1,5875 mm	29,42	411,9	441,3	1 až 72

2.2.2.6 Zkušební vzorky

Zkouška tvrdosti podle Rockwella se provádí na vzorcích, které musí splňovat následující body:

- Příprava povrchu se provádí způsobem, aby byla minimálně omezena změna jeho vlastností (např. tvářením při řezání, leštění, broušením nebo ohřevem).
- Povrch zkušebního tělesa musí být rovný, hladký, bez cizích tělísek a okujené vrstvy. Důraz se klade na to, aby byl povrch zcela bez mazadel. Výjimkou je titan, u kterého mazadlo může být použito, nutnost je ovšem tuto skutečnost uvést do protokolu.
- Tloušťka zkoušeného vzorku musí být minimálně 10-ti násobek hloubky vtisku. Deformace způsobená vnikáním indentoru nesmí být patrná na protilehlé straně tělesa.
- U vypuklých povrchů (kulový, válcový), se při měření používá opravných součinitelů. Tyto součinitele jsou uváděny v přílohách norem. Výjimkou jsou tvrdoměry Qness, ty používají součinitele po zadání průměru zakřivené plochy automaticky.
- V případech, kdy nejsou s dispozici opravné součinitele pro vyduté válcové plochy a pro plochy kulové, musí být zkouška na těchto plochách předmětem dohody.
- Mimořádná pozornost je kladena u zkoušky na zaobleném povrchu. Vypuklá strana musí být obrácena k indentoru. V případě, kdy je k indentoru obrácen vydutý povrch, může dojít k chybám. Tyto chyby jsou zapříčiněny zploštěním tělesa v podložce. [9]

2.2.2.7 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Rockwell

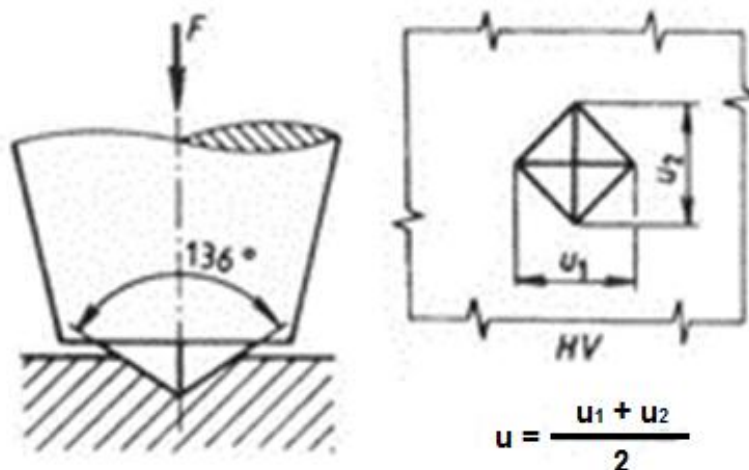
- Chyby způsobené odchylkou zatěžovací síly:
 - Chyba předběžného zatížení
 - Chyba celkového zatížení – Velikost odchylky je nepřímo úměrná tvrdosti zkoušeného vzorku.
- Chyby způsobené odchylkou vrcholového úhlu kužele a odchylka průměru kuličky.
- Chyby způsobené nedodržením předepsaných zkušebních podmínek:
 - Rozdílná rychlost vnikání a přísunu indentoru.
 - Rozdílná doba působení zatěžující síly.
 - Rázy a vibrace v průběhu zkoušky.
 - Nedostatečná úprava povrchu v místě zkoušky.
 - Nedodržení předepsaných vzdáleností mezi vtiskem a okrajem nebo mezi jednotlivými vtisky.
 - Nezapočítání korekčního faktoru na zakřivené ploše při nedostatečné tloušťce vzorku [9]

2.2.3 Metoda Vickers

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je velmi přesná a minimálně závislá na zatížení. Podléhá normě ČSN EN ISO 6507 a lze ji použít pro všechny tvrdosti. Měření se provádí na stroji nazývaném Vickersův tvrdoměr a Vickersova zkouška se označuje HV. [1]

2.2.3.1 Podstata zkoušky

Metoda měření tvrdosti podle Vickerse spočívá ve vtláčování indentoru – diamantového čtyřbokého jehlanu do zkušebního tělesa. Indentor do materiálu vniká zkušebním zatížením F po stanovenou dobu. Poté se změří úhlopříčky vtisku, které zůstanou na povrchu zkušebního tělesa po odlehčení zatížení. U úhlopříček vtisku se zjišťuje aritmetický průměr délek úhlopříček u_1 a u_2 . Diamantový čtyřboký jehlan má vrcholový úhel $136^\circ \pm 0,5^\circ$. [1]



Obr. 8. Metoda Vickers [1]

2.2.3.2 Typy zkoušek a rozsahy použití

Metoda Vickers se dělí na 3 oblasti dle použitého zkušebního zatížení:

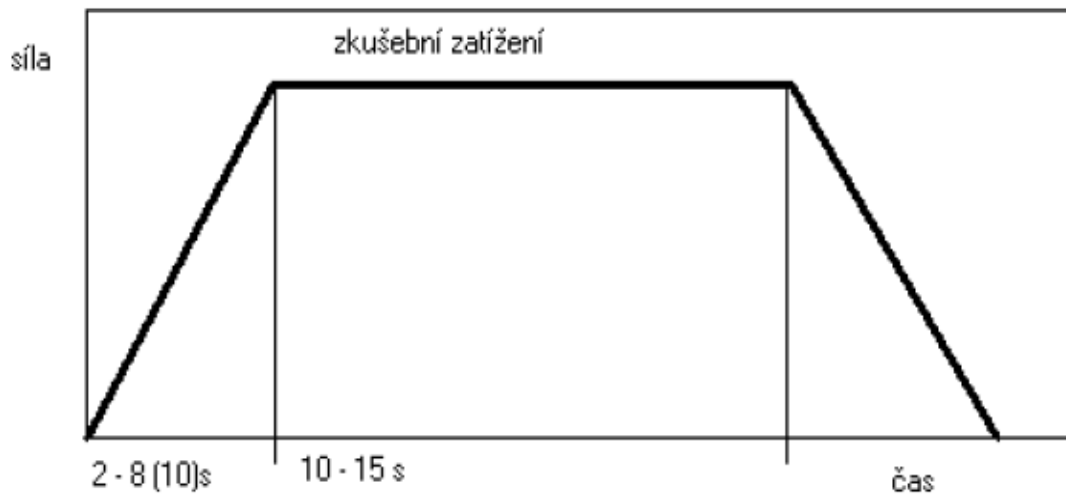
Tab. 5. Členění metody Vickers [1]

Označení	Symbol tvrdosti HV	Zkušební zatížení F [N]
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	$\geq HV 5$	$F \leq 49,03$
Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení	HV 0,2 až HV 5	$1,961 \leq F \leq 49,03$
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	$HV 0,01 < HV 0,2$	$0,09807 \leq F < 1,961$

2.2.3.3 Provedení zkoušky

- Měření se obvykle provádí při teplotě 10 až 30 °C, v arbitrážních případech při teplotě 23 ± 5 °C.
- Zkoušené těleso musí být upevněno na tuhé podložce tak, aby se při působení zatížení nepohnul. Je třeba dbát na to, aby byly styčné plochy bez cizích tělísek a čisté.
- Při zatěžování musí indentor směřovat kolmo k povrchu do kterého vniká. Zatížení musí proběhnout bez chvění a rázů. Doba, která uběhne od začátku zatěžování do dosažení zkušební síly, musí být v intervalu od 2 do 8 s. U zkoušky tvrdosti s nízkým zatížením nesmí doba zatížení překročit 10 s.

- Doba, po kterou působí zkušební síla je v intervalu od 10 až do 15 s. U některých materiálů lze použít větší intervaly, musí se však dbát na toleranci ± 2 s.



Obr. 9. Průběh zkušebního zatížení – Metoda Vickers [9]

- Minimální vzdálenost mezi okrajem vzorku a středem vtisku musí být:
 - 2,5 násobek velikosti úhlopříčky pro: ocel, měď a její slitiny, litina
 - 3 násobek velikosti úhlopříčky pro: lehké kovy, olovo, cín a jeho slitiny
- Minimální vzdálenost středů dvou sousedních vtisků musí být:
 - 3 násobek velikosti úhlopříčky pro: ocel, litinu, měď a její slitiny
 - 6 násobek velikosti úhlopříčky pro: lehké kovy, olovo, cín a jeho slitiny
- Po uplynutí zatížení se změří délky úhlopříček (bere se jejich aritmetický průměr). Úhlopříčky se rovnému povrchu zkušebního tělesa nesmí lišit o více než 5 % střední hodnoty. [9]

2.2.3.4 Určení tvrdosti

Diamantový indentor s tvarem pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami je zatížením zatlačován do povrchu zkoušeného materiálu. Po skončení zkušebního zatížení F je měřena úhlopříčka vtisku. Výsledná tvrdost podle Vickerse se vyjádří jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku. Plocha se uvažuje jako pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou s vrcholovým úhlem, který se rovná úhlu indentoru. [9]

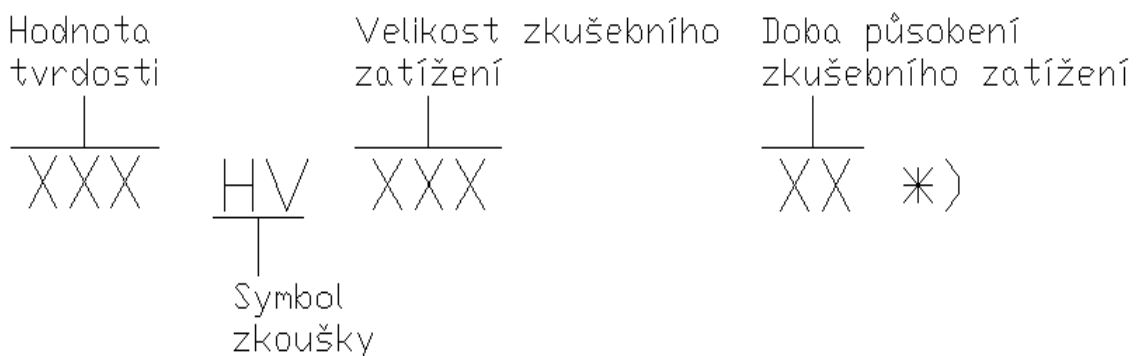
Z těchto hodnot se pomocí vzorce vypočítá tvrdost:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (5)$$

F zkušební zatížení [N]

d aritmetický průměr dvou délek úlopříček d_1 a d_2 [mm] [9]

2.2.3.5 Zápís hodnoty tvrdosti



Obr. 10. Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Vickerse [1]

*) Uvádí se tehdy, liší-li se od stanovené doby, tj. 10 až 15 s

Pro názornost uvedu příklad značení:

640 HV 30 – Tvrdost podle Vickerse 640. Naměřená při zkušební zatížení 294,2 N. Doba působení zatížení od 10 do 15 s.

Metoda měření podle Vickerse lze použít pro všechny tvrdosti, je velmi přesná a je téměř nezávislá na zatížení. Zkouška se provádí na Vickersových tvrdoměrech, tzv. Diatestorech. Ty můžeme často potkat ve velkých závodech. U diatestorů je obraz čtvercového vtisku promítán ve zvětšeném měřítku na matnici. Tento způsob nám umožňuje pohodlné odečtení délky úhlopříčky.

Hodnoty tvrdosti podle HV obecně nelze převést na jiné tvrdosti nebo pevnost v tahu. Takové přepočty mohou být použity pouze tehdy, jsou-li k dispozici spolehlivé podklady. [1]

2.2.3.6 Vnikací tělesa a zkušební síly

Indentor je shodný pro všechny metody Vickers. Jde o diamantové vnikací těleso s tvarem pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou (pyramida) s vrcholovým úhlem $136^\circ \pm 5^\circ$. [9]

Tab. 6. Zkušební zatížení při zkoušce tvrdosti metodou Vickers [9]

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při malém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	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

2.2.3.7 Přehled možných chyb při měření metodou Vickers

- Chyby způsobené odchylkou zatěžovací síly. – velikost chyby číselné hodnoty tvrdosti je lineárně přímo úměrná chybě zatěžovací síly.
- Chyby způsobené odchylkou od vrcholového úhlu stěn.
- Chyby způsobené při měření délky úhlopříčky.
- Chyby způsobené nedodržením předepsaných zkušebních podmínek:
 - Rozdílná doba působení zatěžovací síly.
 - Rozdílná rychlost přísunu indentoru.
 - Mechanické zpevnění povrchové vrstvy, oduhličení povrchové vrstvy.
 - Rázy a vibrace v průběhu zkoušky.
 - Nezapočítání korekčního faktoru u měření zakřivené plochy.
 - Malá tloušťka zkoušeného vzorku.
 - Povrchové napětí v místě zkoušky.
 - Nedodržení předepsaných vzdáleností mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem tělesa. [9]

3 ZKOUŠKY DYNAMICKÉ

U dynamických zkoušek tvrdosti působí indentor na zkoušený předmět rázem po zlomek sekundy. Tento způsob měření má méně přesné výsledky než u statických zkoušek tvrdosti. Zkoušky dynamické se převážně užívají pro měření tvrdosti velkých výrobků a konstrukcí. Tvrdost se určuje z plastické deformace povrchu zkoušeného předmětu – zkoušky vnikací neboli vtiskové. Nebo se tvrdost určuje z velikosti odrazu indentoru – zkoušky odrazové. [1,2]

3.1 Zkoušky dynamické – vnikací

Zkoušky dynamické vnikací, neboli také vtiskové jsou obdobou zkouškám statickým. Podstatou dynamických vnikacích zkoušek je vržení zkušební tělíska z určité vzdálenosti proti zkoumanému předmětu, nebo na zkoumaném předmětu zkušební tělísko spočívá a je jiným rázem tělesa do něj vtisknuto. Patří k nim například měření tvrdosti pomocí Baumanna kladívka a pomocí kladívka Poldi. U těchto metod je vakacím tělesem kulička. [2,11]

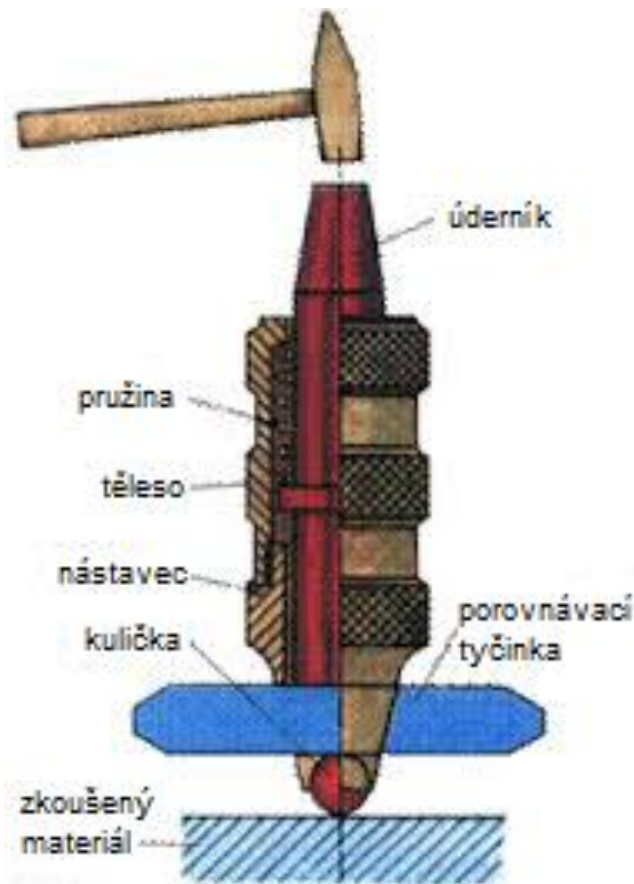
3.1.1 Metoda Poldiho kladívka

Tato zkouška patří mezi dynamické vnikací zkoušky. Tvrdoměr pracuje na principu porovnávání pevnosti materiálu porovnávací tyčinky, u které známe hodnoty a pevnosti zkoušeného materiálu.

Způsob měření tvrdoměrem Poldi probíhá následujícím způsobem:

Tvrdoměr přiložíme ke zkoušenému předmětu a nástrojem (nejčastěji kladívko) udeříme na úderník. Nárazem kladívka do úderníku se ocelová kulička zatlačí do zkoušeného materiálu. Tato kulička vytvoří vtisk ve zkoušeném materiálu a zároveň také do porovnávací tyčinky. Následně se lupou, nebo jiným měřícím přístrojem změří průměry vtisků na obou plochách. Součástí každého tvrdoměru jsou tabulky, ve kterých následně podle velikosti vtisku určíme tvrdost zkoušeného materiálu.

Tento způsob měření je ovšem zatíženo poměrně značnou chybou, která je až $\pm 10\%$. Z tohoto důvodu je nutné na hodnotu tvrdosti stanovené pomocí kladívka Poldi hledět jen jako na hodnotu informativní. [1,9]



Obr. 11. Ruční tvrdoměr Poldi [10]

3.1.2 Metoda Baumannova kladívka

Způsob měření tvrdosti podle Baumannova kladívka spočívá v přímé metodě, kdy je rázová energie k vytvoření vtisku vyvozena pružinou. Kulička o průměru 5 nebo 10 mm se úderem razníku, který je stlačen pružinou, vtlačuje do zkoušeného materiálu. Podstata je v přiložení přístroje s kuličkou kolmo nad zkoušený povrch. Poté vyvozením tlaku na zaboblený konec pláště stlačíme pružinu uvnitř pláště. Po stlačení pružiny na potřebnou délku se pomocí západky odjistí pružina a ta vymrští razník. Razník dopadne na držák s kuličkou a ta vytvoří vtisk do zkoušeného předmětu. Po provedení zkoušky se pomocí lupy a měřítka změří průměr vtisku d a podle něj se ve zvláštní tabulce, která je součástí přístroje určí tvrdost materiálu. U metody Baumannova kladívka není nutné používat etalon a to z toho důvodu, že síla úderu razníku je při stejném stlačení pružiny vždy stejně velká. [2,11]

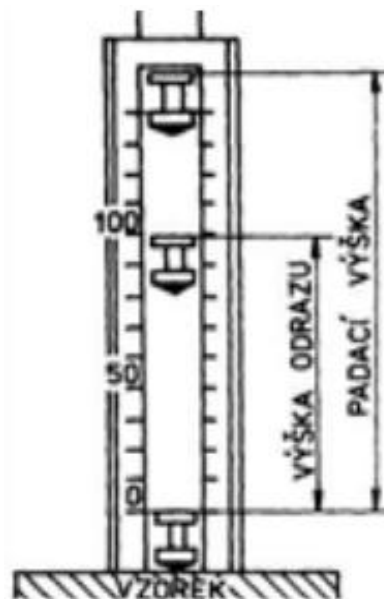
3.2 Zkoušky dynamické – odrazové

Zkoušky dynamické odrazové jsou založeny na měření tvrdosti na základě pružného odrazu tělesa, které padá z určité výšky na povrch zkoušeného předmětu.

Výška, nebo úhel odrazu od tohoto předmětu nám poté charakterizuje tvrdost zkoušeného materiálu. Při nárazu indentoru na zkoušený povrch se část kinetické energie spotřebuje na nevratnou plastickou deformaci a zbývající energie se projeví odrazem indentoru. Součet pružné a trvalé energie nám dá energii celkovou. Poměr energie trvalé a pružné nám dá tvrdost materiálu, ovšem tvrdost dosažená metodou odrazovou není tak přesná jako metodou statickou. [11]

3.2.1 Metoda Shore

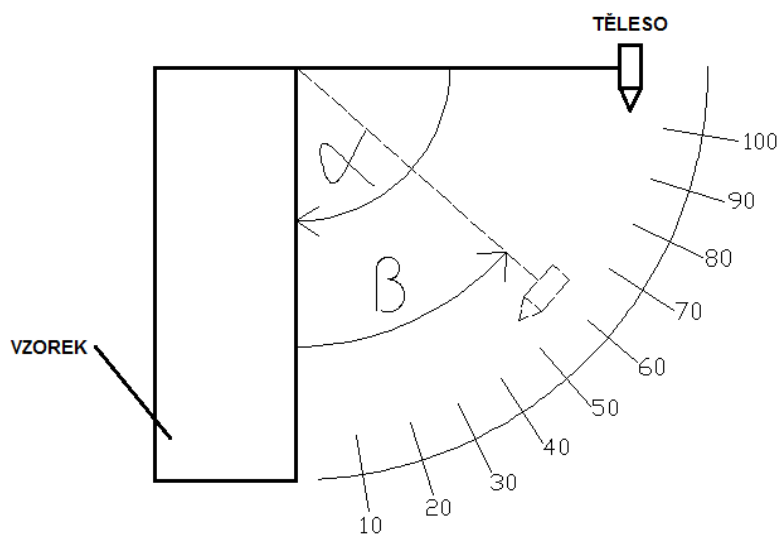
Princip metody Shore je založen na pružném odrazu závaží, které je spuštěno z určité výšky od zkoušeného povrchu. Závaží neboli dopadající těleso má válcový tvar a je ukončeno diamantovým hrotem s poloměrem zaoblení 1 mm. Závaží je do počáteční výšky zvednuto např. vysátím vzduchu nad závažím nebo použitím tažné pružiny. Z dosažené výšky po odrazu se odečte míra tvrdosti HSh. U moderních přístrojů je vyhodnocení elektronické a lze jej převést na jiné stupnice tvrdosti. Porovnání je ovšem možné jen u materiálů s přibližně stejným modulem pružnosti. [1,9,11]



Obr. 12. Shoreho skleroskop [11]

3.2.2 Metoda Duroskop

Metoda se řadí mezi kyvadlové zkoušky. Podstata je ve spuštění normalizovaného tělíska o počátečním úhlu α , který svírá mezi svislou stěnou (zkoušený materiál) a definovaným normalizovaným tělískem. Měří se úhel β , do něhož se zkušební tělísko po dopadu odrazí. U modernějších duroskopů bývá měřítko odskoku přímo kalibrováno na jednotky tvrdosti. [11]



Obr. 13. Schéma měření tvrdosti Duroskopem [11]

4 OCELI

Ocel je v současnosti stále nejdůležitějším technickým materiálem pro své technologické a mechanické vlastnosti. Je to všestranný materiál z hlediska použití a z tohoto důvodu vyrábíme oceli o nejrůznějších vlastnostech. [1]

„Dosavadní ČSN stanovující klasifikaci, složení a vlastnosti ocelí podle našich národních zkušeností a požadavků jsou nyní přepracovávány a upravovány z hlediska mezinárodních a evropských norem (ISO a EN). Smyslem toho je dosáhnout zejména podstatného zlepšení stavu norem na základě zkušeností shromážděných v minulosti a nejnovějšího vývoje v hutním a ocelářském průmyslu, přizpůsobení našich norem (ČSN) normám ISO a EN“. [1]

Ocel je materiál, který má hmotnostní podíl železa větší, než kteréhokoli jiného prvku. Všobecně mají oceli obsah uhlíku $< 2\%$ a obsahují i jiné prvky. Hodnota 2% je považována za mezní pro rozdělení mezi ocelí a litinou, avšak některé chromované oceli mohou obsahovat i více než 2% C. [1]

4.1 Rozdělení ocelí podle stupně legování

Legující prvky nám zlepšují vlastnosti dané oceli a rozděluje je na :

- Oceli nelegované – obsahy jednotlivých prvků nedosahují mezních obsahů dané normou
- Oceli legované – obsahy jednotlivých prvků, nebo minimálně jednoho z nich dosahují nebo překračují mezní obsahy dané normou [1]

4.2 Rozdělení ocelí podle hlavních skupin jakosti

Tab. 7. Druhy ocelí podle hlavních skupin jakosti [1]

Hlavní skupiny ocelí	Druhy ocelí
Nelegované oceli	Oceli obvyklých jakostí
	Nelegované jakostní oceli
	Nelegované ušlechtilé oceli
Legované oceli	Legované jakostní oceli
	Legované ušlechtilé oceli

4.3 Třídy ocelí

Dle chemického složení dělíme oceli na třídy 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 19. Oceli třídy 10 jsou dle chemického složení nejméně kvalitní a s nezaručeným složením a třídy 19 nejvíce kvalitní se zaručenými vlastnostmi. S číselným označením ocelí roste cena, kvalita, čistota a zaručené chemické složení. [1]

4.4 Značení ocelí

Dle našich norem lze oceli značit dvěma způsoby. Jeden ze způsobů značení je pomocí barev, druhý způsob značení je pomocí čísel. [1]

4.4.1 Číselné značení ocelí

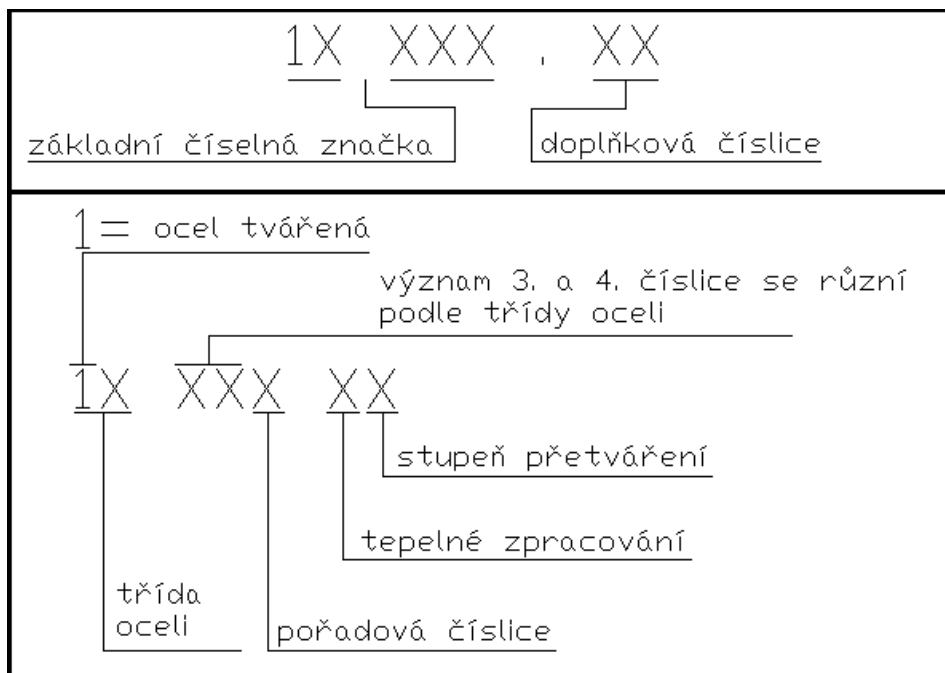
Číselné značení se skládá ze základní číselné značky a z doplňkových číslic.

- Základní číselná značka – jde o pětimístné číslo a je to základní označení materiálu
 - První číslice – číslo označuje, že jde o ocel k tváření
 - Druhá číslice – ve spojení s první číslicí označuje třídu jakosti oceli
 - Třetí a čtvrtá číslice – její význam se liší s třídou oceli
 - Pátá číslice – tato číslice má pořadový význam
 - Číslo normy jakosti – dle příslušné značky oceli jde o šestimístné číslo, které vznikne předřazením číslice 4 před základní číselnou značku
 - Doplňkové číslice – od základní číselné značky jsou odděleny tečkou

Doplňkové číslice se dělí na:

- První doplňková číslice – udává nám tepelné zpracování oceli oceli
- Druhá doplňková číslice – udává konečný stupeň přetváření u ocelových pásů a plechů [1]

Tab. 8. Schéma sestavení číselného označení ocelí [1]



4.4.2 Barevné značení ocelí

Jedním až třemi barevnými pruhy označujeme normalizované výrobky z ocelí. Toto označování platí pro třídy ocelí 10 až 19. Dle normy dělíme označování na dva způsoby, první z nich je pro oceli 10 a 11 a druhý způsob platí pro oceli 12 až 17 a 19.

Pro první způsob značení, tedy pro oceli tříd 10 a 11 se používá jeden, nanejvýše dva odstíny barev. U tříd 12 až 17 a 19 se používají tři odstíny barev. Každá třída má svůj základní odstín, který je stejný pro celou třídu a jednotlivé druhy ocelí mívají ještě dvě přidružené barvy. Celkově je 13 odstínů barev a jejich označování se uvádí v materiálových listech nebo v ČSN 42 0010. Oceli se barevně označují na čele nebo na konci polotovaru. [1]

4.5 Oceli se středním obsahem uhlíku

Oceli se středním obsahem uhlíku se používají k zušlechťování. Tyto oceli se po zakalení popouští na vyšší teploty kvůli zachování vysoké houževnatosti při zachování vhodné pevnosti. Zušlechťování vede ke zlepšení mechanických vlastností ocelí. Při tomto ději se zjemní zrna a rovnoměrně rozdělí jemné a stejnoměrné karbidy. [12]

U strojních součástí na které je kladen vysoký požadavek povrchové tvrdosti se používá povrchové kalení, případně nitridace. K těmto typům zušlechťování jsou vhodné oceli ČSN 12 050, 15 230, 16 250 a 16 440. Nitridovat lze také ocel chrommolybdenovou 15 330, chromhliníkovou 14 340 a ocel chromhliníkmolybdenovou 15 340.

Součásti pro které není vhodné povrchové kalení a cementování, ale je po nich požadována velká tvrdost povrchu, se popouštějí na nízké teploty. Toto popouštění na nízké teploty se provádí z důvodu zachování vysoké tvrdosti po kalení. Oceli kalitelné na vzduchu nebo v oleji jsou pro tento způsob zušlechťování vhodné z důvodu dobrých mechanických vlastností i při vyšších tvrdostech. Patří k nim oceli ČSN 15 241, 16 341 a 16 440, jinak nazývané jako oceli k použití v kaleném stavu. Dají se také použít i pro zušlechťování. [12]

Tab. 9. Tep. zpracování ocelí se zaručenými mech. vlastnostmi za vyšších teplot [12]

Značka ocelí	Tváření	Normalizační žhání			Žhání naměkko			Kalení		Popouštění			Poznámka
	°C	°C	ochlaz.	tvrdost HB	°C	ochlaz.	tvrdost	°C	ochlaz.	°C	ochlaz.	tvrdost HB	
12 021		900 - 930	vzduch	max. 135									
12 022		900 - 930	vzduch	max. 163									
13 120	1150 - 850	880 - 900	vzduch	130-160									
13 123	1200 - 800	900 - 920	vzduch +							600 - 680	vzduch +	141-180	+větší kusy voda olej
15 020	1100 - 900	900 - 950	vzduch	max. 160									
15 110	1200 - 800	960 - 990	vzduch							650 - 720	vzduch	118-155	
15 111	1200 - 800	960 - 990	vzduch/ olej							650 - 730	vzduch	135-183	
15 123	1200 - 800	960 - 990	vzduch/ olej							650 - 730	vzduch	135-183	
15 223	1180 - 800	880 - 900	vzduch/ voda							580 - 700	vzduch	155-211	
15 224	1150 - 800	950 - 980	vzduch		740 - 760	pec	asi 197	950 - 980	olej/ vzduch	650 - 700	vzduch	223-269	+ tenčí kusy
15 232	1050 - 850	950 - 980	vzduch		820 - 840	pec	asi 200	940 - 1000	olej/ voda	650 - 690	vzduch	223-269	
15 233	1180 - 850	950 - 980	vzduch		820 - 840	pec	max. 211	960 - 1020	olej/ voda	700 - 750	vzduch	207-235	
15 236	1150 - 800	950 - 980	vzduch		810 - 840	pec	max. 200	940 - 1000	olej/ voda	620 - 700	vzduch	208-285	
15 310	1150 - 800	900 - 950	vzduch		740 - 760	pec	asi 141	900 - 950	olej/ vzduch	asi 730	vzduch	max. 192	
15 320	1180 - 800	900 - 960	vzduch	max. 268				880 - 900	voda/ olej	620 - 720	vzduch/ pec	210-268	
15 331	1050 - 850	950 - 980	vzduch		800 - 840	pec	asi 170	960 - 1000	olej/ voda	690 - 740	vzduch	239-285	
15 335	1180 - 850	1020 - 1050	vzduch		800 - 830	pec		1020 - 1050	olej	720 - 750	vzduch	261-270	
15 412	1180 - 800	880 - 900	vzduch		750 - 780	pec		830 890	olej	730 - 780	vzduch	127-183	
15 420	1150 - 830	1050 - 1100	vzduch							660 - 720	vzduch	223-285	
15 520	1150 - 850	900 - 970	vzduch							680 - 750	vzduch	197-269	

Sycením materiálu uhlíkem se snižuje kalící teplota a zvětšuje se pevnost vzniklá kalením. Přidáním slitinových prvků lze posunout body přeměny oceli. To vede ke změně teploty jednotlivých operací tepelného zpracování. Zároveň mají slitinové prvky vliv na zvýšení prokalitelnosti oceli, a tím i na volbu vhodného chladicího prostředí pro tvar předmětu a jeho daný rozměr. Hliník je ovšem výjimkou, u něž slitinové prvky snižují polohu počátku martenzitické přeměny a tím ovlivňují výslednou tvrdost. Slitinové prvky mají dále vliv i na způsob chlazení po popouštění a mechanické vlastnosti oceli a jejich změny při popouštění. [12]

4.5.1 Dělení ocelí k zušlechťování dle chemického složení

- Uhlíkové – třída 12
- Manganové – 13 141
- Mangankřemíkové – 13 240
- Manganvanadiové – 13 242
- Chromové – 14 140
- Manganchróm-křemíkové – 14 330, 14 331, 14 342
- Chromvanadiové – 15 230
- Chromhliníkové – 14 340
- Chromhliník-molybdenové – 15 340
- Manganchrómvanadiové – 15 231, 15 240, 15 261
- Chromniklové – třída 16 [12]

4.5.2 Zvláštní skupina ocelí k zušlechťování

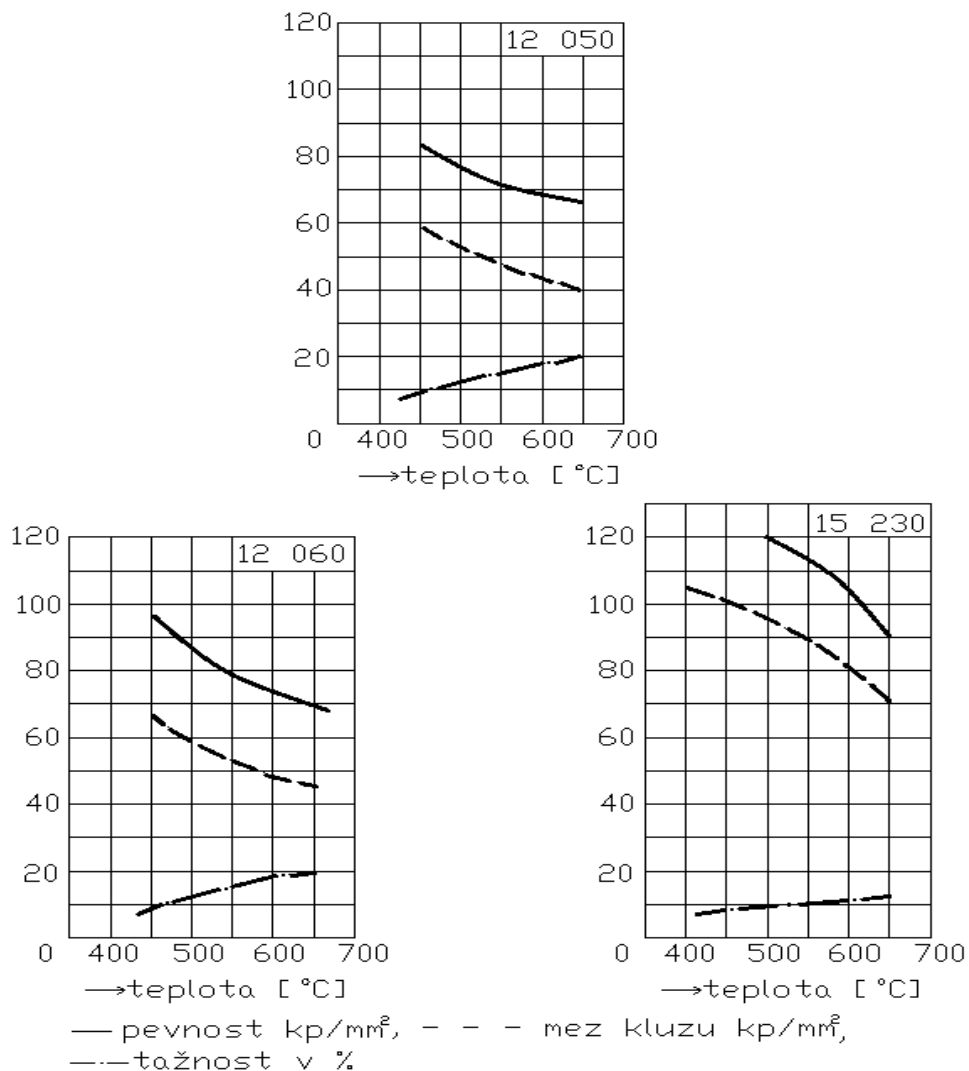
Tuto skupinu tvoří oceli se zaručenými mechanickými vlastnostmi za tepla, které mají poměrně nízký obsah uhlíku. Přidáním slitinových prvků jako jsou chrom, molybden nebo vanad při vyšších teplotách zvýšíme mechanické vlastnosti. Tato skupina ocelí (ČSN 12 021, 12 022, 13 120, 15 020) se zpracovává způsobem normalizační žíhání, protože je to pro ni nejjednodušší způsob.

Normalizační žíhání a popouštění je pro skupinu ocelí : ČSN 13 123, 15 110, 15 111, 15 123, 15 223, 15 240 a 15 520.

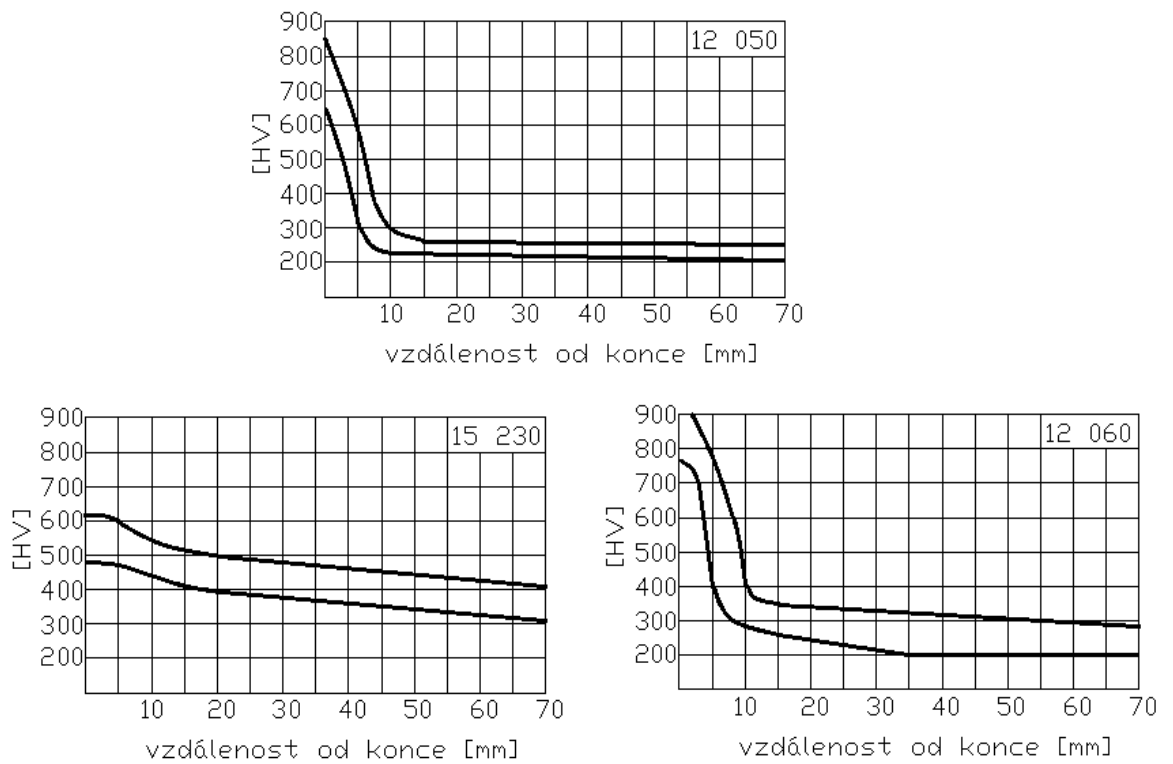
Ostatní oceli této skupiny jsou zušlechťovány kalením a následujícím popouštěním. Jejich výhodou je to, že nejsou náchylné na popouštěcí křehkost. [12]

4.5.3 Volba oceli

Zušlechťovací diagramy a pásy prokalitelnosti slouží ke správné volbě oceli. Ocel musí vyhovovat jejímu budoucímu používání a musí být vhodná k tepelným zpracováním. Na strukturu tepelně zpracovaných ocelí mají vliv slitinové prvky. [12]



Obr. 14. Zušlechťovací diagramy ocelí k zušlechťování [12]



Obr. 15. Pásy prokalitelnosti ocelí k zušlechťování [12]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo měření tvrdosti u vybrané oceli (12060). Pro praktickou část byly vybrány 4 zkušební vzorky oceli 12 060. Jeden vzorek byl v původním stavu, tedy tepelně nezpracovaný a zbylé tři vzorky byly tepelně zpracovány. Jednalo se o tepelné zpracování: povrchové kalení, kalení a zušlechťení. Měření tvrdosti bylo prováděno metodou Rockwell, dle příslušných zkoušek (HRA, HRC, HR15N a H30N). Naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cílem bakalářské práce bylo:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava zkušebních vzorků pro experiment.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.

5.2 Typy zkoušek

Pro měření tvrdosti byly použity zkoušky tvrdosti podle Rockwella HRA, HRC, HR15N a HR30N. Výhodou zkoušky tvrdosti podle Rockwella je to, že nemusí být provedena úprava povrchu zkušebního vzorku před měřením. Důvodem této výhody je před-zatěžující síla. Tato síla nám vtlačí indentor do malé hloubky povrchu a zamezí tak možnému ovlivnění měření, které by vzniklo z důvodu nerovností na povrchu. Měření tvrdosti probíhalo na stroji Easydur Italiana podle stanovených norem.

Tab. 10. Použité normy při měření [9]

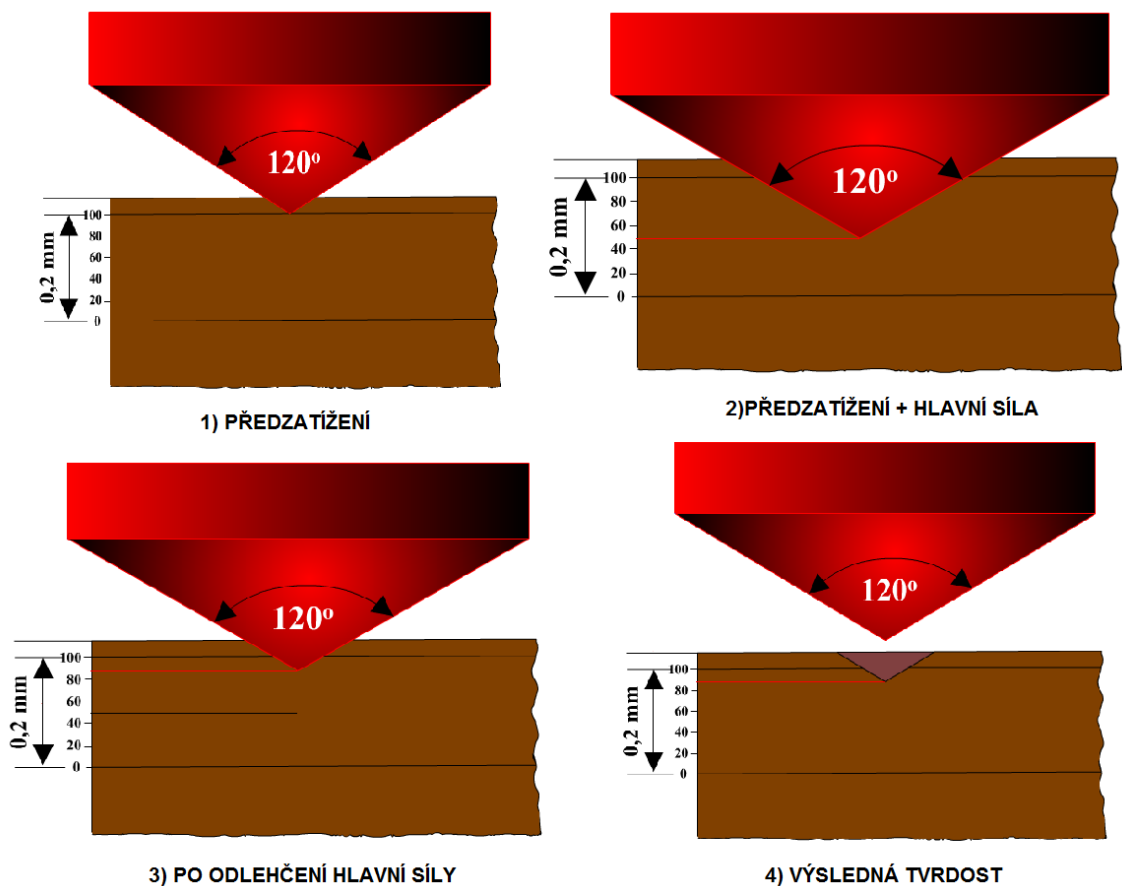
Poř. číslo	Název	Norma
1	Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Zkušební metoda A	ČSN EN ISO 6508-1
2	Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Zkušební metoda C	ČSN EN ISO 6508-1
3	Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Zkušební metoda 15N	ČSN EN ISO 6508-1
4	Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Zkušební metoda 30N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



Obr. 16. Italian Easydur

5.3 Postup měření

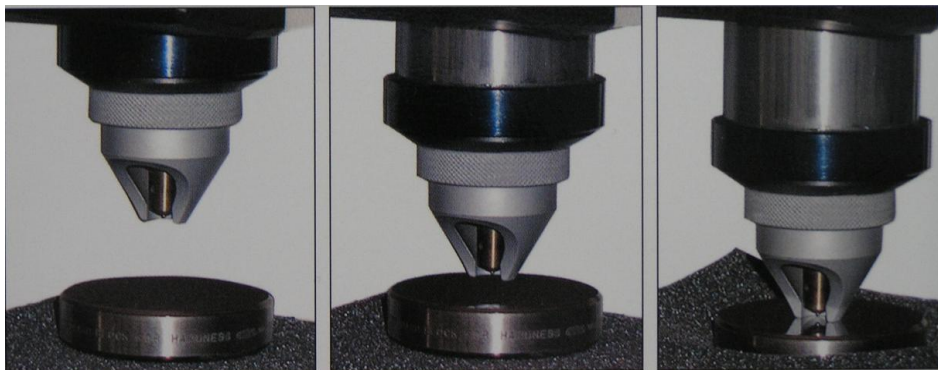
K měření všech vzorků byl použit indentor diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° , který měl poloměr zaoblení špičky $r = 2 \text{ mm}$. Po spuštění tvrdoměru jsme pomocí softwaru nastavili způsob, kterým budeme daný vzorek měřit. Následně se pod indentor vložil zkušební vzorek. Nejprve na vzorek působila předběžná síla F_0 , jejíž účel byl eliminovat povrchové vady, nerovnosti a rozdílní jakosti povrchu, které by nám ovlivnily výsledky měření. Tato předběžná síla se volila podle zvolené metody měření. Po dosažení předběžné síly probíhá nulování stupnice a následná nástup hlavní zatěžující síly F , která také závisí na druhu měření. Následovala výdrž 10 až 15 sekund pod tímto zatížením a postupné odlehčení vzorku na hodnotu F_0 . Výsledná tvrdost se určí tak, že po dosažení síly F_0 se vytvoří stupnice se 100 dílky do hloubky 0,2 mm ve směru vnikání indentoru. Na této stupnici se následně odečítá tvrdost zkoušeného materiálu. Tvrdost je určena rozdílem hloubky vtisku F_0 před působením hlavní síly a po ukončení působení hlavní síly. [1]



Obr. 17. Schéma metody měření tvrdosti podle Rockwella

Tab. 11. Předběžné a přidavné zatížení pro vybrané metody Rockwell [1,9]

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Typ vnikacího tělesa	Předběžné zatížení F_0 [N]	Přidavné zatížení F_1 [N]	Celkové zatížení F [N]	Oblast použití
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 až 88
C	HRC	Diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 až 70
15 N	HR 15 N	Diamantový kužel	29,42	117,7	147,1	70 až 94
30 N	HR 30 N	Diamantový kužel	29,42	264,8	294,2	42 až 86



Obr. 18. Měřicí hlava

5.4 Tepelné a chemicky – tepelné zpracování zkušebních vzorků

5.4.1 Zušlechťování

Podstatou zušlechťování je vytvoření sorbitické struktury. Tato struktura je charakterizována vysokou pevností, zvýšenou mezí kluzu a neposledně houževnatostí. Principem vytvoření sorbitické struktury je spojení kalení a následného popuštění. Přesněji jde o spojení martenzitického kalení následováno popuštěním na teplotu vyšší 400°C. Tento typ tepelného zpracování se používá u hotových výrobků nebo přímo u hutních polotovarů. [15]

5.4.2 Kalení

Proces kalení se provádí z důvodu zvýšení tvrdosti ocelí. Jde o nejpoužívanější způsob tepelného zpracování. Princip kalení spočívá v přeměně perliticko feritické struktury na strukturu martenzitickou nebo bainitickou. O tom, jaká bude výsledná struktura závisí na rychlosti kalení. Oceli vhodné ke kalení obsahují minimálně 0,3% C, oceli s nižším obsahem jsou nekalitelné. Po prohřevu materiálu přichází chlazení, které musí být dostatečně rychlé, ale nesmí překročit kritickou rychlost, kdy by došlo k velkému vnitřnímu pnutí. O výsledné struktuře zakalení rozhoduje kalící rychlost. Kalení nám popisují diagramy IRA a ARA. Způsoby chlazení jsou vodní sprcha, klidná nebo proudící voda, oleje, solné lázně nebo vzduch. [15]

5.4.3 Povrchové kalení

Povrchovým kalením se rozumí zvýšení tvrdosti jen v malé hloubce materiálu. Podstatou je rychlé ohřátí povrchu na teplotu vhodnou ke kalení a následné rychlé ochlazení. Oceli musí být dobře kalitelné s obsahem uhlíku 0,45 – 0,6% C. Rychlý ohřev je možno dostat dvěma způsoby: elektroindukčně nebo vysokoteplotním plamenem. V obou případech musí dojít k následnému rychlému ochlazení. Výsledná zakalená tloušťka je ovlivněna dobou ohřevu. U ohřevu plamenem je minimální tloušťka zakalení 2 mm a u indukčního ohřevu 1 mm. Povrchové kalení je možno provést i u litin. [15]

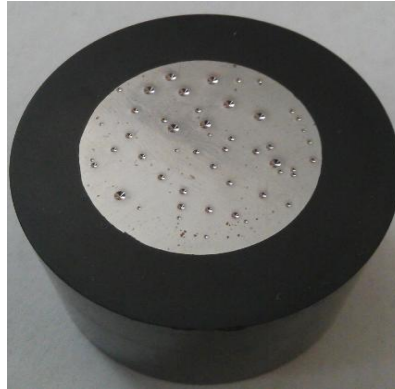
6 OCEL 12 060

Jde o konstrukční nelegovanou ocel, jakostní k zušlechťování. Tato ocel má normou stanovené chemické složení viz *Tab. 12*. Ocel určená na strojní součásti jako jsou méně namáhané klikové hřídele, vačkové hřídele automobilů, hřídele turbokompresorů, ozubená kola, pístnice, plunžry, spojky, spojovací materiály apod. Pevnost v tahu R_m je 470 – 1570 MPa a tvrdost max. 321 HB a dosahuje vysoké meze kluzu a meze únavy. Svařitelnost ocelí 12 060 je obtížná. [1,13,14]

Tab. 12. Chemické složení oceli 12 060 [14]

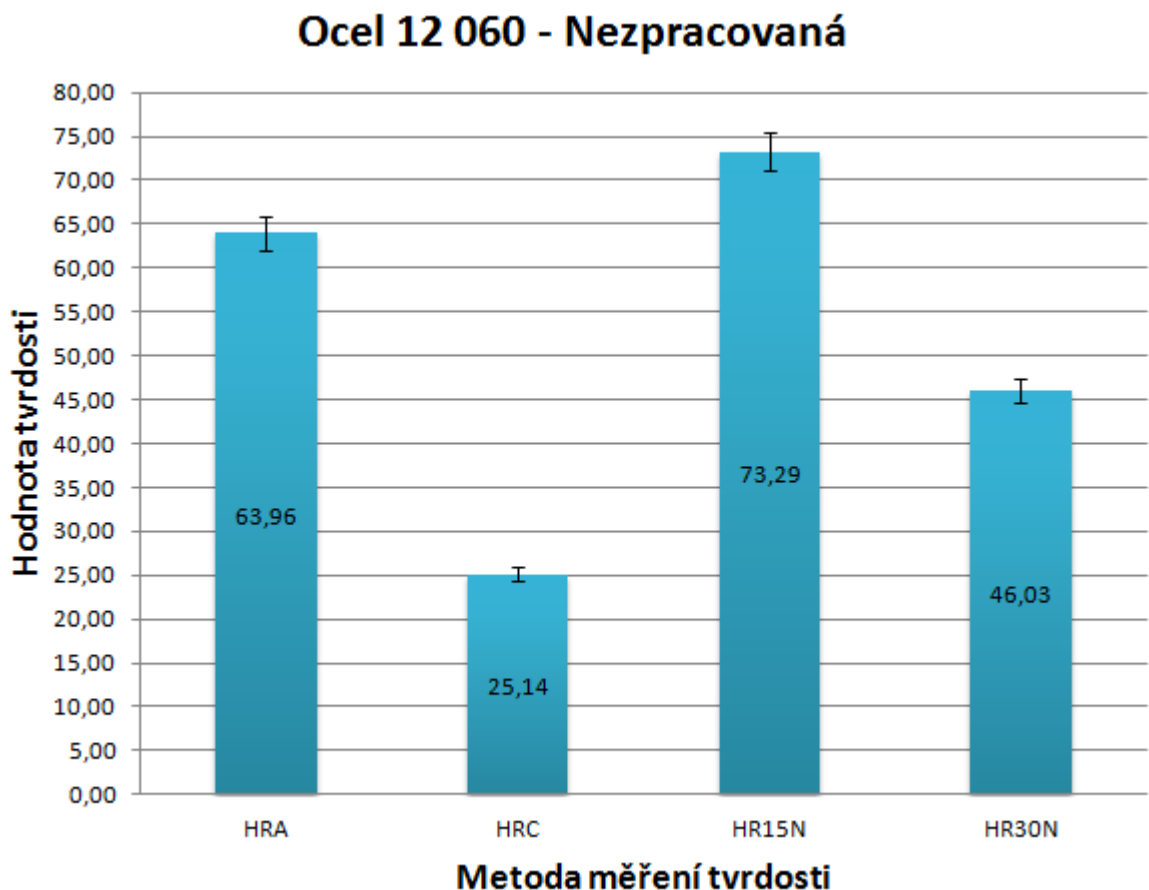
Ocel 12 060								
Chemické složení [%]								
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	W
0,52-0,60	0,50-0,80	0,15-0,40	max.0,04	max.0,04	max.0,30	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30

6.1 Ocel 12 060 - Nezpracovaná



Obr. 19. Nezpracovaná ocel

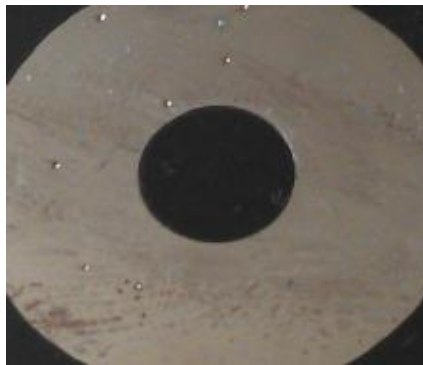
6.1.1 Interpretace výsledků měření oceli 12 060 – Nezpracovaná



Obr. 20. Hodnoty tvrdosti oceli 12 060 - Nezpracovaná

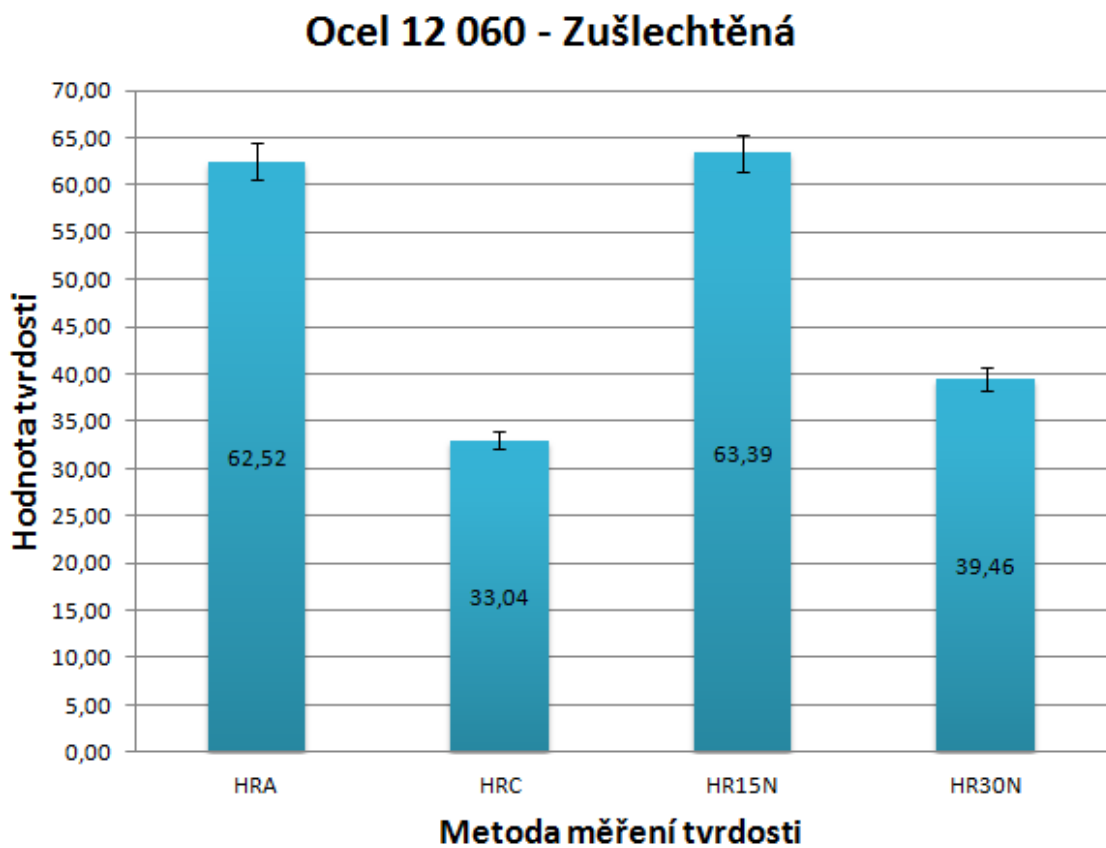
Z výsledků měření tvrdosti nezpracované oceli 12 060 vyplynulo, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena metodou HR15N. Naopak nejmenší hodnota tvrdosti byla naměřena metodou HRC, jak je patrné z obrázku 20.

6.2 Ocel 12 060 – Zušlechtěná



Obr. 21. Zušlechtěná ocel

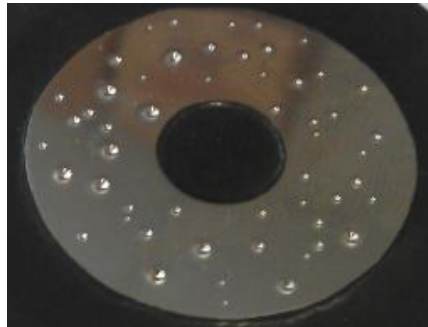
6.2.1 Interpretace výsledků měření oceli 12 060 - Zušlechtěná



Obr. 22. Hodnoty tvrdosti oceli 12 060 - Zušlechtěná

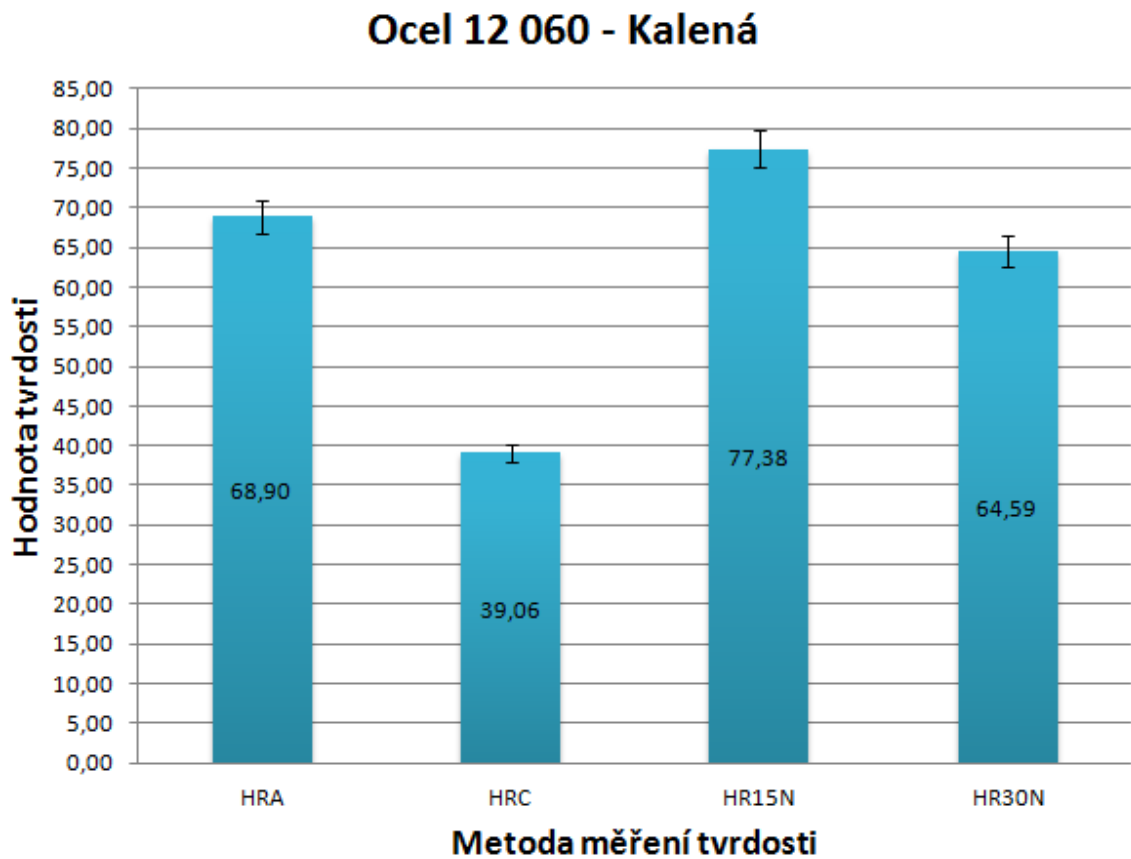
Z naměřených výsledků tvrdosti zušlechtěné oceli 12 060 vyplynulo, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena metodou HR15N a naopak nejnižší hodnotu tvrdosti jsme získali metodou HRC. Výsledky jsou patrné z obrázku 22.

6.3 Ocel 12 060 – Kalená



Obr. 23. Kalená ocel

6.3.1 Interpretace výsledů měření oceli 12 060 - Kalená



Obr. 24. Hodnoty tvrdosti oceli 12 060 - Kalená

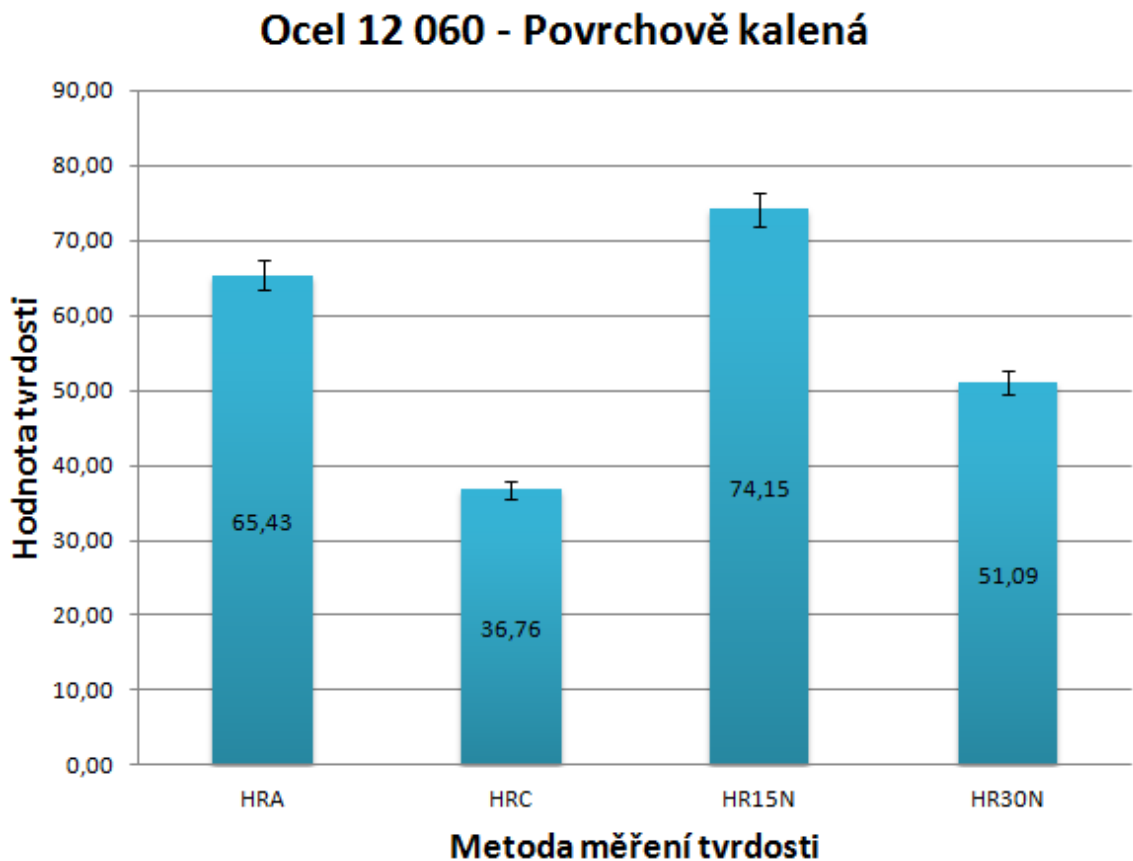
Z měření tvrdosti zkušebního vzorku oceli 12 060, který byl kalen, vyplývá, že nejvyšší hodnoty tvrdosti jsme dosáhli metodou HR15N. Nejnižší hodnoty tvrdosti zkušebního vzorku jsme dosáhli metodou HRC. Naměřené výsledky jsou patrné z obrázku 24.

6.4 Ocel 12 060 – Povrchově kalená



Obr. 25. Povrchově kalená ocel

6.4.1 Interpretace výsledků měření oceli 12 060 – Povrchově kalená

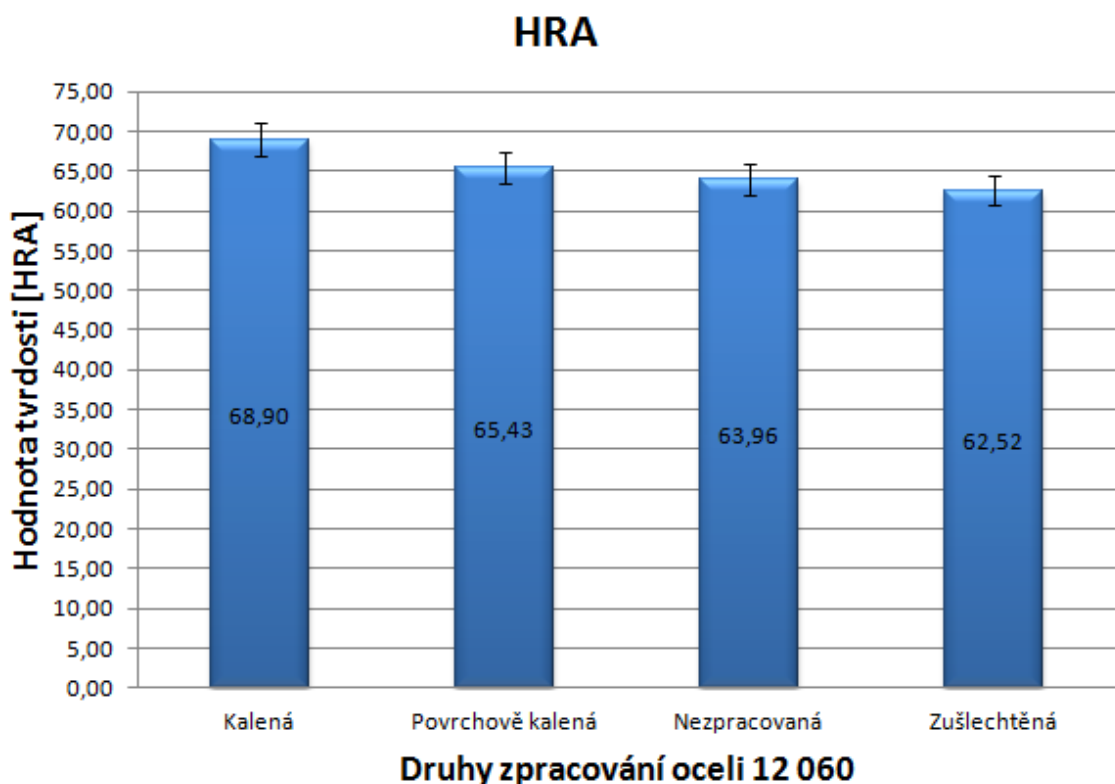


Obr. 26. Hodnoty tvrdosti oceli 12 060 – Povrchově kalená

Vzorek oceli 12 060, který byl povrchově kalen, dosáhl nejvyšší tvrdosti metodou HR15N a naopak nejnižší hodnoty tvrdosti bylo dosaženo metodou HRC. Hodnoty tvrdosti jsou určeny z obrázku 26.

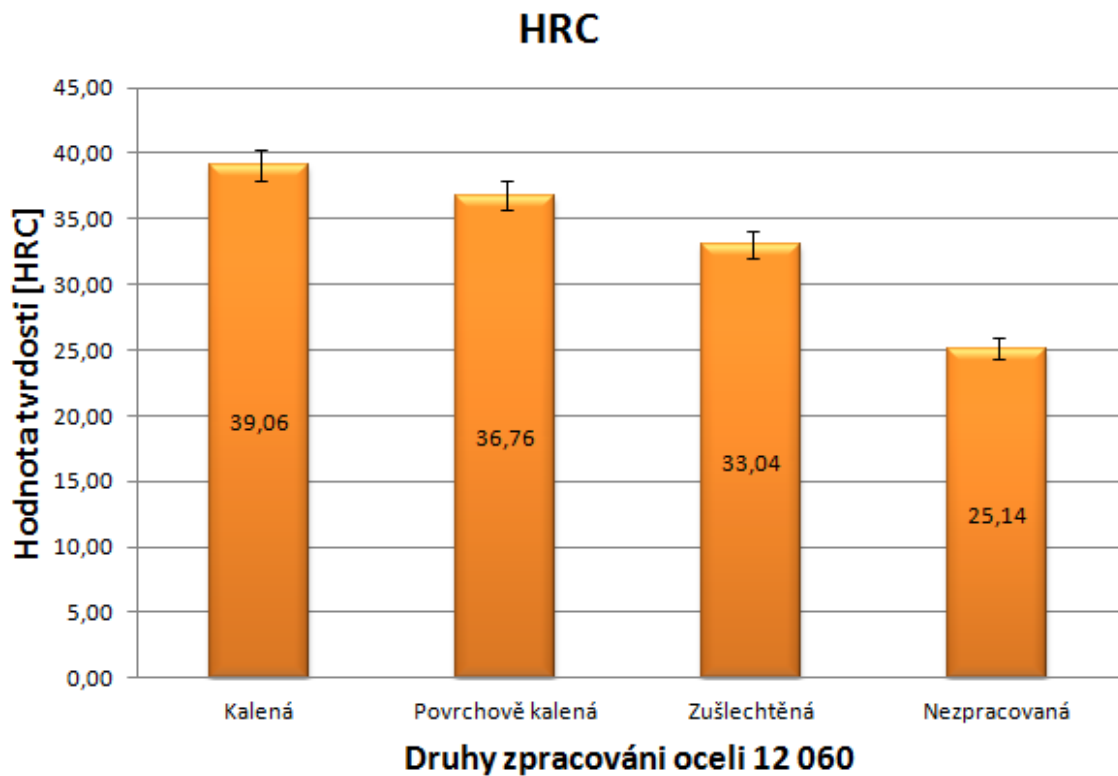
7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Bakalářská práce se zabývala měřením tvrdosti u vybrané oceli (12060). Pro praktickou část byly vybrány 4 zkušební vzorky oceli 12 060. Jeden vzorek byl v původním stavu, tedy tepelně nezpracovaný a zbylé tři vzorky byly tepelně zpracovány. Jednalo se o tepelné zpracování: povrchové kalení, kalení a zušlechťení. Měření tvrdosti bylo prováděno metodou Rockwell, dle příslušných zkoušek (HRA, HRC, HR15N a H30N). Naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.



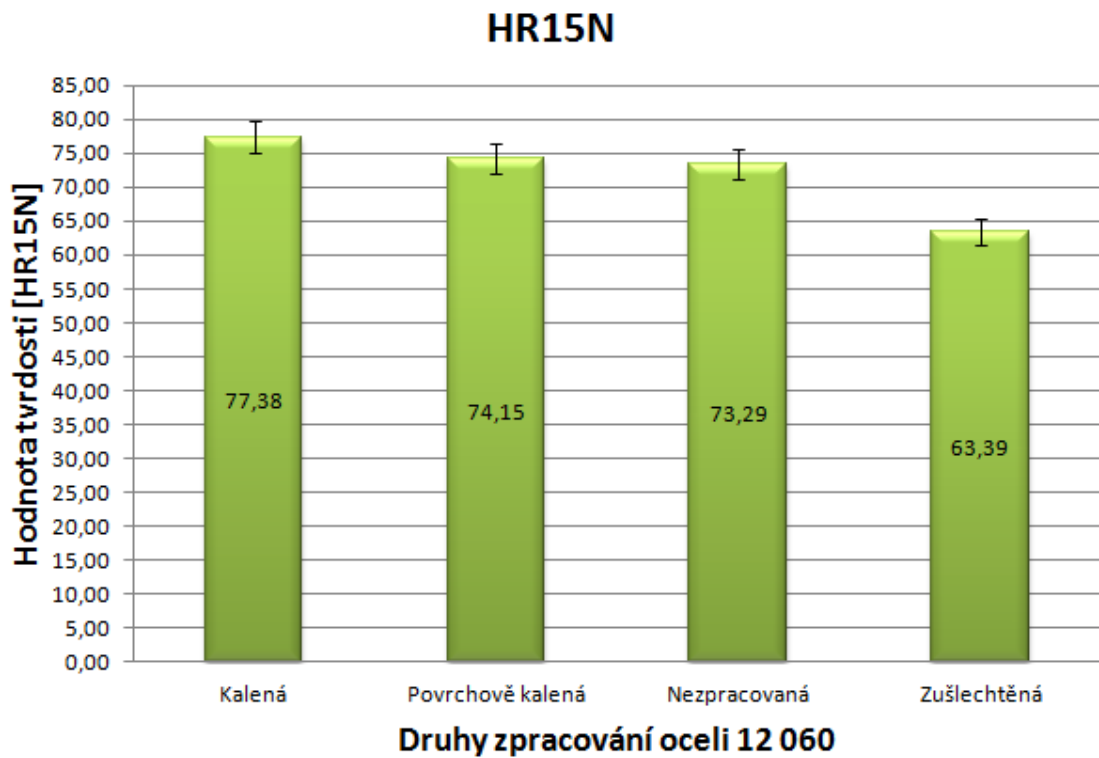
Obr. 27. Porovnání tvrdosti vzorků oceli 12 060 metodou měření HRA

Z výsledků měření tvrdosti ocelí 12 060 metodou HRA vyplynulo, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla zjištěna u kaleného testovaného zkušební vzorku. Nejmenší hodnota tvrdosti byla naopak naměřena u testovaného zkušební vzorku, který byl tepelně nezpracován a u zušlechťeného zkušební vzorku. Struktura zakaleného zkušební vzorku byla tvořena martenzitem a austenitem zbytkovým, zatímco struktura zušlechťeného zkušební vzorku byla tvořena bainitů a austenitů zbytkových. Nezpracovaný zkušební vzorek byl tvořen lamelárním perlitem. Naměřené výsledky jsou patrné z obrázku 27.



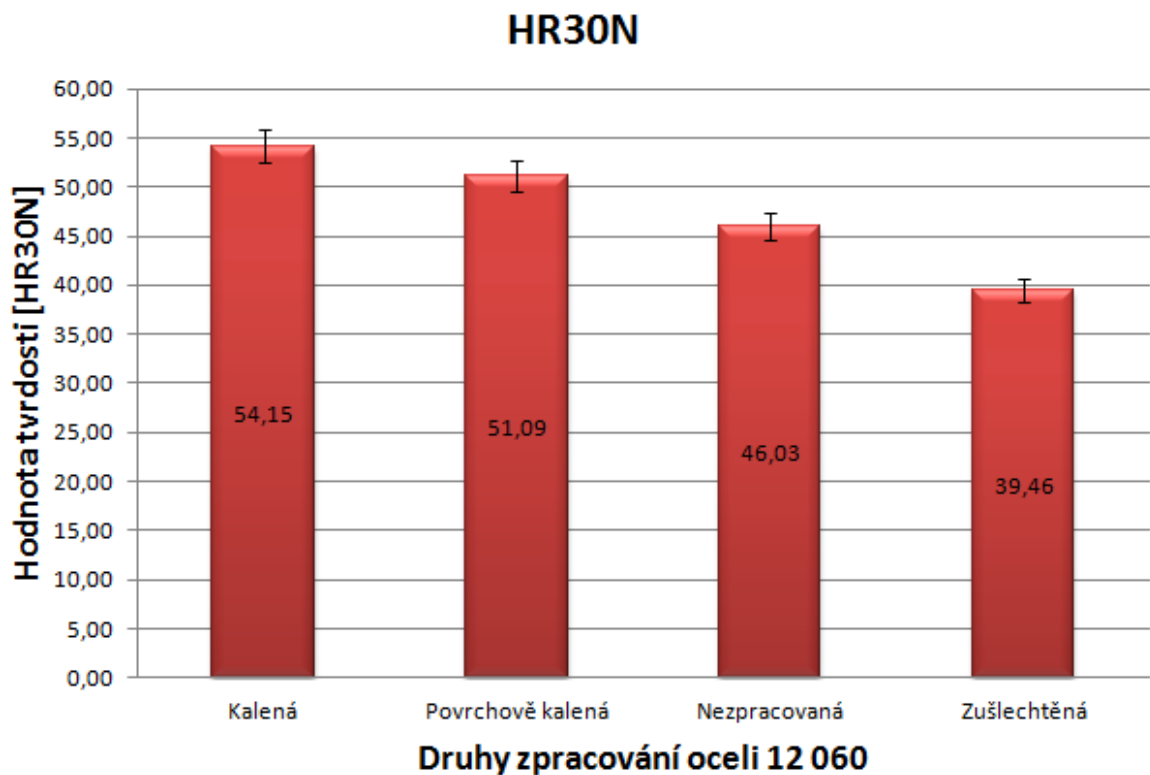
Obr. 28. Porovnání tvrdosti vzorků oceli 12 060 metodou měření HRC

Z výsledků měření tvrdosti ocelí 12 060 metodou HRC je patrné, že nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo u testovaného zkušební vzorku oceli 12 060, který byl zpracován zakalením. Kalený vzorek obsahoval martenzitickou strukturu se zbytkovým austenitem, tato struktura se vyznačuje vysokou tvrdostí. Druhá nejvyšší tvrdost byla naměřena u zkušební vzorku, který byl povrchově kalen. Naopak nejnižší hodnoty tvrdosti bylo dosaženo u zkušební vzorku, který byl povrchově nezpracován. Struktura nezpracovaného zkušební vzorku byla tvořena lamelárním perlitem, který není tak tvrdý jako struktura vzorku zušlechťeného, který obsahuje sorbitickou strukturu. Hodnoty tvrdosti odpovídají danému druhu zpracování. Naměřené hodnoty jsou patrné z obrázku 28.



Obr. 29. Porovnání tvrdosti vzorků oceli 12 060 metodou měření HR15N

Z výsledků měření tvrdosti oceli 12 060 metodou HR15N jsme zjistili, že nejvyšší tvrdosti jsme dosáhli u testovaného zkušební vzorku kaleného. O trochu menší tvrdost byla naměřena u vzorku, který byl povrchově kalen. Nejnižší hodnoty tvrdosti jsme dosáhli u zkušební vzorku, který byl zušlechtěn. Vyšší tvrdost než zušlechtěný vzorek měl vzorek tepelně nezpracovaný. Tento rozdíl v tvrdosti zušlechtěné a tepelně nezpracované oceli mohl být způsoben měřením v místě, kde se vyskytovala nehomogenita nebo vměstek. Naměřené výsledky jsou patrné z obrázku 29.



Obr. 30. Porovnání tvrdosti vzorků oceli 12 060 metodou měření HR30N

Z výsledků měření tvrdosti ocelí 12 060 metodou HR30N jsme potvrdili, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u vzorku, který byl tepelně zpracován kalením. Druhou nejvyšší tvrdost měl zkušební vzorek povrchově kalený. Třetí nejvyšší stanovená tvrdost oceli metodou HR30N byla naměřena u vzorku, který byl tepelně nezpracovaný. Nejnižší hodnoty tvrdosti jsme dosáhli u vzorku, který byl tepelně zpracován zušlechtěním. Toto naměřené pořadí tvrdosti u zušlechtěného a nezpracovaného zkušební vzorku mohlo být způsobeno měřením tvrdosti v místě, kde se ve struktuře nachází vměstek nebo nehomogenita. Naměřené hodnoty jsou patrné z obrázku 30.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala měřením tvrdosti u vybrané oceli (12060). Pro praktickou část byly vybrány čtyři zkušební vzorky oceli 12 060. Jeden vzorek byl v původním stavu, tedy tepelně nezpracovaný a zbylé tři vzorky byly tepelně zpracovány. Jednalo se o tepelné zpracování: povrchové kalení, kalení a zušlechťení. Měření tvrdosti bylo prováděno metodou Rockwell, dle příslušných zkoušek (HRA, HRC, HR15N a H30N). Naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Výsledky měření tvrdosti ukázaly, že nejvyšší hodnoty tvrdosti byly zjištěny u kaleného testovaného zkušební vzorku. Výsledná struktura zde byla tvořena martenzitem a austenitem zbytkovým. Druhou nejvyšší hodnotu tvrdosti vykazovaly testované zkušební vzorky, které byly povrchově kaleny. Zde byla výsledná struktura tvořena smíšenou strukturou martenzitu, bainitu, perlitu a austenitu zbytkového. Nejnižší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u tepelně nezpracovaného testovaného zkušební vzorku a u zkušební vzorku, který byl zušlechťen.

Nejvhodnějšími metodami pro měření různých struktur ocelí se jeví metody s nižšími zatěžujícími silami, jako jsou HRA, HR15N a HR30N.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1.* 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007, 266 s. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [2] PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech.* 1.vyd. Praha: SNTL, 1989, 549 s.
- [3] VSCHT, [online]. [cit. 2013-11-05]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/
- [4] ATEAM. [online]. 2005 [cit. 2013-11-05]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [5] PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály.* 3., nezměn. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981, 562 s.
- [6] WIKIPEDIA. [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-11-06]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Adolf_Martens
- [7] CONVERTER. [online]. 2002. vyd. [cit. 2013-11-06]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/tvrdest-mohs.htm>
- [8] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy.* Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010, 204 s. ISBN 9788070807415.
- [9] METROTEST: s.r.o. Kladno. [online]. 2010. vyd. [cit. 2013-11-11]. Dostupné z: <http://www.metrotest.cz/o-mereni-tvrlosti.html>
- [10] HLUCHÝ, Miroslav. *Nauka o materiálu.* 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978, 356 s.
- [11] POVRCHÁŘI [online]. 2010 [cit. 2013-11-17]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201005_povrchari.pdf
- [12] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: Metalografická příručka.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1969, 342 s. + tab.
- [13] LEINVEBER, Jan. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření.* 3. dopl. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006, xiv, 914 s. ISBN 80-736-1033-7.
- [14] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky: pro školu a praxi.* 1. vyd. Praha: Scientia, 2007, 586 s. ISBN 978-80-86960-20-3.

- [15] *JHAMERNIK* [online]. 2003, 11.11.2006 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČSN	[-]	Česká technická norma.
D	[mm]	Průměr kuličky.
d	[mm]	Aritmetický průměr délek úhlopříček $d_{1,2}$.
$d_{1,2}$	[mm]	Délky úhlopříček.
EN	[-]	Evropská norma.
F	[N]	Zkušební síla.
F_1	[N]	Přídavná síla.
F_0	[N]	Předběžná síla.
H	[-]	Tvrdomost.
h	[mm]	Hloubka vtisku.
HB	[-]	Tvrdomost podle Brinella.
HMa	[-]	Tvrdomost podle Martense.
HR	[-]	Tvrdomost podle Rockwella.
HSh	[-]	Tvrdomost podle Shoreho.
HV	[-]	Tvrdomost podle Vickerse.
ISO	[-]	Mezinárodní norma.
k_1	[-]	Korekční konstanta tvrdoměru.
k_2	[-]	Korekční konstanta materiálu.
N	[-]	Číslo charakterizující stupnici.
S	[-]	Jednotková stupnice.
u	[mm]	Aritmetický průměr délky úhlopříček.
$u_{1,2}$	[mm]	Délky úhlopříček.
α	[°]	Úhel spuštění normalizovaného tělíska.
β	[°]	Úhel odrazu normalizovaného tělíska.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Zkoušky tvrdosti. a) kuličkou z tvrdokovu, b) diamantovým kuželem (HRC, HRA), c) kuličkou (HRB, HRD, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK), d) diamantovým hrotem-čtyřbokým jehlanem [1]</i>	16
<i>Obr. 2. Metoda Brinell [1]</i>	17
<i>Obr. 3. Průběh zkušebního zatížení – Metoda Brinell [9]</i>	19
<i>Obr. 4. Obecné schéma značení zkoušky tvrdosti podle Brinella [1]</i>	19
<i>Obr. 5. Metoda Rockwell [1]</i>	22
<i>Obr. 6. Průběh zkušebního zatížení – Metoda Rockwell [9]</i>	23
<i>Obr. 7. Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Rockwella [1]</i>	25
<i>Obr. 8. Metoda Vickers [1]</i>	28
<i>Obr. 9. Průběh zkušebního zatížení – Metoda Vickers [9]</i>	29
<i>Obr. 10. Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Vickerse [1]</i>	30
<i>Obr. 11. Ruční tvrdoměr Poldi [10]</i>	33
<i>Obr. 12. Shoreho skleroskop [11]</i>	34
<i>Obr. 13. Schéma měření tvrdosti Duroskopem [11]</i>	35
<i>Obr. 14. Zušlechťovací diagramy oceli k zušlechťování [12]</i>	41
<i>Obr. 15. Pásy prokalitelnosti oceli k zušlechťování [12]</i>	42
<i>Obr. 16. Italian Easydur</i>	45
<i>Obr. 17. Schéma metody měření tvrdosti podle Rockwella</i>	46
<i>Obr. 18. Měřicí hlava</i>	47
<i>Obr. 19. Nezpracovaná ocel</i>	50
<i>Obr. 20. Hodnoty tvrdosti oceli 12 060 - Nezpracovaná</i>	50
<i>Obr. 21. Zušlechtěná ocel</i>	51
<i>Obr. 22. Hodnoty tvrdosti oceli 12 060 - Zušlechtěná</i>	51
<i>Obr. 23. Kalená ocel</i>	52
<i>Obr. 24. Hodnoty tvrdosti oceli 12 060 - Kalená</i>	52
<i>Obr. 25. Povrchově kalená ocel</i>	53
<i>Obr. 26. Hodnoty tvrdosti oceli 12 060 – Povrchově kalená</i>	53
<i>Obr. 27. Porovnání tvrdosti vzorků oceli 12 060 metodou měření HRA</i>	54
<i>Obr. 28. Porovnání tvrdosti vzorků oceli 12 060 metodou měření HRC</i>	55
<i>Obr. 29. Porovnání tvrdosti vzorků oceli 12 060 metodou měření HR15N</i>	56

Obr. 30. Porovnání tvrdosti vzorků oceli 12 060 metodou měření HR30N.....57

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Rozdělení zkoušek tvrdosti [1]</i>	12
<i>Tab. 2. Mohsova stupnice tvrdosti a tvrdost některých látek podle této stupnice: [8]</i>	15
<i>Tab. 3. Vnikací tělesa a zkušební síly s předzatížením 98,07 N [1]</i>	25
<i>Tab. 4. Vnikací tělesa a zkušební síly s předzatížením 29,42 N [9]</i>	26
<i>Tab. 5. Členění metody Vickers [1]</i>	28
<i>Tab. 6. Zkušební zatížení při zkoušce tvrdosti metodou Vickers [9]</i>	31
<i>Tab. 7. Druhy ocelí podle hlavních skupin jakosti [1]</i>	36
<i>Tab. 8. Schéma sestavení číselného označení ocelí [1]</i>	38
<i>Tab. 9. Tep. zpracování ocelí se zaručenými mech. vlastnostmi za vyšších teplot [12]</i>	39
<i>Tab. 10. Použité normy při měření [9]</i>	45
<i>Tab. 11. Předběžné a přídatné zatížení pro vybrané metody Rockwell [1,9]</i>	47
<i>Tab. 12. Chemické složení oceli 12 060 [14]</i>	49