

Měření tvrdosti ocelí s nízkým obsahem uhlíku

Jindřich Škývara

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: Jindřich Škývara

Osobní číslo: T11295

Studijní program: B3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Forma studia: prezenční

Téma práce: Měření tvrdosti ocelí s nízkým 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 Maňas, 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

Příjmení a jméno: Jindřich Škyvanka

Obor: TZ

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ 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 16.5.2019

Škyvanka

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 nepříkážně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledků obhajoby prostřednictvím databáze kvalitativních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být těm nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlédnutí 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 rozmnožování.

(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).

⁴⁾ 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 jim 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 přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na měření tvrdosti kovů s nízkým obsahem uhlíku. V literární části seznamuji s podstatou vybraných zkoušek tvrdosti. V praktické části vybranými metodami experimentálně stanovuji tvrdosti zadaných vzorků a vyhodnocuji je.

Klíčová slova: Tvrdost, Zkoušky tvrdosti, Brinell, Vickers, Rockwell

ABSTRACT

The bachelor's thesis is focused on measuring the hardness of metals with low carbon content. In literary part introduce with principle of selected tests of hardness. In practical part I experimentally determined hardness at the specified samples with selected methods and evaluate them.

Keywords: Hardness, hardness testing, Brinell, Vickers, Rockwell

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, doc. Ing. Davidu Maňasovi Ph.D., za cenné rady a připomínky, ochotu a za odborné vedení, které mi poskytl při psaní této práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 VNIKACÍ ZKOUŠKY TVRDOSTI	13
1.1 HISTORIE VNIKACÍCH ZKOUŠEK.....	13
1.2 BRINELLOVA ZKOUŠKA	14
1.2.1 Podstata zkoušky	14
1.2.2 Zkušební podmínky.....	15
1.2.3 Vnikací tělesa a zkušební síly	16
1.2.4 Zkušební vzorky.....	17
1.2.5 Zápis hodnot tvrdostí.....	17
1.2.6 Přesnost výsledků.....	18
1.2.7 Ludwikova zkouška	18
1.3 ROCKWELLOVA ZKOUŠKA	19
1.3.1 Podstata zkoušky	19
1.3.2 Zkušební podmínky.....	19
1.3.3 Vnikací tělesa a zkušební síly	21
1.3.4 Zkušební vzorky.....	21
1.3.5 Zápis hodnot tvrdostí.....	22
1.3.6 Přesnost výsledků.....	23
1.4 VICKERSOVA ZKOUŠKA	23
1.4.1 Podstata zkoušky	23
1.4.2 Zkušební podmínky.....	24
1.4.3 Vnikací tělesa a zkušební síly	25
1.4.4 Zkušební vzorky.....	25
1.4.5 Zápis hodnot tvrdostí.....	26
1.4.6 Přesnost výsledků.....	26
1.5 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY VNIKACÍ.....	26
1.5.1 Kladívko Poldi	27
1.5.2 Baumanovo kladívko	28
2 ZKOUŠKY ODRAZOVÉ	29
2.1 SHOREHO SKLEROSKOP	29
2.2 DUROSKOP	30
3 ZKOUŠKY VRYPOVÉ	31
4 OCEL	33
4.1 MNOŽSTVÍ A VLIV PŘÍŠAD NA VLASTNOSTI OCELÍ	33
4.2 OZNAČENÍ OCELÍ	34
4.2.1 Číselné značení ocelí.....	34
4.2.2 Barevné označení ocelí	36
4.3 NÍZKOUHLÍKOVÉ OCELI	37
4.3.1 Hlubokotažné oceli.....	37
4.3.2 Oceli pro elektrotechnické plechy.....	37
4.3.3 Oceli k cementování.....	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	38

5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
5.1	ZVOLENÉ TYPY ZKOUŠEK	39
5.2	POSTUP MĚŘENÍ.....	40
6	OCEL 11 353.....	43
6.1	NEZPRACOVANÁ OCEL 11 353.....	43
6.1.1	Interpretace výsledků nezpracované oceli 11 353	44
6.2	CEMENTOVANÁ OCEL 11 353	45
6.2.1	Interpretace výsledků cementované oceli 11 353	46
6.3	NITRIDOVANÁ OCEL 11 353	47
6.3.1	Interpretace výsledků nitridované oceli 11 353	48
7	OCEL 14 220.....	49
7.1	NEZPRACOVANÁ OCEL 14 220.....	49
7.1.1	Interpretace výsledků nezpracované oceli 14 220	50
7.2	CEMENTOVANÁ OCEL 14 220	51
7.2.1	Interpretace výsledků cementované oceli 14 220	52
7.3	NITRIDOVANÁ OCEL 14 220	53
7.3.1	Interpretace výsledků nitridované oceli 14 220	54
8	DISKUZE	55
8.1	POROVNÁNÍ TVRDOSTÍ METODOU HRA	55
8.2	POROVNÁNÍ TVRDOSTÍ METODOU HRC.....	56
8.3	POROVNÁNÍ TVRDOSTÍ METODOU HR15N	57
8.4	POROVNÁNÍ TVRDOSTÍ METODOU HR30N	58
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	61
	SEZNAM OBRÁZKŮ	62
	SEZNAM TABULEK.....	64

ÚVOD

Zkoušky tvrdosti zastávají v dnešní době v oboru zkoušení materiálů jedno z nejvýznamnějších míst, protože tvrdost získáme ze všech vlastností materiálu nejrychleji a nejlevněji. S jejich pomocí získáváme informace o odporu tvárné deformace na malých částech 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 vyvozujeme i jiné vlastnosti materiálu jako je třeba pevnost v tahu, obrobitelnost atd. Nejznámější tvrdé přírodní látky jsou diamant, korund a topaz. Vývoj zkušebních metod měření tvrdosti probíhá už 200 let a dosud se nepodařilo dojít k jednotné koncepci. U jednoho kovu lze stanovit tolik tvrdostí, kolik je způsobů měření.

Hlavním cílem bakalářské práce je srovnat tvrdosti jednotlivých kovových vzorků vybranými druhy zkoušek. V teoretické části se zaměřím na vytvoření literární studie se zaměřením na nejznámější druhy zkoušek tvrdosti, jejich rozdělení a postup. Obeznamením s testovacími tělísky a jejich otisky ve vzorcích, ze kterých se určuje výsledná tvrdost. Seznámením se základním rozdělením ocelí a s jejich vlastnostmi. V praktické části budu zkoumat tvrdost kovů s různou strukturou. Poté srovnám a vyhodnotím naměřené hodnoty. Určím, jaká metoda je pro daný materiál a strukturu nejlepší.

I. TEORETICKÁ ČÁST

„Tvrdość definujeme jako odpor, který klade materiál, proti vnikání cizího tělesa.[1] Většina přístrojů k měření tvrdości jsou právě na téhle definici založeny. Tvrdość však není fyzikálně definovanou vlastností, ale výslednicí řady vlastností hmoty a to hlavně vlastností povrchu. Hodnoty tvrdości se uvádí ve dvou způsobech, buď bez jednotek, nebo když jsou odvozeny z plochy vtisku a tlakové síly, tak jim můžeme přikládat jednotku MPa. To ale může být matoucí s pevností, tedy je lepší uvádět číslo bez jednotky. Jako značku pro tvrdość používáme H. Měření tvrdości je značně rozšířenou provozní i laboratorní zkouškou. Oproti jiným zkouškám má některé výhody, jako jsou: jednoduchost provedení, rychlost a zkoušení i hotových výrobků bez jejich poškození.

Dělení podle způsobu porušení povrchu.

- 1) Statické – indentor se vtlačuje ve směru kolmém ke zkoušenému materiálu klidnou silou.
- 2) Dynamické – indentor se vtlačuje ve směru kolmém ke zkoušenému materiálu rázovou silou. Tzv. „rázové zkoušky“.
- 3) Porušení zkoušeného kovu se dosáhne pohybem ostrého nástroje rovnoběžně s povrchem. Volí se hlavně u křehkých materiálů.

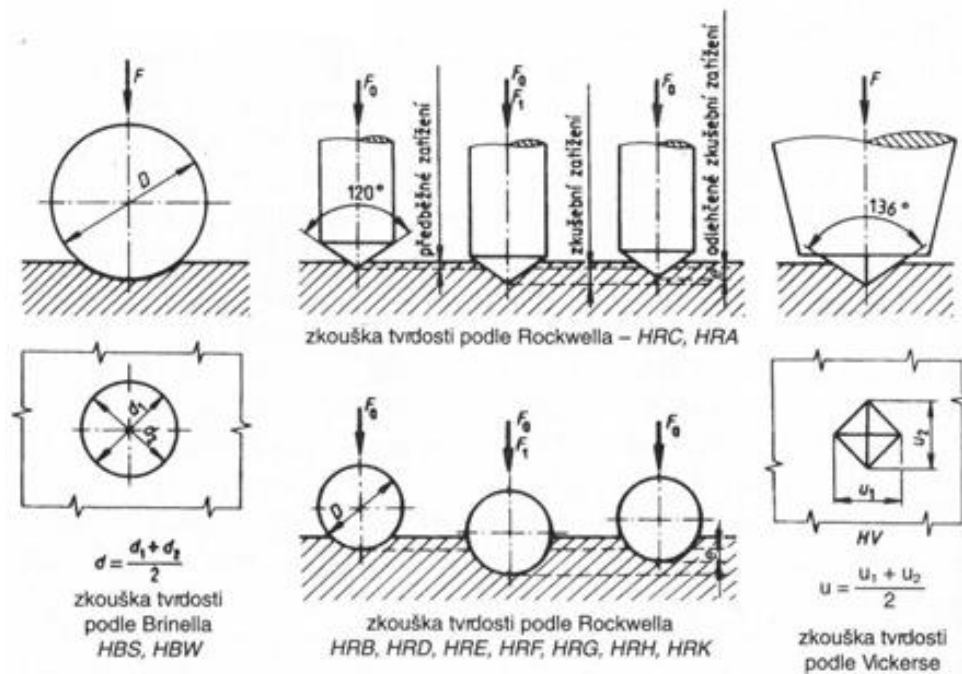
Jiné dělení:

- 1) Vnikací – vtlačování přesně definovaného tělesa do povrchu vzorku.
- 2) Odrazové – spočívá v odrazu tělíška určitého tvaru a hmotnosti.
- 3) Vrypové – tvrdość se určuje podle šířky vrypu.

Při zkoušce tvrdości se vytváří ve zkoušeném tělese vtisk o hodnotě desetin milimetrů až několik milimetrů. [1,2,3]

1 VNIKACÍ ZKOUŠKY TVRDOSTI

Vnikací zkoušky tvrdosti jsou nepoužívanější a nejvýznamnější při stanovování materiálové tvrdosti. Při těchto zkouškách se do materiálu pozvolnou kolmou silou zatlačuje velmi tvrdé těleso (kulička, kužel, jehlan). Měřítkem tvrdosti je velikost vtisku do materiálu (průměr, hloubka, úhlopříčka, viz obr. 1). Brinellova, Rockwellova a Vickersova zkouška jsou neznámějšími zkoušky tvrdosti. Podle Brinella nejčastěji zkoušíme tvrdost neželezných kovů (Cu, Sn, Pb, Al a jejich slitiny). Podle Rockwella zkoušíme tvrdé a kalené materiály. Vickersova zkouška tvrdosti je nepoužívanější, protože odstraňuje nevýhody obou předešlých zkoušek. [1,4,5]



Obr. 1. Vtisky u vnikacích zkoušek [1]

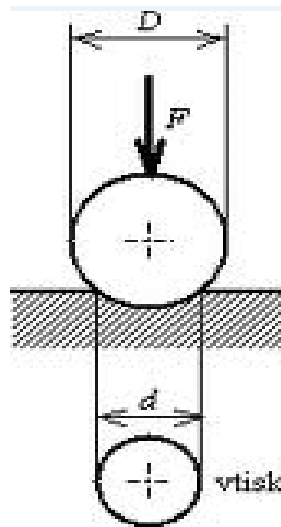
1.1 Historie vnikacích zkoušek

V roce 1891 navrhnul Kirsch zatlačování válcového indentoru silou, která se zvětšuje až do chvíle, kdy je zaznamenán první trvalý vtisk. Dané napětí bylo mírou tvrdosti. Zjištěné napětí bylo nepřesné, a proto bylo doporučeno čelní plochu bombírovat velkým poloměrem. Další vývoj pokračoval k nalezení spojitosti mezi tvrdostí a mezi kluzu. Proto bylo například prováděno několikastupňové zatížení kuličkou na stejném místě a po zatížení bylo provedeno rekrytalizační žíhání. Tohle se opakovalo, dokud se vtisk už více nezvětšoval. Z rozměru vtisku byla pak určena tvrdost – Hanriot 1912. [2]

1.2 Brinellova zkouška

1.2.1 Podstata zkoušky

Podstata Brinellovy zkoušky spočívá ve vtláčování zkušebního tělesa (kuličky) o daném průměru D , rovnoměrně se zvyšující silou F do povrchu zkoušeného kovu. Kulička vytvoří na zkušebním tělese vtisk o průměru d , který se změří na dvou na sebe kolmých místech a následně se z nich udělá aritmetický průměr. [1,2,4]



Obr. 2. Zkouška
dle Brinella [1]

Tvrдость je vyjádřena vztahem:

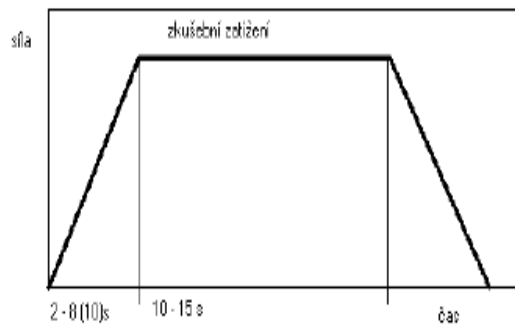
$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

- F zatěžující síla v [N]
D průměr kuličky v [mm]
d průměr vtisku v [mm]

1.2.2 Zkušební podmínky

Zkušební podmínky se musí dodržovat, aby naměřené výsledky byly porovnatelné.

- Velikost zatížení se volí s ohledem na zkoušený materiál a na průměr použité kuličky.
- Velikost zatížení se musí volit tak aby průměr vtisku d byl v hodnotách od $0,24D$ do $0,6D$
- Teplota měření musí být 10 až 35°C , v arbitrážních případech $23\pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Zkoušený vzorek musí při zkoušce být na tuhé podložce a nesmí se pohnout. Styčné plochy musí být čisté.
- Čas od začátku zatěžování zkušební síly nesmí být menší než 2s a nesmí překročit 8s . Působení zkušební síly je v rozmezí od 10s až do 15s . U některých materiálů můžou být použity jiné časy, ale musí být v toleranci $\pm 2\text{s}$. [2,6]



Obr. 3. Průběh doby zatížení u metody Brinell [6]

- Zkušební těleso se do povrchu zatlačuje kolmo k povrchu, bez chvění a rázů.
- Vzdálenost od středu vtisku k okraji zkoušeného vzorku musí být minimálně $2,5x$ větší než je průměr vtisku (platí u oceli, litiny, mědi a jejich slitin) a minimálně $3x$ větší než je průměr vtisku u zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin.
- Vzdálenost dvou sousedních středů vtisků musí být minimálně $4x$ větší než je průměr vtisku (platí u ocelí, litin, mědi a jejich slitin) a $6x$ větší než je průměr vtisku u zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin.
- Tvrdost materiálu se určuje z průměrné hodnoty velikosti vtisku, která se stanovuje měřením dvou na sebe kolmých průměrů vtisku. [6]

1.2.3 Vnikací tělesa a zkušební síly

Při zkoušce tvrdosti dle Brinella se používá buď ocelová kulička, nebo kulička z tvrdokovu. Obě kuličky dávají stejné hodnoty tvrdosti pouze do hodnoty 350HB, proto se ocelová kulička používá pro méně tvrdé materiály do této hodnoty a kulička z tvrdokovu se používá pro tvrdší materiály. Kulička z tvrdokovu má menší zbytkovou deformaci, takže má vyšší spolehlivost při měření tvrdosti. Kuličky mají průměry 10; 5; 2,5 a 1mm. Průměr kuličky závisí na tloušťce zkoušeného materiálu.

Zatížení se volí podle vztahu:

$$F = KD^2 \quad (2)$$

K je koeficient, který se volí pro ocel $K = 30$, pro neželezné kovy a slitiny $K = 10$, pro měkké neželezné kovy a kompozice $K = 2,5$. [1,2,6,7]

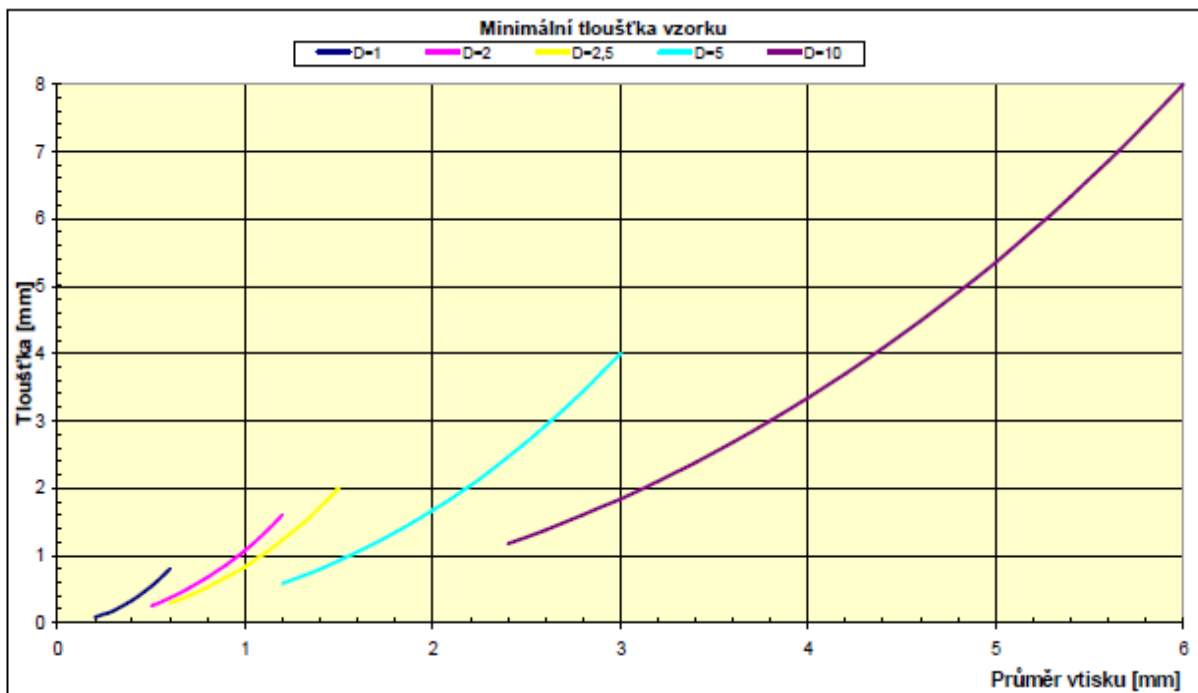
Pro úplnost uvádím tabulku i s dnes neplatnými jednotkami kp:

Tab. 1. Vztah průměru kuličky a zatěžující síly u metody Brinell [6]

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

1.2.4 Zkušební vzorky

- Vzorek musí být co nejméně ovlivněn ohřevem nebo tvářením.
- Povrch, na kterém se zkouška provádí, musí být hladký a rovný, bez okujené vrstvy, bez nečistot, cizích tělísek a hlavně bez žádných mazadel.
- Tloušťka zkoušeného vzorku musí být aspoň 8x větší než hodnota hloubky vtisku.
- Protilehlá strana vzorku nesmí mít známky deformace od vnikacího tělesa.



Obr. 4. Minimální tloušťka vzorku u metody Brinell [1]

1.2.5 Zápis hodnot tvrdosti

Výsledek měření a jeho zápis obsahují:

- Hodnotu tvrdosti
- Symbol tvrdosti:
 - HBS pro kuličku z kalné oceli
 - HBW pro kuličku z tvrdokovu
- Rozměr vnikacího tělesa
 - Průměr kuličky

- Velikost zkušebního zatížení
- Doba působení zkušebního zatížení
 - Udává se jenom tehdy, když se liší od stanovené doby 10 – 15 s.

Příklad: 300 HBS 10/750/25 – Tvrdost dle Brinella 300, stanovená kuličkou z kalné oceli o průměru 10 mm, při zkušebním zatížení 7355 N, působící po dobu 25 s. [1,6]

1.2.6 Přesnost výsledků

Přesnost vyhodnocení je závislé na přesném proměření vtisku ve zkoušeném vzorku. U Brinellovy zkoušky je to složité a obtížné, protože vtisk bývá nesouměrný a nezřetelný. Velký vliv na průměr vtisku má také vtažení materiálu po kraji vtisku u nezpevněného materiálu, nebo naopak vytlačení obvodového valu u zpevněného materiálu. Další nepřesnost může nastat u ocelové kuličky, která se může začít deformovat u zkoušených materiálů tvrdších než 350HB.

Mezi tvrdostí HBW a pevností v tahu R_m je přímá závislost (3). Z toho vyplývá, že můžeme informativně zjistit pevnost v tahu. Hodnota konstanty k závisí na materiálu. [1,5]

$$R_m = k \cdot HB \quad (3)$$

1.2.7 Ludwikova zkouška

Brinellova zkouška se rychle rozšířila, nicméně se stále projevovala její velká nevýhoda v závislosti tvrdosti na velikosti zatížení. U této zkoušky se při změně zatížení mění napjatosti složitým způsobem, tudíž zde neplatí zákon o úměrnosti přetvárné práce příslušného deformovaného objemu, který v roce 1885 vyslovil *Kick*. V roce 1907 tento nedostatek odstranil *Ludwik*, který místo kuličky použil kužel, kde zůstává poměr tangenciálního a normálního napětí při všech zatíženích stejný. Z toho vyplývá, že hodnota tvrdosti není závislá na zatížení.

Ludwik použil kužele z kalené oceli s vrcholovým úhlem 120, 90 a 60°, vrcholy byli z praktických důvodů zaobleny s poloměrem 0,2 mm.

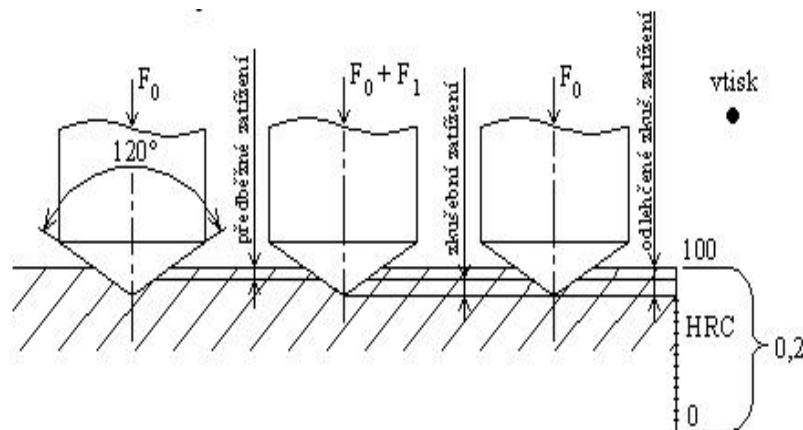
Přestože tato metoda ukázala nevýhody Brinellovi metody, tak se i přes své nesporné výhody neujala. Měla však velký vliv na rozvoj dalších metod tvrdosti.

1.3 Rockwellova zkouška

Zkouška podle Rockwella je založena na principu Ludwikovi zkoušky. *Rockwell* však použil diamantový indentor a podstatně menší zatížení než *Ludwik*. [2]

1.3.1 Podstata zkoušky

Podstata zkoušky spočívá ve vtláčování zkušebního tělesa (kuličky, kužel) o daném průměru nebo úhlu do zkoušeného materiálu dvoustupňovým pozvolným zatížením. Napřed se vtláčí indetor do tělesa předzatěžující silou (F_0), do kterého se následně nastaví stupnice hloubkoměru. Poté se zatížení zvolna zvětšuje na hlavní zatěžující sílu (F_1) předepsanou normou. Zkušební těleso vytvoří vtisk na povrchu zkušební vzorku. Tvrdost určíme z hloubky vtisku. Celková měřitelná hloubka je 0,2 mm. Tato hloubka je rozdělena na 100 dílků.[3,5]

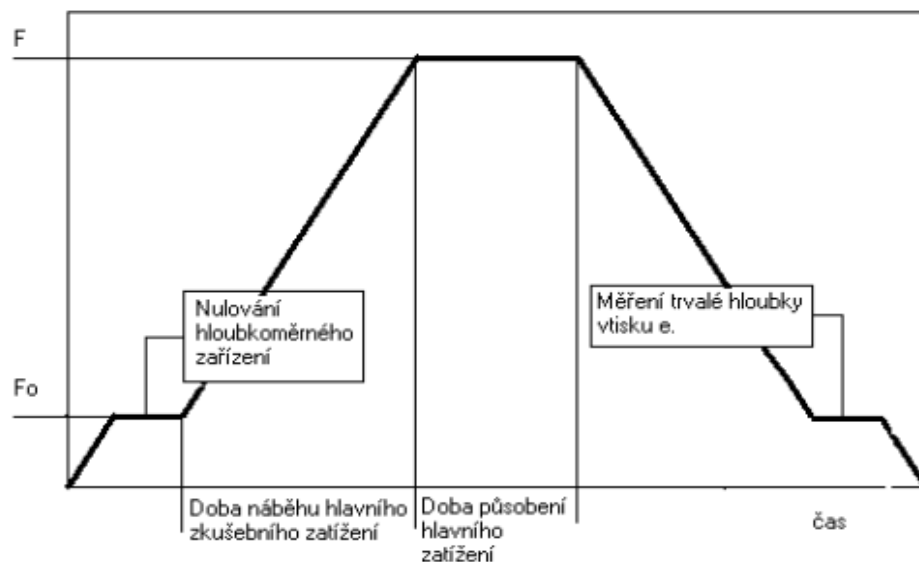


Obr. 5. Podstata metody Rockwell [3]

1.3.2 Zkušební podmínky

- Vzorek musí být upevněn na tuhé podložce tak, aby se při zkoušce nepohnul. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělísek.
- Vnikací těleso se zatlačuje kolmo do vzorku bez rázů a chvění. Po dosažení předzatížení se nuluje zařízení na měření hloubky vtisku.
- Zkouška se obvykle provádí při teplotě 10 až 35°C, v arbitrálních případech při teplotě 23±5°C.

- Doba náběhu hlavního zatížení je od 2 až do 8 s u metod HRA – K. U metod HRxx N a T to je od 1 až do 8 s.
- Doba působení hlavního zatížení je:
 - Od 1 do 3 s u materiálů, které nemají závislost plastické deformace na čase.
 - Od 1 do 5 s u materiálů, které mají závislost plastické deformace na čase.
 - Od 10 až do 15 s u materiálů, které mají vysokou závislost plastické deformace na čase.



Obr. 6. Průběh zatížení u metody Rockwell [6]

- Vzdálenost dvou sousedních středů vtisků musí být minimálně 4x větší než je průměr vtisku, ale nejméně 2 mm. Vzdálenost od středu vtisku k okraji zkoušeného vzorku musí být minimálně 2,5x větší než je průměr vtisku. Platí pro metody HRA - K.
- Vzdálenost dvou sousedních středů vtisků musí být minimálně 3x větší než je průměr vtisku. Vzdálenost od středu vtisku k okraji zkoušeného vzorku musí být minimálně 2,5x větší než je průměr vtisku. Platí pro metody HRxxN a T. [6]

1.3.3 Vnikací tělesa a zkušební síly

Zkušební tělesa mohou být dvojího typu, buď diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°, nebo kulička z tvrdokovu o průměru 1,5857 nebo 3,175 mm. Celkové zatížení se skládá z předzatížení a hlavního zatížení. Přehled vnikacích těles a zkušebních sil u různých metod je ukázán v tab. 2. [1,6]

$$F = F_o + F_1 \quad (4)$$

Tab. 2. Vnikací tělesa a zkušební síly pro různé metody Rockwell [6]

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Vnikací těleso	Předzatížení F_o [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		1 471 (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

1.3.4 Zkušební vzorky

- Příprava povrchu vzorku tak, aby se minimalizovali jeho změny vlastností, které mohou být způsobeny broušením, leštěním, ohřevem nebo tvářením při řezání.

- Tvrdosti se zkouší na povrchu, který je hladký, rovný, bez okujené vrstvy, bez cizích tělísek a hlavně bez mazadel. Vyjimku tvoří titan, kde se mazadlo může použít, ale musí to být uvedeno v protokolu.
- Tloušťka vzorku musí být minimálně 10x větší, než je hodnota trvalé hloubky vtisku. Na protilehlé straně vzorku nesmí být patrné žádné stopy deformace.
- Při zkoušení vypuklých povrchů se používá opravných součinitelů.
- V případě, že nejsou k dispozici opravné součinitele, musí být zkouška na vypuklých plochách předmětem zvláštní dohody.
- U zkoušení zaobleného povrchu musíme dbát na správné ustavení vzorku. Vypuklá strana musí být obrácena ke vnikacímu tělesu. Kdybychom nastavili ke vnikacímu tělesu vydutou stranu, mohlo by dojít k chybě v měření. [6]

1.3.5 Zápis hodnot tvrdosti

Výsledek měření a jeho zápis obsahují:

- Hodnotu tvrdosti
- Symbol tvrdosti
 - HR
- Stupnici tvrdosti
 - A až N
- Doba působení zkušebního zatížení
 - Uvádí se, když se liší od stanovené doby

Příklad: 60 HR30N – tvrdost dle Rockwella měřená na stupnici 30N. [1]

1.3.6 Přesnost výsledků

Jelikož se u této metody určuje tvrdost z hloubky vtisku, tak zpevněný a nezpevněný materiál kolem vtisku nemá velký vliv na zkoušku, jako u předchozí zkoušky. Větší nepřesnosti může způsobit nesprávný úhel a zaoblený vrcholu u diamantu. Při větším vrcholovém úhlu je vtisk mělčí a tím se naměří větší hodnota tvrdosti. Naopak je tomu při menším vrcholovém úhlu. [6]

1.4 Vickersova zkouška

1.4.1 Podstata zkoušky

Podstata zkoušky spočívá ve vtlačování zkušební tělesa (čtyřboký jehlan) o daném úhlu do zkoušeného materiálu zatížením F po stanovenou dobu. Poté se měří délky úhlopříček, které zůstanou po odlehčení zatížení, a následně se vypočítá aritmetický průměr. Tato metoda lze použít pro všechny tvrdosti.

Tvrdost dle Vickerse se vypočítá jako zatížení k ploše vtisku, která se uvažuje jako pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem daným vakacím tělesem. [1,6]

Tvrdost je vyjádřena vztahem:

$$HV = 0,102 \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{u^2} = 0,189 \frac{F}{u^2} \quad (5)$$

F je zkušební zatížení v N

u je aritmetický průměr naměřených úhlopříček v mm

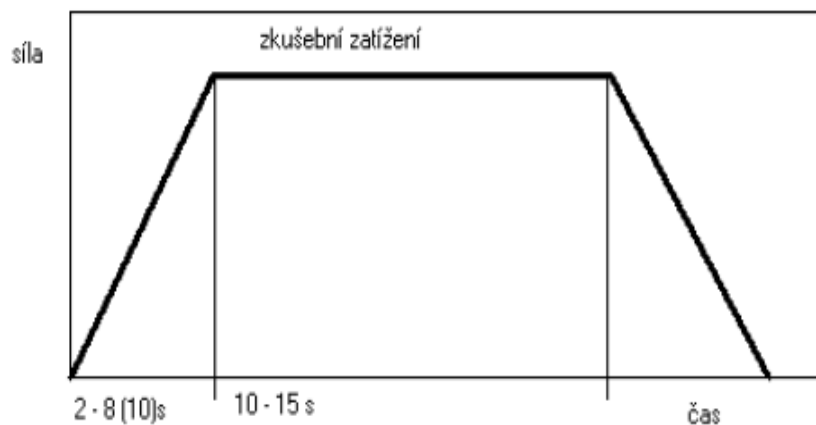
Metoda Vickers se dělí na 3 oblasti podle použitého zatížení.

Tab. 3. Dělení metody Vickers [6]

Zkušební zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Označení
$F \geq 49,03$	$\geq HV5$	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV5	Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až < HV 0,2	Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse

1.4.2 Zkušební podmínky

- Vzorek musí být upevněn na tuhé podložce tak, aby se při zkoušce nepohnul. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělísek.
- Vnikací těleso se zatlačuje kolmo do vzorku bez rázů a chvění.
- Zkouška se obvykle provádí při teplotě 10 až 35°C, v arbitrážních případech při teplotě 23±5°C.
- Doba od začátku zatěžování do dosažení zkušební síly nesmí být menší než 2 s a delší než 8 s. U zkoušek s nízkým zatížením nesmí překročit 10 s.
- Doba působení zkušební síly je v rozmezí 10 – 15 s. Pro některé materiály mohou být použity delší časy, ale s tolerancí ±2 s.
-

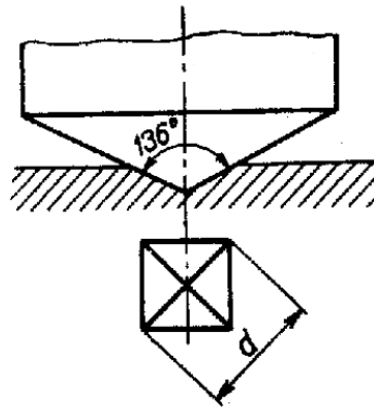


Obr. 7. Průběh zkušebního zatížení u metody Vickers [6]

- Vzdálenost dvou sousedních středů vtisků musí být minimálně 3x větší než je velikost úhlopříčky (u ocelí, litin, mědi a jejich slitin) a minimálně 6x větší než je velikost úhlopříčky (u lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin).
- Vzdálenost od středu vtisku k okraji zkoušeného vzorku musí být minimálně 2,5x větší než je velikost úhlopříčky (platí u oceli, litiny, mědi a jejich slitin) a minimálně 3x větší než je průměr vtisku u zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin.

1.4.3 Vnikací těleso a zkušební síly

U všech metod podle Vickerse je vnikací těleso stejné. Je to čtyřboký pravidelný jehlan se čtvercovou základnou vyrobený z diamantu s vrcholovým úhlem 136° . [6]



Obr. 8. Schéma zkoušky Vickers [2]

Při zkoušce se musí použít některé ze zatížení (viz Tab. 3).

Volba zkušební síly:

Tab. 4. Zkušební zatížení u metody Vickers [6]

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při malém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,2	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

1.4.4 Zkušební vzorky

- Příprava povrchu vzorku tak, aby se minimalizovali jeho změny vlastností, které mohou být způsobeny broušením, leštěním, ohřevem nebo tvářením při řezání.
- Tvrdosti se zkouší na povrchu, který je hladký, rovný, bez okujené vrstvy, bez cizích tělísek a hlavně bez mazadel.
- Tloušťka vzorku musí být minimálně 1,5x větší, než je hodnota úhlopříčky vtisku. Na protilehlé straně vzorku nesmí být patrné žádné stopy deformace.
- Při zkoušení vypuklých povrchů se používá opravných součinitelů. [6]

1.4.5 Zápis hodnot tvrdostí

Výsledek měření a jeho zápis obsahují:

- Hodnotu tvrdosti
- Symbol zkoušky
 - HV
- Velikost zkušebního zatížení
- Doba působení zkušebního zatížení
 - Uvádí se, když se liší od stanovené doby

Příklad: 640 HV 30/20 – Tvrdost dle Vickerse 640 stanovená při zkušebním zatížení 294,2 N, po dobu působení 20 s. [1]

1.4.6 Přesnost výsledků

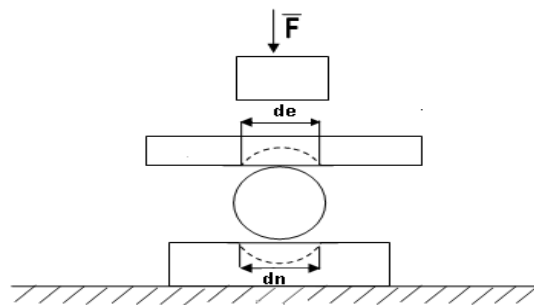
Vickersova zkouška je z uvedených metod nejpřesnější, ale vzhledem k velmi malým rozměrům vtisků potřebuje pečlivou úpravu povrchů. U malých zatížení nejlépe broušení. Tuto metodu můžeme použít pro všechny tvrdosti a není skoro závislá na zatížení. Pro kontrolování tvrdosti po celou pracovní dobu se používá ve velkých závodech zdokonalených Vickersových tvrdoměrů, tzv. diatestorů. Obraz čtvercového vtisku je promítán ve zvětšeném měřítku na matnici. To umožňuje pohodlné a rychlé čtení délek úhlopříček u.[3,5]

1.5 Dynamické zkoušky vnikací

Na rozdíl od statických zkoušek, kde se vnikací těleso nastavilo na povrch vzorku a zatěžující síla se pozvolna zvětšovala. U zkoušek dynamických je tomu jinak. Zkušební těleso je buď v jisté vzdálenosti od zkoušeného vzorku a je proti němu vrženo, nebo je zkušební těleso na zkušebním vzorku je jiným tělesem rázem vtisknuto do vzorku. U nás se nejvíce používá měření tvrdosti pomocí kladívka Poldi a Baumannova kladívka. [2,4]

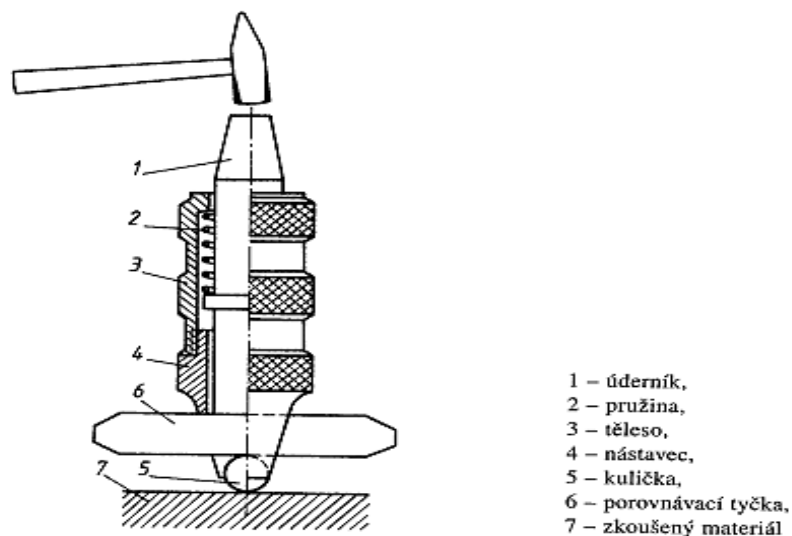
1.5.1 Kladívko Poldi

Je to nejmenší přenosný tvrdoměr pro měření tvrdosti metodou Brinell, který byl vyroben a patentován v roce 1921. Jeho přednost je v malé hmotnosti, rozměrech a použitelnosti v jakékoli poloze. Kladívko Poldi je založeno na srovnávací metodě. Tvrdost se stanovuje na základě plastické deformace vzniklé rázem a následném srovnání s velikostí vtisku na materiálu o známé tvrdosti. Využívá se hlavně při měření tvrdosti na velkých výrobcích, kde nelze použít statický tvrdoměr, pro měření metodou Brinell. [4,6]



Obr. 9. Podstata kladívka Poldi. [2]

Při měření se kladívko nastaví kolmo ke zkoušenému materiálu a úderem na úderník kládívkem o hmotnosti cca 500 g se vytvoří vtisky. Jeden na zkoušeném materiálu (dn), a druhý na porovnávací tyči (de). Průměry vtisků se změří a vzájemně porovnají. Poté se stanoví tvrdost zkoušeného materiálu z přepočítávacích tabulek, které jsou dodávány s tvrdoměrem.[6]



Obr. 10. Kladívko Poldi. [4]

Tvrdoměr se skládá z tělesa, které má uvnitř odpružený úderník. Na konci pouzdra je držák na ocelovou kuličku o průměru 10 mm. Mezi úderník a kuličku je umístěna porovnávací tyč čtvercového průřezu o tvrdosti cca 200 HBS a hraně 11 mm. Na hodnotu tvrdosti se však musí pohlížet jako na informativní, protože je zatížená chybou, která tvoří až $\pm 10\%$. [6]

1.5.2 Baumanovo kladívko

Jedná se o přímou metodu. K dosažení vtisku je potřeba vyvolat rázovou energii pomocí pružiny, která má danou tuhost. Proto je kulička vtlačována do zkoušeného materiálu stálou energií. Jde o obdobu zkoušky kladívkem Poldi.

Odjištěním pružiny dojde k úderu razníku na vnikací těleso ve tvaru kuličky o průměru 10 mm a jeho vtlačení do povrchu zkoušeného vzorku. Měří se průměry dvou na sebe kolmých průměrů, které vzniknou vtisknutím kuličky do vzorku. Tvrdost se určuje jako poměr zkušebního zatížení a povrchu vtisku. Výsledná tvrdost je zapisována tímto způsobem: HB BAUMANN [2,8]

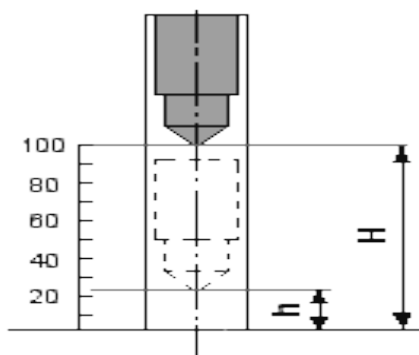
2 ZKOUŠKY ODRAZOVÉ

Metoda pružného odrazu je založena na měření tvrdosti na základě odrazu standardního pružného tělesa, které padá z určité výšky na zkoušející vzorek. Měříme výšku nebo úhel odrazu zkoušejícího tělesa, která nám charakterizuje tvrdost. Odrazové zkoušky jsou většinou založeny na metodě Shoreho.

Podstatou je měření rozdílu dodané energie pádem indentoru a energie získané útlumem pružných deformací. Celková energie je součtem pružných a trvalých energií. Poměr těchto energií je poté známkou tvrdosti materiálu. [2]

2.1 Shoreho skleroskop

Tato metoda patří mezi dynamicko-elastické zkoušky. Je to zkouška, při které se zjišťuje tvrdost odměřením výška po odrazu h závaží z měřeného vzorku. Závaží může být buď kulička, nebo diamantový hrot. Působením závaží dojde k plastické deformaci zkoušeného vzorku, při které dojde ke spotřebování části energie závaží a kvůli tomu se pak neodrazí do původní výšky H . [2,3,9]



Obr. 11. Shoreho skleroskop [9]

Shoreho skleroskop se skládá z kalibrované trubky, ve které je spouštěno závaží. Výška odrazu závisí na modulu pružnosti, proto se přesně mohou srovnávat pouze výsledky s přibližně stejným modulem. Výška odskoku je přímo hodnotou tvrdosti. Tohoto způsobu zjišťování tvrdosti se používá málo, protože je nespolehlivá. Používá se pro měření velkých výrobků nebo konstrukcí. [6,9]

Stupnice Shore HSC

- Hmotnost pádového tělesa: 2,5 g
- Pádová výška: 254 mm
- Vzorec:

$$HSC = \frac{(10^4 \times h)}{(65 \times H)} \quad (6)$$

H pádová výška v [mm]

h výška odskoku v [mm]

Stupnice Shore HSD

- Hmotnost pádového tělesa: 36,2 g
- Pádová výška: 19 mm
- Vzorec:

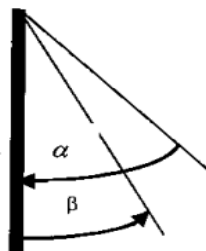
$$HSD = \frac{(140 \times h)}{H} \quad (7)$$

H pádová výška v [mm]

h výška odskoku v [mm]

2.2 Duroskop

Tato metoda se používá méně než předcházející. Přístroj se skládá z kladívka s ocelovým kulovým vrchlíkem na čele. Podstata spočívá ve spuštění definované tělíska z úhlu α na svislou stěnu zkoušeného vzorku. Sledují se úhel β , do kterého se těleso dostane po odrazu z plochy zkoušeného vzorku. Vzhledem k tomu, že je zkouška založena na elastické deformaci zkoušeného povrchu, nesmí být na tělese žádné stopy deformace.[2]



Obr. 12. Duroskop [2]

3 ZKOUŠKY VRYPOVÉ

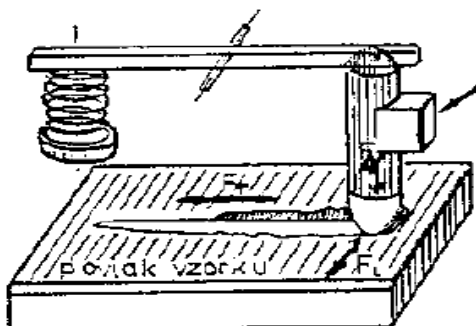
Vrypové zkoušky tvrdosti jsou založeny na principu Mohsovy stupnice pro zkoušení minerálů. V té je 10 nerostů, z nichž každý následující je schopen vyrýt do ostatních předcházejících nerostů vryp. Sestavení nerostů v Mohsově stupnici a pořadí materiálů používaných materiálů je uvedeno v tab. 5. [2]

Tab. 5. Mohsova stupnice [2]

1. mastek	6. živec	Pořadí materiálu používaného ve strojírenství Grafit 0,5 cín 1,5 olovo 1,5 hliník 2 zlato 2,5 Stříbro 2,5 antimon 3,5 čisté železo 4,5 platina 4,5 Měkká ocel 5 iridium 6 tvrdá ocel 8,5 nitridovaný povrch 9 slinuté karbidy 9,8
2. sůl kamenná	7. křemen	
3. vápenec	8. topas	
4. kazivec	9. korund	
5. apatit	10. diamant	

Nevýhodou je však velmi malá citlivost stupnice. U kovů a jejich slitin se tvrdost určuje z šířky vytvořeného vrypu na zkoušeném vzorku. Martens zavedl přístroj, který se používá k určování tvrdosti vrypem. Princip tohoto přístroje je, že se po hladké ploše zkoušeného vzorku pojíždí diamantovým kuželem s vrcholovým úhlem 90° , který můžeme zatížit silou až 19,5 N. Vytvořený vryp, se měří pomocí optického mikroskopu. Tvrdost udává zatížení, které vytvoří vryp o šířce 0,01 mm. Druhá možnost je porovnávat šířku vrypu při stejném zatížení.

Tento způsob zjišťování tvrdosti je velmi nepřesný a z tohoto důvodu se používá velice zřídka. Hlavně se používá při studiu velmi tvrdých a několik mikronů tenkých povrchových vrstev nitridů a karbidů kovů. V literatuře se takhle zkouška nazývá jako scratch test.



Obr. 13. Schéma vrypové zkoušky [2]

U této zkoušky je síla zatížení proměnná. Na určité délce se vytvoří vryp, po které síla narůstá. U vrstev se pak vyhodnocuje adhezivně-kohezní chování, což je odezva vrstvy na pronikající těleso. Vnikací těleso je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a poloměrem zaoblení vrcholu 0,2 mm. U tohoto případu se vyhodnocuje kritické zatížení L_c , které má za následek adhezivní odtržení vrstvy. Základní rychlost posuvu vzorku bývá 10 mm/min: Rychlost zvyšování síly bývá 100 N/min. Přístroj scratch testu zaznamenává průběh normálové a tangenciální síly působící na indentor. Zaznamenává i signál akustické emise. Který vzniká při šíření a rozvoji vnitřních trhlinek vlivem vnějšího zatěžování. Po provedení zkoušky se povrch vyhodnocuje optickým mikroskopem a hledají se místa s adhezivním a kohezním porušením. [2]

4 OCEL

Ocel je slitina železa, uhlíku a dalších legujících prvků, které se do oceli dostávají záměrně nebo neúmyslně. Pro své mechanické a technologické vlastnosti je ocel dodnes nejdůležitějším technickým materiálem. Její všestrannost vede k výrobě ocelí o nejrůznějších vlastnostech. Chemickým složením, tepelným zpracováním a způsobem tváření je možné měnit mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti ocelí v širokém rozsahu. Hlavní surovinou pro výrobu ocelí je vedle surového železa i ocelový odpad. Slitiny železa jsou většinou komplexní slitinami, ve kterých jsou zpravidla mimo uhlíku přítomny i jiné prvky jako: křemík, mangan, fosfor, síra, měď a bohužel i nečistoty jako jsou prvky: kyslík, vodík, dusík. [1,10]

4.1 Množství a vliv přísad na vlastnosti ocelí

Prvek je považován za přísadu, když je přítomen v dané minimální koncentraci. Legovaná ocel je ta, která má obsah uvedených prvků větší, než je uvedeno v tab. 6. [4]

Tab. 6. Množství legujícího prvku [4]

Prvek	Obsah	Prvek	Obsah
Mangan	0,9 %	Molybden	0,1 %
Křemík	0,5 %	Vanad	0,1 %
Chrom	0,3 %	Wolfram	0,1 %
Nikl	0,2 %	Titan	0,1 %
Kobalt	0,2 %	Hliník	0,1 %

Legující prvky přidáváme, abychom zlepšili nějaké vlastnosti:

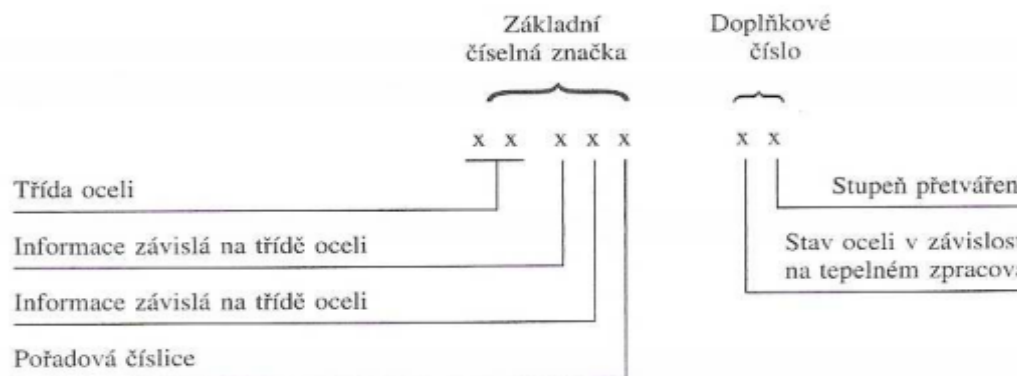
- Zlepšení mechanických vlastností, hlavně pevnost a tvrdost, bez výrazného snížení houževnatosti oceli.
 - Přísady: Mn, Si, Ni, Mo, V, W, Cr
- Zvýšení prokalitelnosti snížením rychlosti rozpadu austenitu.
 - Přísady: Cr, Mn, Mo, V
- Vytvoření tvrdých a odolných karbidů odolných proti vysokým teplotám.
 - Přísady: W, Cr, V, Mo
- Zvýšení žárovevnosti.
 - Přísady: Cr, Mo, V, W [1]

4.2 Označení ocelí

Naše normy označují oceli číselně a taky barevně.

4.2.1 Číselné značení ocelí

Označení se skládá ze základní číselné značky a z doplňkového čísla. Základní číselná značka má pět čísel.



Obr. 14. Schéma číselného označení ocelí [1]

- První číslice je 1 a označuje, že se jedná o ocel k tváření.
- Druhá číslice označuje ve spojení s první číslicí třídu jakosti oceli. Třídy ocelí jsou v tab. 7.
- Třetí a čtvrtá číslice je liší podle třídy oceli.
- Pátá číslice má význam pořadový.
- Doplňkové číslo má jednu nebo dvě číslice. Její význam je v tab. 8.

[1]

Tab. 7. Třídy ocelí [1]

Třída oceli	Oceli podle		Charakteristika ocelí	
	použití	stupně legování		
10	kon- strukční	nelegované	předepsané hodnoty mechanických vlastností, chemické složení není předepsáno	
11			předepsané hodnoty mechanických vlastností a obsah C, P, S popř. (P + S) a dalších prvků	
12			předepsaný obsah C, Mn, Si, P, popř. (P + S) i dalších prvků	
13		nizkolegované	legovací prvky: Mn, Si, Mn – Si, Mn – V	
14			legovací prvky: Cr, Cr – Al, Cr – Mn, Cr – Si, Cr – Mn – Si	
15			legovací prvky: Mo, Mn – Mo, Cr – Mo, Cr – V, Cr – W, Mn – Cr – V, Cr – Mo – V, Cr – Si – Mo – V, Cr – Mo – V – W	
16		legované	nizkolegované a středně legované	legovací prvky: Ni, Cr – Ni, Ni – V, Cr – Ni – Mn, Cr – Ni – V, Cr – Ni – W, Cr – Ni – Mo, Cr – V – W, Cr – Ni – V – W
17			středně legované a vysokolegované	legovací prvky: Cr, Ni, Cr – Ni, Cr – Mo, Cr – V, Cr – Al, Cr – Ni – Mo, Cr – Ni – Ti, Cr – Mo – V, Mn – Cr – Ni, Mn – Cr – Ti, Mn – Cr – V, Cr – Ni – Mo – V, Cr – Ni – Mo – W, Cr – Ni – Mo – Ti, Cr – Ni – V – W, Cr – Ni – W – Ti atd.
19		nástro- jové	nelegované	předepsaný obsah C, Mn, Si, P, S
			legované (nizko, středně, vysoko)	legovací prvky: Cr, V, Cr – Ni, Cr – Mo, Cr – Si, Cr – V, Cr – W, Cr – Al, Cr – Ni – W, Cr – Si – V, Cr – Mo – V, Cr – V – W, Cr – Ni – Mo – V, Cr – V – W – Co, Cr – Ni – Mo – W, Cr – Ni – V – W atd.

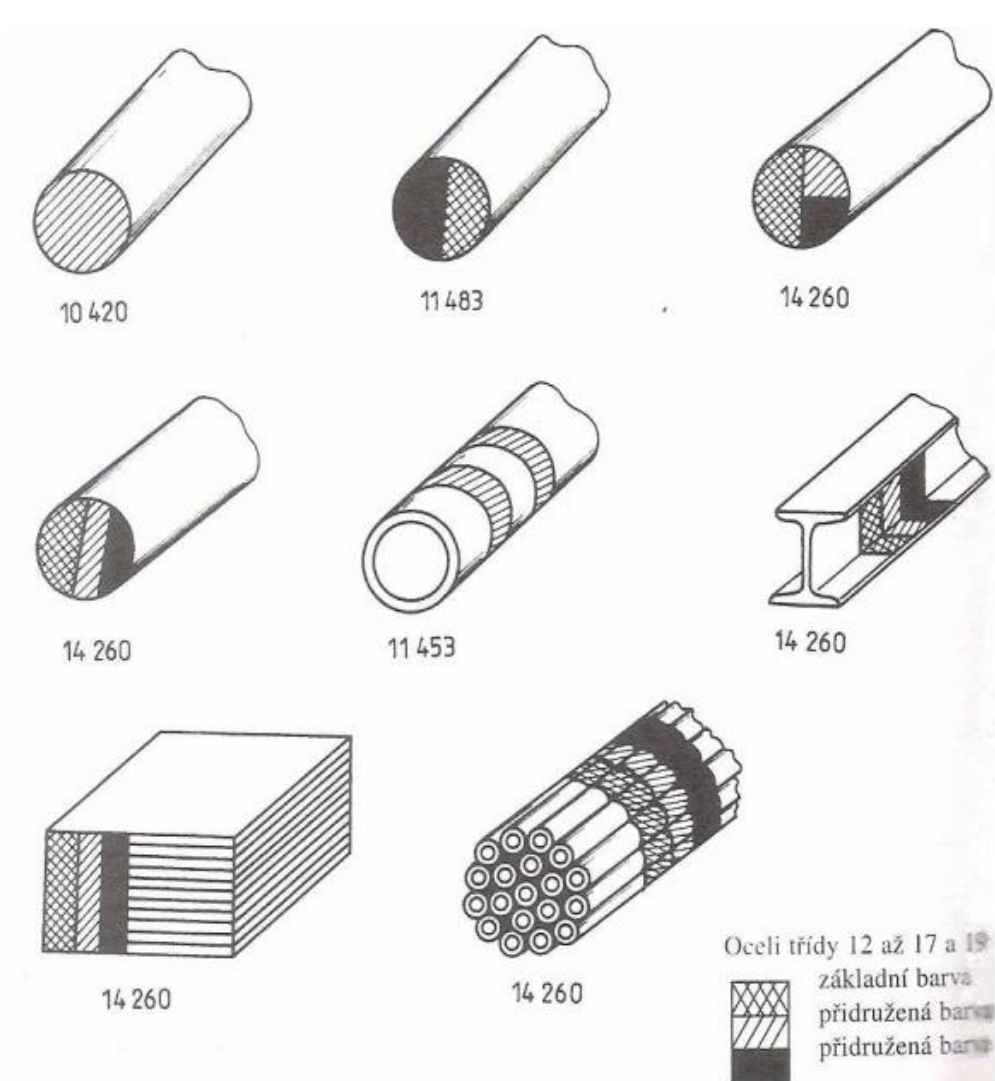
Tab. 8. Význam doplňkové číslice [1]

První doplňková číslice ¹⁾	Stav oceli (druh tepelného zpracování)	Druhá doplňková číslice ²⁾	Stupeň přetváření		
			pásky válcované zastudena	plechy válcované	
				zatepla	zastudena
1 x x x x 0	tepelně nezpracovaný	1 x x x x x 0	dále nepřeválcováno	dále nepřeválcováno	
1 x x x x 1	normalizačně žháný	1 x x x x x 1	lehce převálcováno	lehce převálcováno	
1 x x x x 2	žháný (s uvedením způsobu žhání)	1 x x x x x 2	1/4 tvrdý		
1 x x x x 3	žháný na měkko	1 x x x x x 3	1/2 tvrdý		
1 x x x x 4	kalený nebo kalený a popouštěný při nízkých teplotách, po rozpouštěním žhání (jen u austenitických ocelí)	1 x x x x x 4	3/4 tvrdý		
		1 x x x x x 5	4/4 tvrdý		
		1 x x x x x 6	5/4 tvrdý		
1 x x x x 5	normalizačně žháný a popouštěný	1 x x x x x 7	netvoří se při něm čtyřlístky (pásky jsou zpracovány se zřetelem na omezení anizotropie mechanických vlastností materiálů – omezení tvorby cípů); mechanické vlastnosti jako u měkce žháného materiálu		
1 x x x x 6	zušlechťený na dolní pevnost obvyklou u příslušné oceli	1 x x x x x 8	zpracováno podle zvláštního předpisu		
1 x x x x 7	zušlechťený na střední pevnost obvyklou u příslušné oceli				
1 x x x x 8	zušlechťený na horní tvrdost obvyklou u příslušné oceli				
1 x x x x 9	stavy, které nelze označit číslicemi 0 až 8	1 x x x x x 9	zpracováno podle dohodnutého předpisu		

4.2.2 Barevné označení ocelí

Normalizované hutní výrobky z ocelí tříd 10 až 19 se označují jedním až třemi barevnými pruhy. Jsou dva druhy označování, které norma rozeznává. Jeden druh je pro označování ocelí tříd 10 a 11. Druhý způsob je pro oceli tříd 12 až 17 a 19.

U prvního druhu je použito jednoho, nebo maximálně dvou barevných odstínů. U druhého druhu je použito třech barevných odstínů. Každá třída má daný svůj základní odstín. Jednotlivé druhy ocelí téže třídy mají další dvě různé přidružené barvy. Pro značení ocelí je 13 odstínů. Jednotlivé výrobky se označují na čele nebo konci polotovaru. [1]



Obr. 15. Barevné označení ocelí [1]

4.3 Nízkouhlíkové oceli

4.3.1 Hlubokotažné oceli

Oceli pro výrobu hlubokotažných plechů jsou nízkouhlíkové s minimálním obsahem doprovodných prvků. Plechy určené pro zpracování hlubokým nebo velmi hlubokým tažením za studena musí mít především dobré plastické vlastnosti, stejnoměrné v celém objemu, které se nemění v době mezi výrobou plechů a jejich zpracováním, tedy nepodléhají stárnutí. Aby se snížil sklon ke stárnutí, jsou stabilizovány přísadou prvků, např. Al, Ti, V, B, Zr a Nb. Požadované plastické vlastnosti těchto nízkouhlíkových ocelí je nutno zajistit vhodnou kombinací tváření za studena a tepelného zpracování, kterou se dosáhne nejvhodnější mikrostruktura. Hlubokotažné oceli: 11 300, 11 305, 11 320, 12 009 atd. [11]

4.3.2 Oceli pro elektrotechnické plechy

Plechý pro výrobu jader transformátorů a točivých strojů musí mít především charakteristické magnetické vlastnosti, ale současně také schopnost k technologickému zpracování. Těmto účelům nejlépe vyhovují oceli s obsahem 1 až 4,5 % Si a s minimálním obsahem uhlíku a doprovodných prvků.

Podle účelu použití lze elektrotechnické oceli rozdělit na oceli pro plechy transformátorové a oceli pro plechy dynamové. Podle způsobu výroby se dělí plechy válcované za tepla a plechy válcované za studena. [11]

4.3.3 Oceli k cementování

Do této skupiny patří oceli s nízkým obsahem uhlíku, které mají i po kalení bez popouštění dobré plastické vlastnosti. Vysoké tvrdosti povrchu se dosahuje obohacením povrchových vrstev uhlíkem před kalením. Máli být tvrdost povrchu zachována, nesmějí být součásti pro kalení popouštěny na teploty vyšší než 150°C až 200°C.

Podle chemického složení se cementační oceli dělí na: uhlíkové (12 010, 12 020, 12 024), chromové (12 120), chrommanganové (14 220, 14 221), niklové (16 121, 16 320) a chromniklové (16 220, 16 231, 16 420, 16 520) [11]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Bakalářská práce se zabývala měřením tvrdostí nízkouhlíkových ocelí. Pro bakalářskou práci byly vybrány oceli 11353 a 14220, které byly chemicko-tepelně zpracovány (cementace, nitridace). U těchto materiálů byla měřena tvrdost podle Rockwella, podle příslušných zkoušek (HRC, HRA, HR15N, HR30N). Naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cíl práce:

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

5.1 Zvolené typy zkoušek

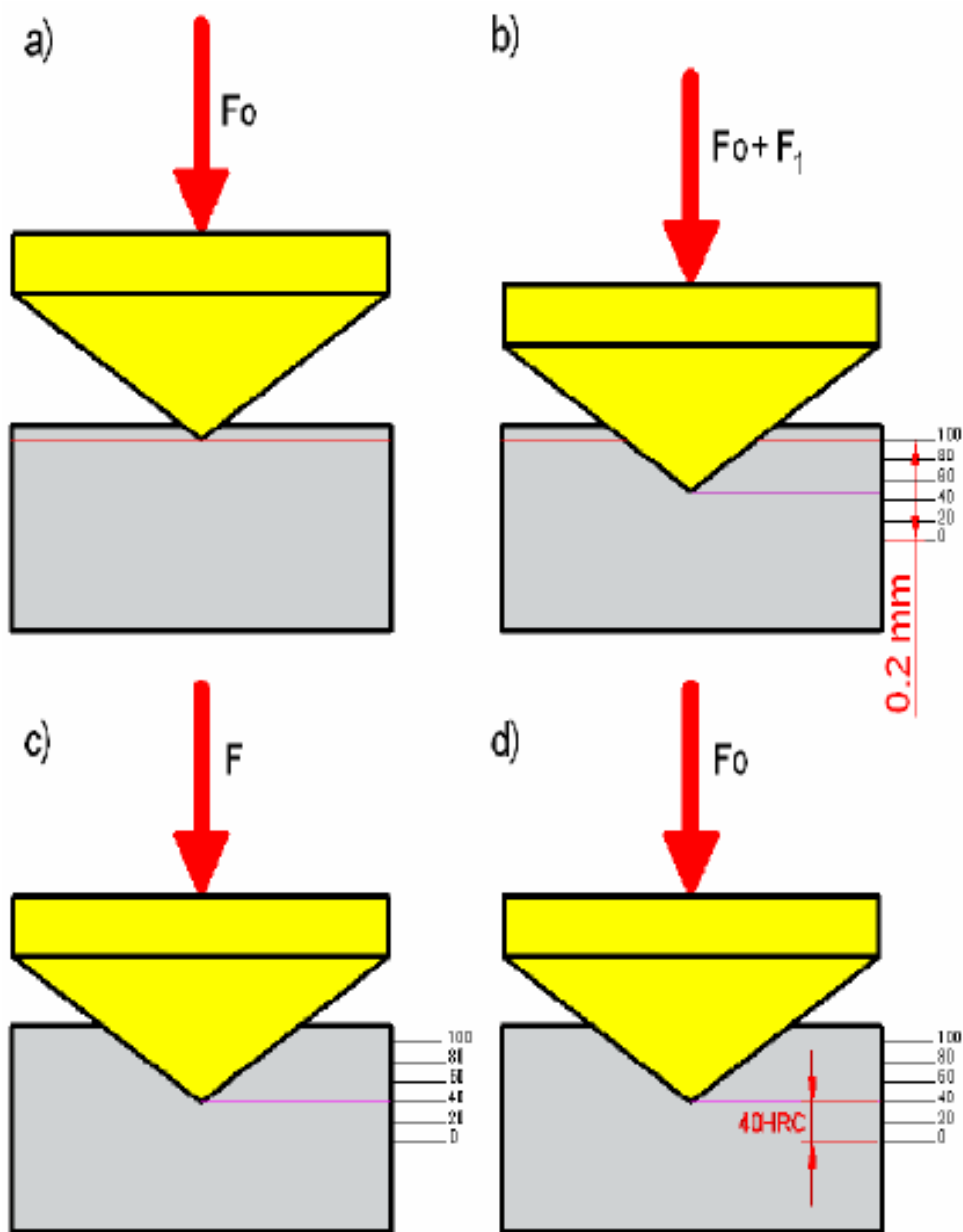
Z důvodu použití chemicko-tepelného zpracování u zvolených ocelí, bylo nutné zvolit takový druh zkoušky, který určí přesně hodnotu tvrdosti zadaných zkušebních vzorků. Při chemicko-tepelném zpracování byla ovlivněna pouze malá povrchová vrstva, proto bylo rozhodnuto použít zkoušku podle Rockwella. U této metody není nutná úprava povrchu před samotným měřením a tím pádem i ovlivněním struktury a vlastností modifikované vrstvy. Byly použity čtyři metody měření dle Rockwella, které splnili požadavky na tento typ měření tvrdosti. Měření se provádělo na stroji Easydur Italiana dle stanovených norem.

Tab. 9. Použité normy při měření

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

5.2 Postup měření

V bakalářské práci byly použity metody měření tvrdosti podle Rockwella, u kterých je jako indentor diamantový kužel s poloměrem $r = 2 \text{ mm}$ a vrcholovým úhlem 120° . Na měřícím stroji se nastavila stupnice dané metody a vzorek se položil na podložku pod indentor. Zkušební vzorek byl napřed zatížen předzatěžující silou F_0 (Obr.15), která pronikne vrchní vrstvou materiálu, proto se nemusel povrch před měřením upravovat. Po určité výdrži se zatížení zvýší až na sílu F přičtením síly F_1 . Velikost síly F a F_0 závisí od zvolené metody měření. Tvrdost daného vzorku získáme tak, že od hloubky indentoru při předzatěžující síle vyneseme stupnici se 100 dílky až do hloubky 0,2 mm. Výsledná tvrdost je rozdíl hloubky při předzatěžující síle a hloubky po ukončení působení přídavného zatížení.



Obr. 16. Schéma metody HR

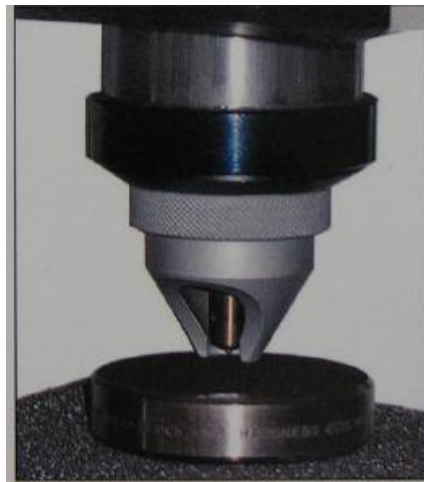
F_0 předzatěžující síla

F_1 přídavné zatížení

F výsledná síla

Tab. 10. Vnikací tělesa a síly pro dané metody Rockwell

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	264,78	294,2



Obr. 17. Měřicí hlava

6 OCEL 11 353

Ocel 11 353 je konstrukční nízkouhlíková nelegovaná ocel, která má předepsané chemické složení. Svařitelnost zaručená do tloušťky 25 mm. Používá se na bezešvé trubky, pro nosné trubkové konstrukce na vedení oleje, nafty, vody, páry, plynu, vzduchu a na spojování součástí potrubí.

- Max obsah prvků: 0,18% C, 0,05% S, 0,05% P a 0,09% P+S
- Pevnost v tahu: 343 až 441 MPa
- Normalizační žihání: 900 až 930°C
- Tvrdost max.: 135HB [12]

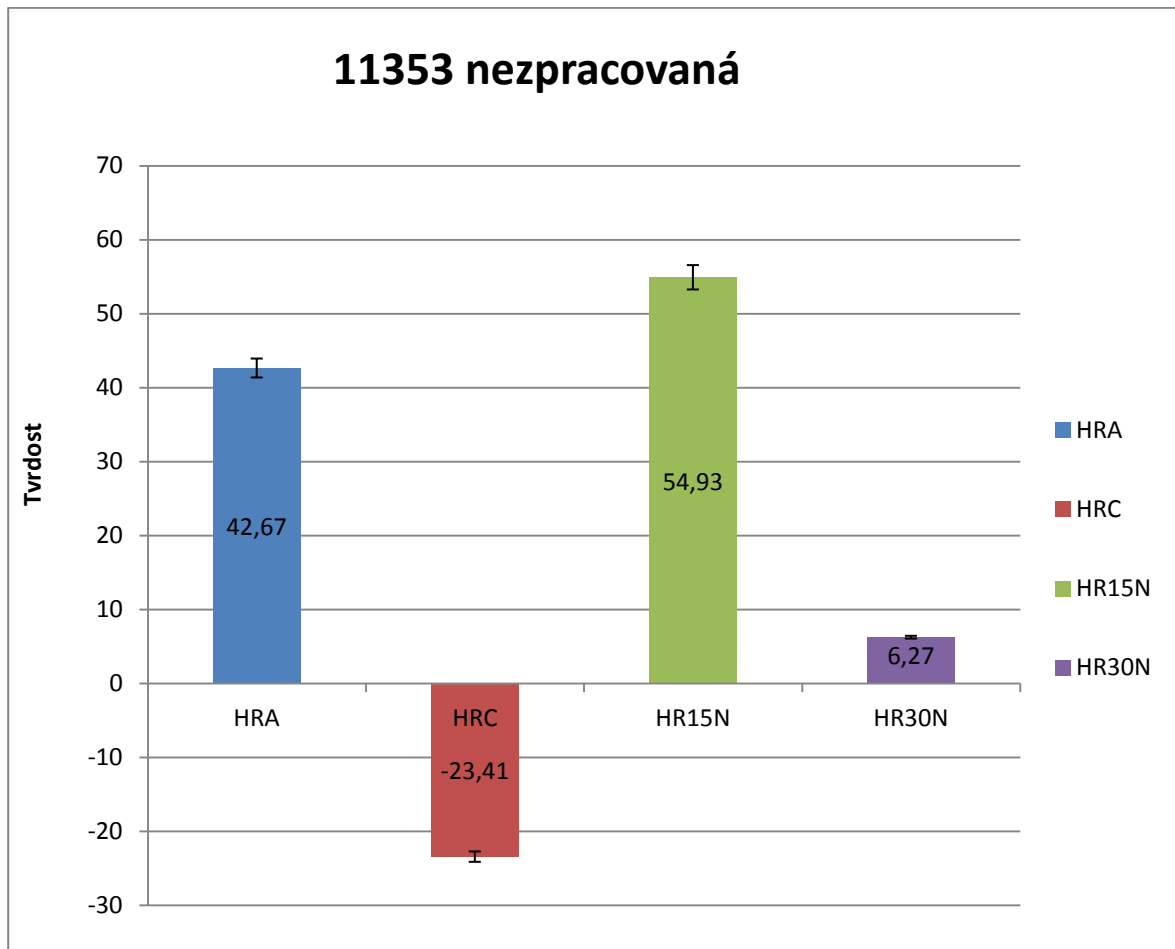
6.1 Nezpracovaná ocel 11 353

Tato ocel není chemicko-tepelně zpracována, proto by jeho vlastnosti měli být stejné, jako je výše uvedeno.



Obr. 18. Vzorek nezpracované oceli 11 353

6.1.1 Interpretace výsledků nezpracované oceli 11 353



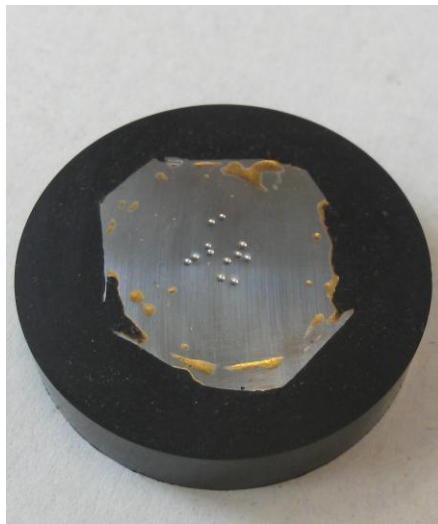
Obr. 19. Porovnání tvrdosti u nezpracované oceli 11 353

Z měření tvrdosti zkušebních vzorků vypnulo, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla zjištěna u metody HR15N, zatímco nejmenší hodnota tvrdosti byla naměřena metodou HRC, jak je patrné z obrázku (Obr. 18.).

6.2 Cementovaná ocel 11 353

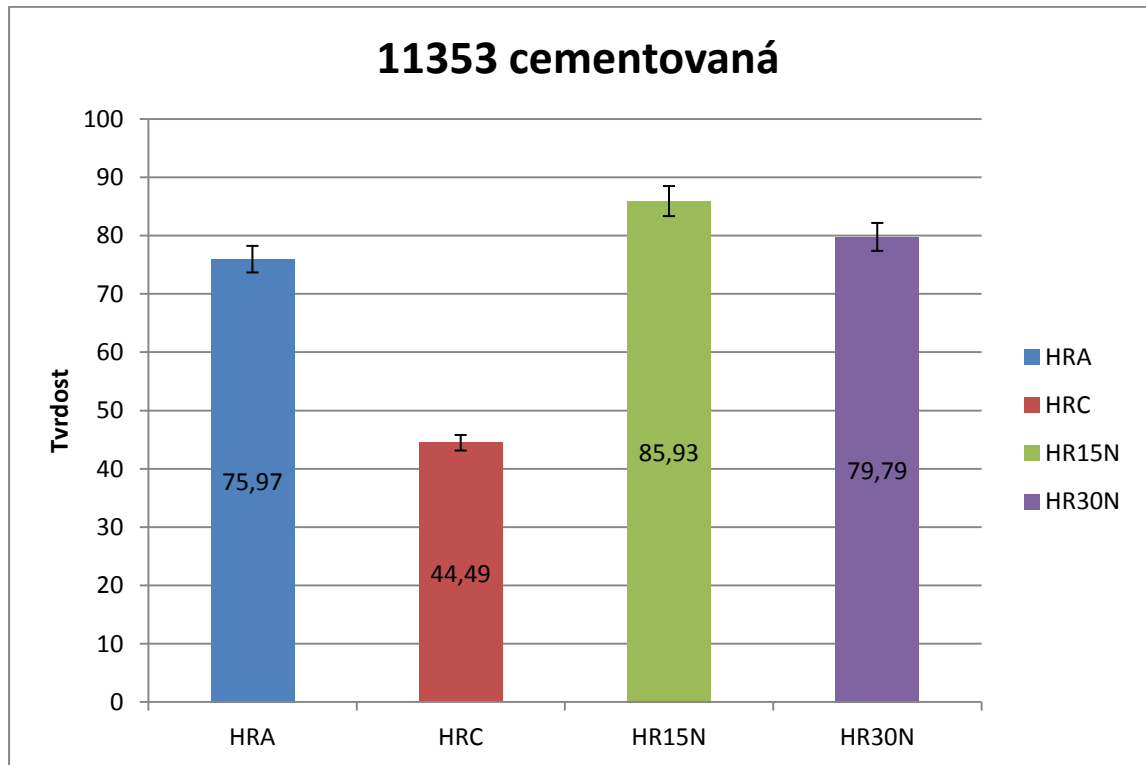
Tato ocel je chemicko-tepelně zpracována (cementování). Cementování je nasycování povrchu nízkouhlíkové oceli uhlíkem. U cementování se vytváří obohacená vrstva o uhlík až na eutektoidní nebo mírně nadeutektoidní koncentraci. Rozlišujeme 3 způsoby cementování podle zvoleného prostředí, z kterého uhlík difunduje do oceli (z tuhého prostředí, z tekutého prostředí, z plynného prostředí). Nacementovaná součást získá tetragonální martenzit v povrchové vrstvě o vysoké tvrdosti až po zakalení, která se potom musí popouštět, aby se transformoval na kubický martenzit. Výsledný povrch součásti je tvrdý, odolný vůči opotřebení a zachovává houževnatost základního materiálu pod touto vrstvou. Kalení se provádí přímo z cementační teploty jednoduchým kalením po novém ohřevu nebo se kalí dvojitým kalením.

- Teplota popouštění: 220°C po dobu 2 hodin
- Teplota cementace a kalení: teplota nad A_{c3} 850 až 950°C
- Tvrdost povrchové vrstvy: 50 až 60 HRC
- Uhlíkový potenciál: 1,1% C [13]



Obr. 20. Cementovaná ocel 11 353

6.2.1 Interpretace výsledků cementované oceli 11 353

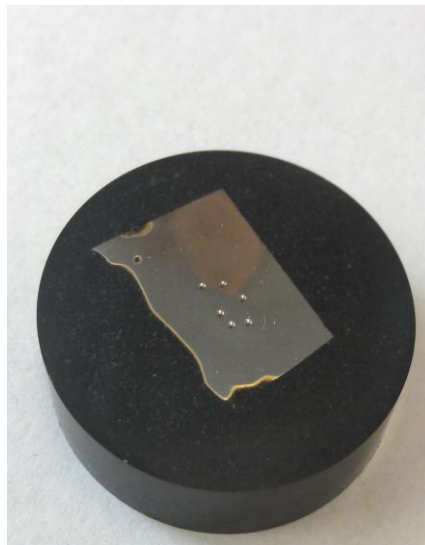


Obr. 21. Porovnání výsledků cementované oceli 11 353

Z naměřených hodnot tvrdosti vyplývá, že nejvyšší tvrdosti se dosáhlo metodou HR15N a nejnižší tvrdosti se dosáhlo metodou HRC, jak je vidět na obrázku (Obr. 20).

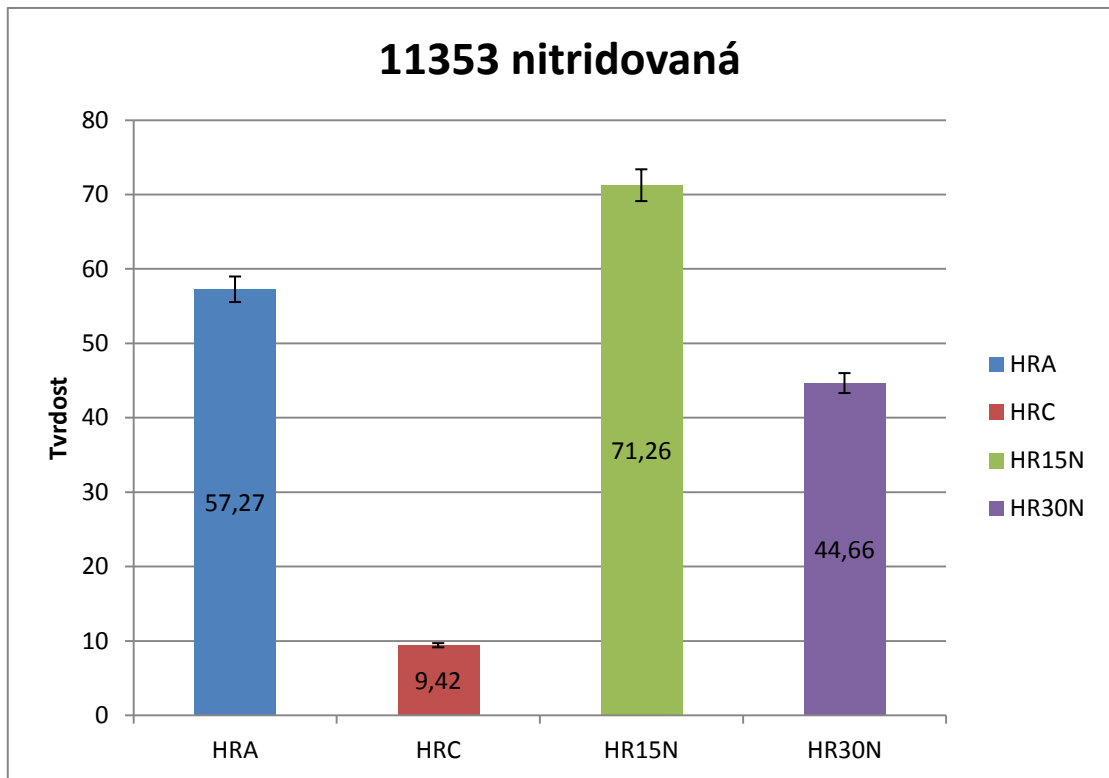
6.3 Nitridovaná ocel 11 353

Tato ocel je chemicko-tepelně zpracována (nitridována). Nitridace je obohacování povrchové vrstvy dusíkem. Při nasycování povrchu dusíkem vznikají v tenké povrchové vrstvě tvrdé nitridy, které mají za příčinu velkou tvrdost. Po nitridování se už tepelně nezpracovává. Přítomnost hliníku podporuje nitridování, protože hliník s dusíkem tvoří velmi tvrdý nitrid. Nitriduje se buď v plynném prostředí, nebo v solné lázni. Vzniklá vrstva má tloušťku 0,2 až 1,5 mm.[14]



Obr. 22. Nitridovaná ocel 11 353

6.3.1 Interpretace výsledků nitridované oceli 11 353



Obr. 23. Porovnání výsledků nitridované oceli 11 353

Z měřených hodnot měřených na vzorku nitridované oceli je zřejmé, že se největší tvrdosti dosáhlo metodou HR15N, zatímco nejmenší metodou HRC, jak je ukázáno na obrázku (Obr. 22.).

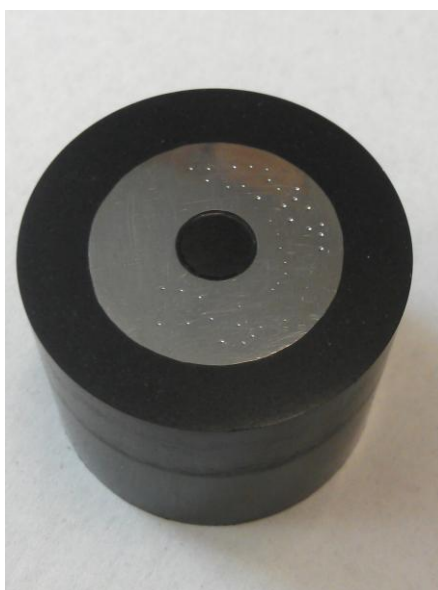
7 OCEL 14 220

Ocel Mn-Cr se používá k cementování a ke kyanování. Ocel je dobře tvářitelná za studena, po žíhání na měkko i za tepla, se zaručeným rozmezím prokalitelnosti. Tato ocel je dobře obrobitelná. Pro hladké obrábění se doporučuje ocel, která bude zušlechtěná na pevnost 690 až 880 MPa. Je vhodná pro strojní součásti pro zušlechtění do průměru 35 mm. Také je vhodná k cementaci s velmi tvrdou cementovanou vrstvou a velkou pevností v jádře (volné a zápusťkové výkovky, talířová kola, ozubená kola, svorníky, čepy, hřídele, kardanovy klouby, pístní čepy, zubové spojky). Můžeme ji také použít pro sériovou výrobu součástí za splnění podmínky dodržení téže technologie tepelného zpracování. Použitelná také pro svařování.

- Teplota normalizačního žíhání: 880 až 920°C
- Teplota žíhání na měkko: 680 až 720°C
- Teplota cementace: 840 až 870°C
- Teplota kyanování: 850 až 880°C
- Minimální tvrdost: 239 HB (29,8 HRC) [12]

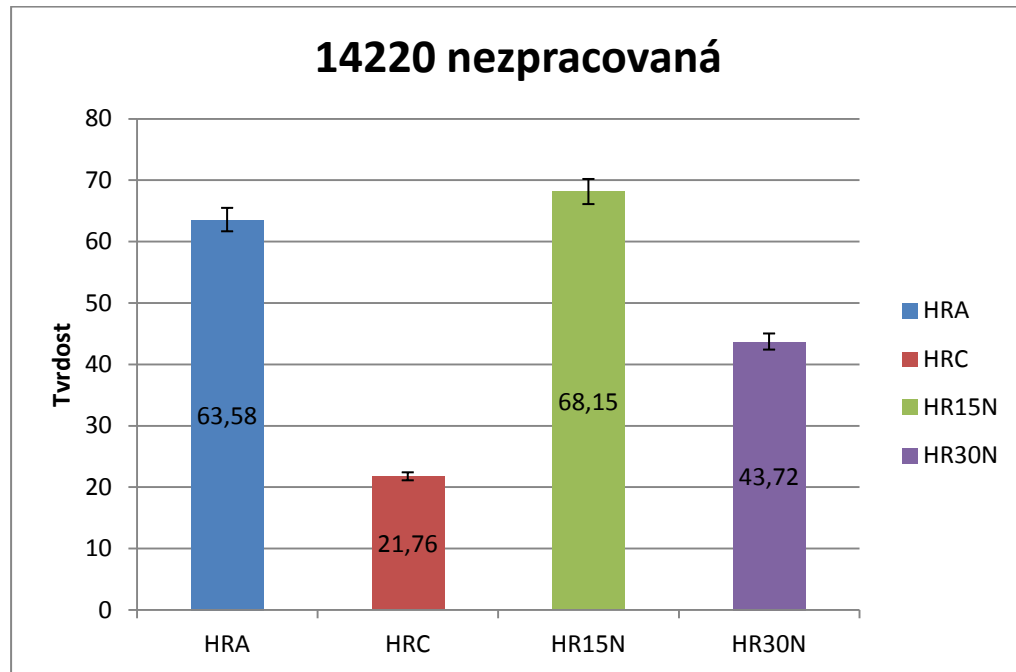
7.1 Nezpracovaná ocel 14 220

Tento vzorek nebyl nijak chemicko-tepelně zpracován, proto by měly jeho vlastnosti odpovídat výše uvedené oceli 14 220.



Obr. 24. Nezpracovaná ocel 14 220

7.1.1 Interpretace výsledků nezpracované oceli 14 220

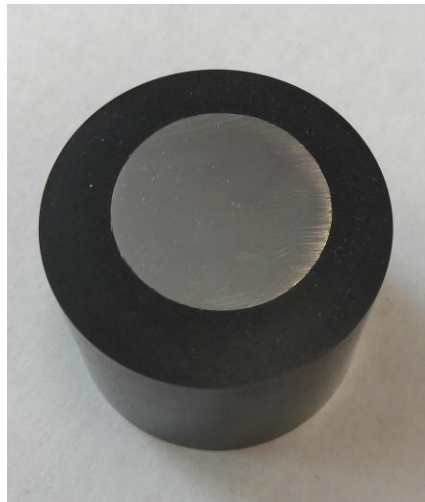


Obr. 25. Porovnání výsledků nezpracované oceli 14 220

Z měření tvrdosti a jeho naměřených hodnot vyplynulo, že nejvyšší hodnota byla zjištěna u metody HR15N, zatímco nejmenší u metody HRC, jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 24.).

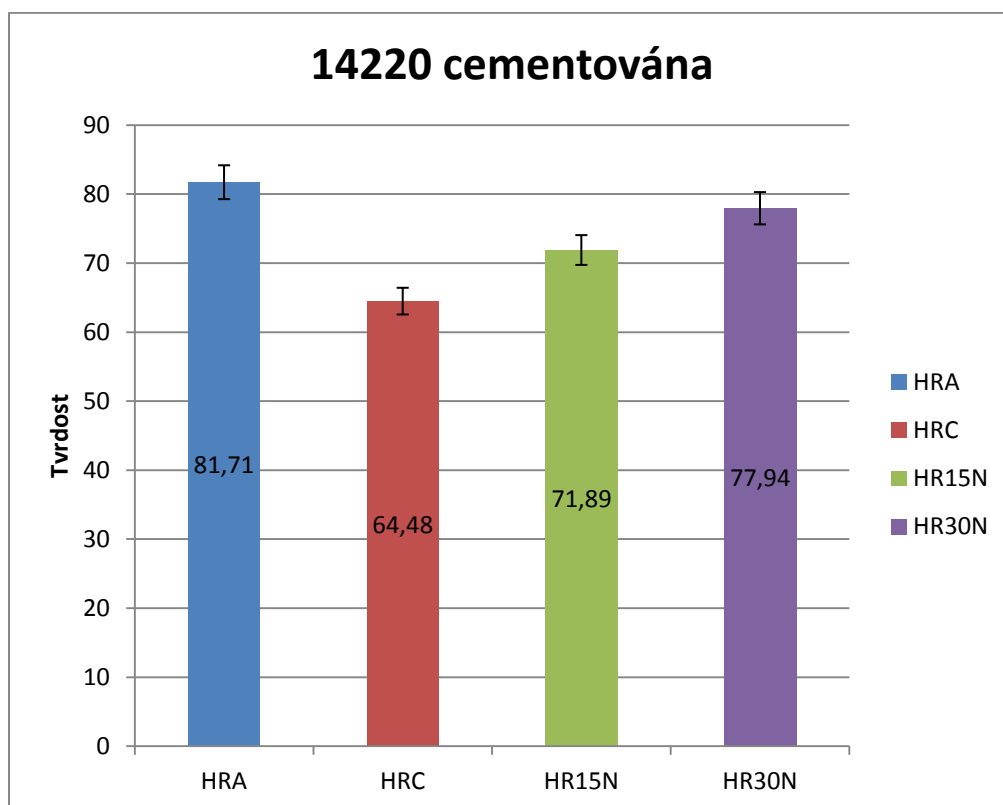
7.2 Cementovaná ocel 14 220

Cementování, je chemicko-tepelné zpracování oceli, při kterém se povrch oceli sytí uhlíkem. Proces se prováděl při teplotě 940°C a výdrži 4 hodiny, kdy je struktura cementační oceli austenitická, v níž je vyšší rozpustnost uhlíku než ve feritu. Kalení nauhličené vrstvy se provádí při teplotě 830°C. Při této teplotě se však jádro kalí ze struktury feriticko-austenitické, což má za důsledek pokles houževnatosti. Po kalení bylo zvoleno nízkoteplotní popouštění, aby se snížilo vnitřní pnutí a stabilizovala struktura. Tvrdost povrchu po cementaci se pohybuje mezi 58 až 62 HRC. [13]



Obr. 26. Cementovaná ocel 14 220

7.2.1 Interpretace výsledků cementované oceli 14 220

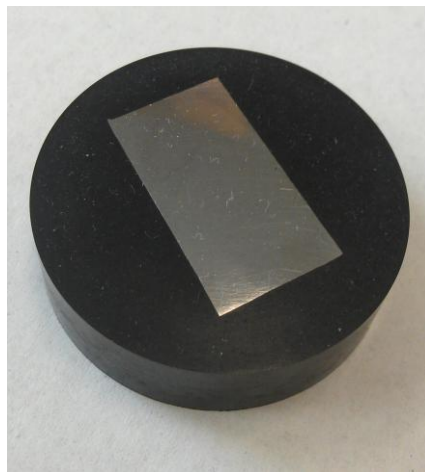


Obr. 27. Porovnání výsledků cementované oceli 14 220

Při měření tvrdosti cementované vrstvy u materiálu 14 220 bylo zjištěno, že největší tvrdost byla naměřena u metody HRA a nejmenší u metody HRC, jak je vidět na obrázku (Obr. 26.).

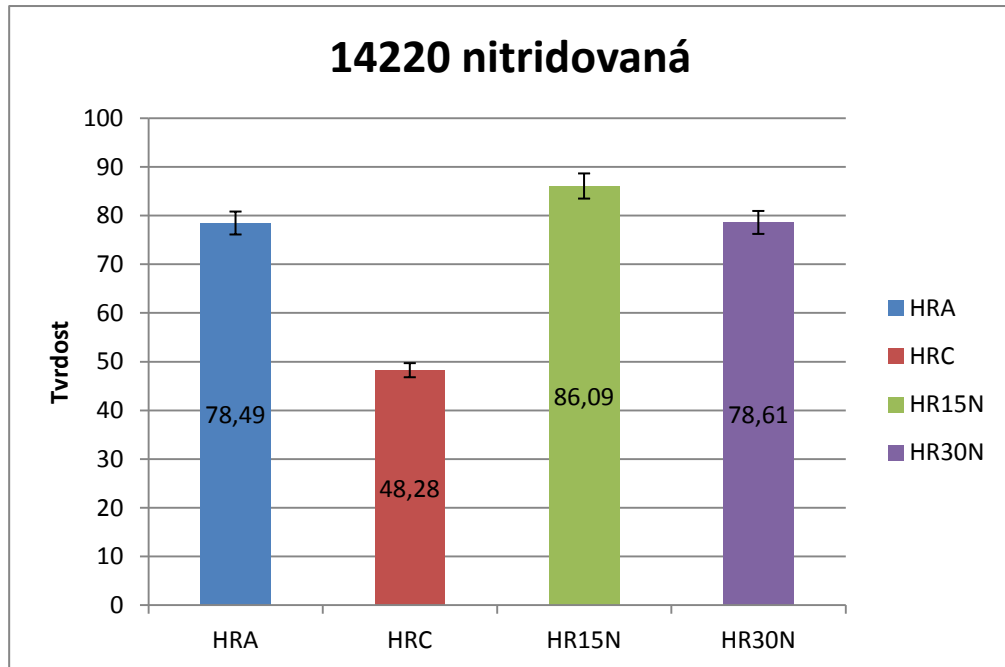
7.3 Nitridovaná ocel 14 220

Nitridování – chemicko tepelné zpracování, kdy se povrch oceli sytí dusíkem. Získá se vysoká tvrdost povrchu a houževnatost jádra. Tloušťka vrstvy 0,2 až 1,5 mm. Po nitridování se už tepelně nezpracovává. Kalení probíhá před nitridováním a po kalení probíhá ještě popouštění. [15]



Obr. 28. Nitridovaná ocel 14 220

7.3.1 Interpretace výsledků nitridované oceli 14 220



Obr. 29. Porovnání výsledků nitridované oceli 14 220

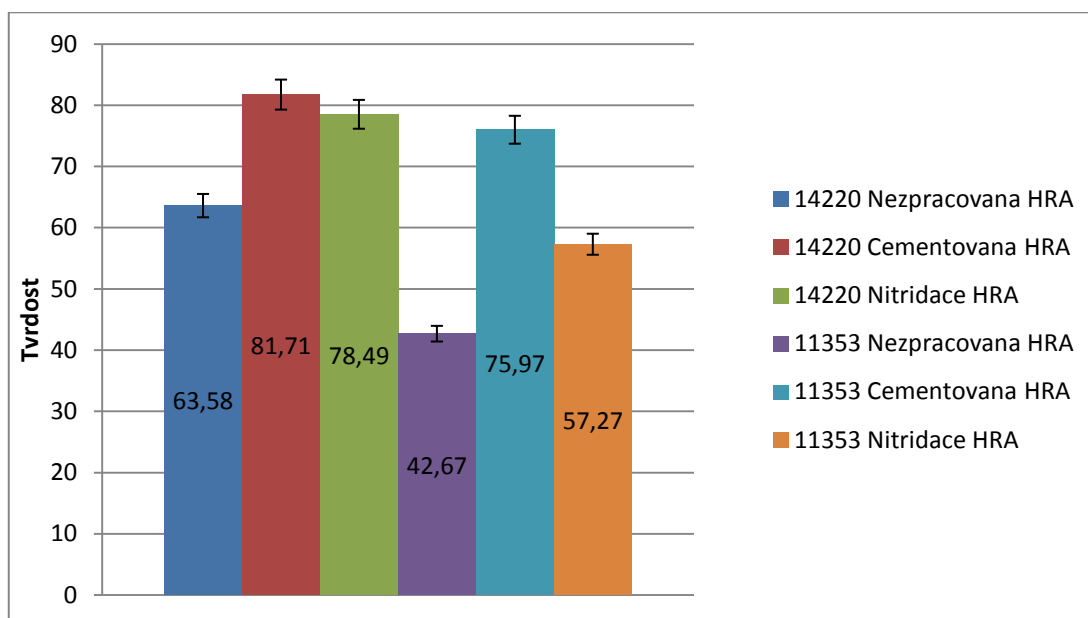
Z měření tvrdosti zkušebních vzorků vypnulo, že nejvyšší hodnota tvrdosti byla zjištěna u metody HR15N, zatímco nejmenší hodnota tvrdosti byla naměřena metodou HRC, jak je patrné z obrázku (Obr. 28.).

8 DISKUZE

Bakalářské práce se zabývala měřením tvrdosti u nízkouhlíkových ocelí. Byly vybrány oceli 11 353 a 14 220 a to ve třech modifikacích jako nezpracované a chemicko-tepelně zpracované (cementované a nitridované). Měření se provádělo na zkušebních vzorcích zkouškou dle Rockwella. Jedná se o zkoušky HRA, HRC, HR15N, HR30N.

Z naměřených výsledků u oceli 11 353 vyplynulo, že největší tvrdosti dosáhl cementovaný materiál. Naopak nejmenší tvrdosti nezpracovaný materiál. Nitridovaný nedosáhl takové tvrdosti z důvodu velké zatěžující síly a proražení nitridované vrstvy. U oceli 14 220 dosáhl největší tvrdosti materiál cementovaný a nitridovaný. Nejmenší tvrdost měl nezpracovaný materiál. Cementovaná vrstva byla tvořena martenzitem a austenitem zbytkovým, který vykazoval vysoké hodnoty tvrdosti. Vzhledem k velikosti tloušťky cementované vrstvy, nedošlo při měření tvrdosti k jejímu prolomení. Nitridovaná vrstva byla tvořena tvrdými nitridy, které vykazovaly velmi vysokou tvrdost. Při aplikaci vyššího zatížení však došlo k propíchnutí testované nitridované vrstvy a tím ke zkreslení naměřených výsledků tvrdosti.

8.1 Porovnání tvrdostí metodou HRA



Obr. 30. Porovnání hodnot tvrdosti metodou HRA

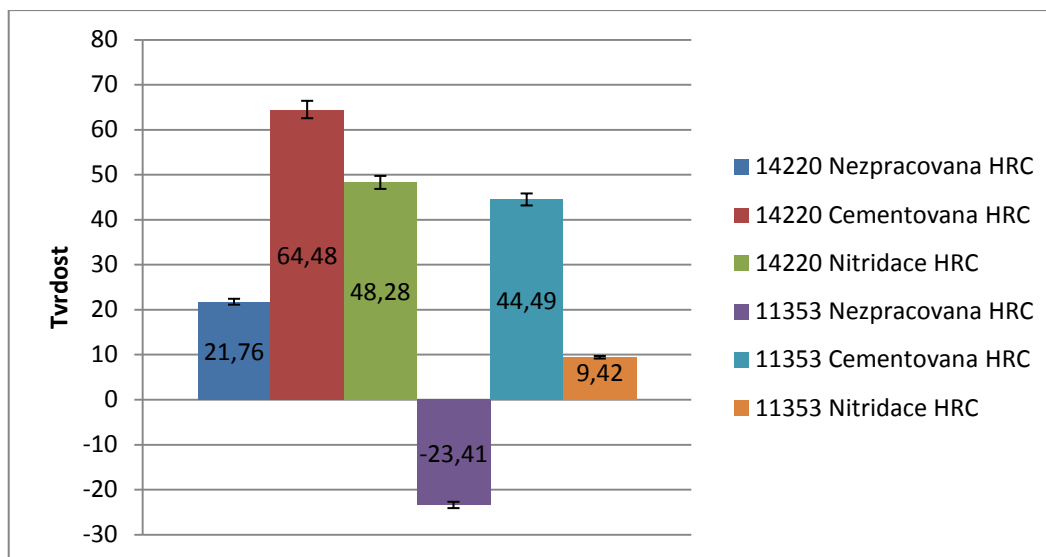
Měření tvrdosti metodou HRA ukázalo, že nejvyšší hodnoty tvrdosti byly zjištěny u cementované oceli 14220. Naopak nejmenší hodnoty tvrdosti bylo dosaženo u tepelně ne-

zpracované oceli 11353. Druhá nejvyšší hodnota tvrdosti byla zjištěna u materiálu 14220 nitrídovaného. Třetí nejvyšší hodnotu tvrdosti vykazovala cementovaná vrstva u oceli 11353.

Při bližším pohledu je patrné, že cementovaná vrstva u testovaných typů ocelí bude vykazovat nejvyšší hodnoty tvrdosti vzhledem k její tloušťce. U nitrídované vrstvy došlo při měření tvrdosti metodou HRA k proražení vrstvy, což následně ovlivnilo její hodnoty tvrdosti. Pokud by bylo použito menší zatížení, vykazovala by nitrídovaná vrstva u oceli 14220 nejvyšší hodnotu tvrdosti.

Při porovnání tvrdostí metodou HRA vyšlo najevo, že nejvyšších tvrdostí dosáhli tepelně zpracované materiály. Největší cementovaný materiál 14 220. Přičemž těsně za ním byl nitrídovaný 14 220 a cementovaný 11 353. Nejmenších hodnot tvrdostí dosáhli nezpracované materiály spolu s nitrídovaným 11 353, u kterého nejspíš došlo k proražení nitrídované vrstvy. Nejnižší hodnoty dosáhl nezpracovaný materiál 11 353. Metoda HRA se používá hlavně při měření tvrdosti tenkých vrstev. Nejvyšších hodnot však měla dosáhnout nitrídované vrstvy, které byly vysokým zatížením prolomeny (Obr. 29.).

8.2 Porovnání tvrdostí metodou HRC

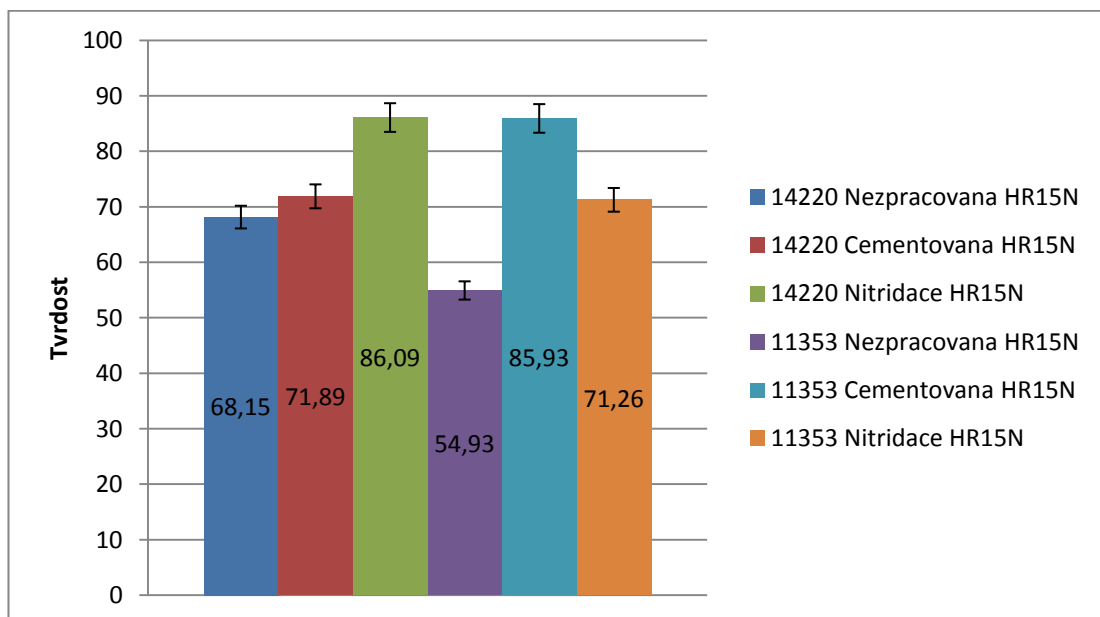


Obr. 31. Porovnání hodnot tvrdosti metodou HRC

Metodou HRC vyšli nejvyšší hodnoty tvrdosti u tepelně zpracovaných materiálů. Konkrétně největší tvrdosti dosáhl cementovaný materiál 14 220 a za ním nitrídovaný ma-

teriál 14 220 a cementovaný 11 353. Nejnižších tvrdostí dosáhli nezpracované materiály spolu s nitridovaným 11 353, z důvodu možného proražení tenké nitridované vrstvy. Nejmenší hodnoty dosáhl nezpracovaný materiál 14 220. U nezpracovaného materiálu 11 353 je hodnota tvrdosti záporná z důvodu velké zatěžující síly a překročení zkušební hloubky 0,2 mm. Metoda HRC se používá pro nejtvrďší povrchy. Nejvyšších hodnot však měla dosáhnout nitridované vrstvy, které byly vysokým zatížením prolomeny (Obr. 30.)

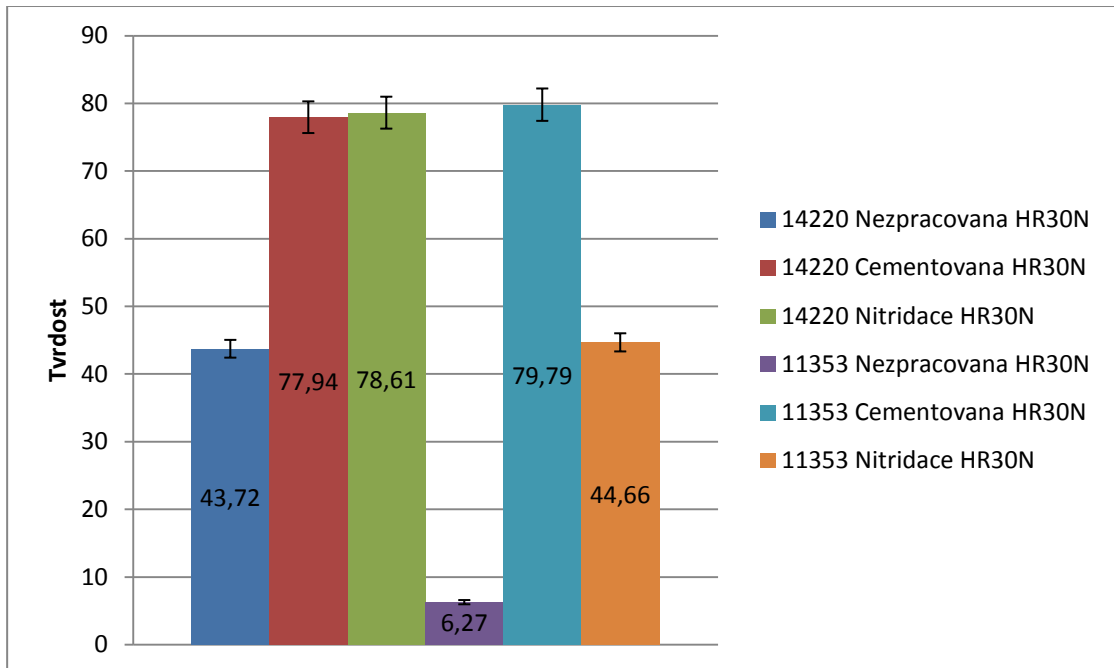
8.3 Porovnání tvrdostí metodou HR15N



Obr. 32. Porovnání hodnot tvrdostí metodou HR15N

Z naměřených hodnot tvrdostí metodou HR15N vyplývá, že nevyšší tvrdosti dosáhl nitridovaný materiál 14 220. Zatížení nebylo tak vysoké a neprošel nitridovanou vrstvou. Druhá nejvyšší tvrdost je u cementovaného materiálu 11 353. Potom následují tři materiály s malým odstupem tvrdostí – nezpracovaný 14 220, cementovaný 14 220 a nitridovaný 11 353. Nejmenší tvrdostí dosáhl nezpracovaný materiál 11 353. U této metody je malé zatížení, a proto u nitridovaného materiálu 14 220, neprošel indentor povrchovou nitridovanou vrstvou (Obr. 31.).

8.4 Porovnání tvrdostí metodou HR30N



Obr. 33. Porovnání hodnot tvrdostí metodou HR30N

Nejvyšší naměřená tvrdost byla u zkušebního vzorku cementovaného materiálu 11 353. Tato tvrdost byla naměřena metodou HR30N. Naopak nejmenší tvrdostí jsme dosáhli u vzorku nezpracovaného materiálu 11 353. Druhé nejvyšší tvrdostí dosáhl nitridovaný materiál 14 220, u kterého nedošlo k proražení nitridované vrstvy. Oproti u nitridovaného materiálu 11 353, který má výrazně nižší naměřenou tvrdost, nejspíš došlo k proražení nitridované vrstvy (Obr. 32.).

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá měřením tvrdosti u dvou typů ocelí. Byly vybrány materiály 11 353 a 14 220. Zkoušky byly prováděny na třech typech materiálů a to na nezpracovaném, cementovaném a nitridovaném. Měření tvrdosti bylo prováděno metodou Rockwell a to zkouškami HRA, HRC, HR15N a HR30N. měření tvrdosti probíhalo na přístroji Easydur Italiana.

Z výsledků měření tvrdosti vyplynulo, že nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo u materiálu 14 220 v porovnání s materiálem 11 353. Největší tvrdosti dosáhly cementované vrstvy, tvořené martenzitem a austenitem zbytkovým. Na druhém místě jsou materiály s nitridovanými vrstvami a nejmenší tvrdosti mají nezpracované materiály. U měření metodou HRC, kterou reprezentuje velká zatěžující síla, došlo k prolomení nitridované vrstvy a tím ke zkreslení výsledků měření tvrdosti. Proto tuto metodu vyhodnocuji jako nejméně vhodnou. Nejvhodnější jsou metody HRA, HR15N a HR30N, které mají menší zatěžující síly.

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] ATEM. In: [online]. [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf.
- [3] PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály.* Vyd. 2., přeprac. Praha: SNTL, 1977, 562 s. Redakce báňské a strojírenské literatury.
- [4] PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 549 s.
- [5] HLUCHÝ, Miroslav, Miroslav HLUCHÝ. *Strojírenská technologie.: 1. 2.* vyd. Praha: SNTL, 1978, 356 s.
- [6] METROTEST, s.r.o. *Kladno.* [online]. 1994 [cit. 2014-1-6]. Dostupné z: www.metrotest.cz/hardness/zkousky_tvrlosti.pdf
- [7] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I.* Brno: CERM, 2001, 505 s. ISBN 80-720-4193-2.
- [8] PÍŠEK F. *Nauka o materiálu II.* vyd. Brno: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. 660s. bez ISBN
- [9] BUREŠ, Jiří. *Converter* [online]. 2002 [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: www.converter.cz
- [10] ČERNOCH, Svatopluk a Ivo BERNARD. *Strojně technická příručka.* 13., upravené vyd. Praha: SNTL, 1977.
- [11] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1969, 342 s.
- [12] *Vlastnosti a použití oceli* [online]. 2006 [cit. 2014-04-23]. Dostupný z WWW: www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=oceli_pouziti.
- [13] LUKOVICS, I. *Konstrukční materiály a technologie.* [s.l.] : VUT v Brně, 1992. ISBN 80-214-0399-3.
- [14] *HEF-DURFERRIT s.r.o.* [online]. 2006 [cit. 2014-04-24]. Dostupný z WWW: www.hef-durferrit.cz/karbonitridace.htm.
- [15] ŘASA, J., ŠVERCL, J. *Strojnické tabulky 2.* [s.l.] : Scientia, 2007. 586 s. ISBN 978-80-86960-20-3.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČSN	České technické normy	[-]
D	Průměr kuličky	[mm]
d	Průměr vtisku	[mm]
e	Trvalá hloubka vtisku	[mm]
F	Zatížení	[N]
h	Hloubka vtisku	[mm]
HB	Tvrdość Brinell	[-]
HR	Tvrdość Rockwell	[-]
HV	Tvrdość Vickers	[-]
k	Korekční konstanta	[-]
Ra	Drsnost povrchu	[μm]
S	Plocha	[mm^2]
t	Čas	[s]
u	Délka úhlopříčky	[mm]
α	Úhel spuštění zkušebního tělíska	[$^\circ$]
β	Úhel odrazu zkušebního tělíska	[$^\circ$]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Vtisky u vnikacích zkoušek [1].....</i>	13
<i>Obr. 2. Zkouška dle Brinella [1].....</i>	14
<i>Obr. 3. Průběh doby zatížení u metody Brinell [6].....</i>	15
<i>Obr. 4. Minimální tloušťka vzorku u metody Brinell [1].....</i>	17
<i>Obr. 5. Podstata metody Rockwell [3].....</i>	19
<i>Obr. 6. Průběh zatížení u metody Rockwell [6].....</i>	20
<i>Obr. 7. Průběh zkušebního zatížení u metody Vickers [6].....</i>	24
<i>Obr. 8. Schéma zkoušky Vickers [2].....</i>	25
<i>Obr. 9. Podstata kladívka Poldi. [2].....</i>	27
<i>Obr. 10. Kladívko Poldi. [4].....</i>	27
<i>Obr. 11. Shoreho skleroskop [9].....</i>	29
<i>Obr. 12. Duroskop [2].....</i>	30
<i>Obr. 13. Schéma vrypové zkoušky [2].....</i>	31
<i>Obr. 14. Schéma číselného označení ocelí [1].....</i>	34
<i>Obr. 15. Barevné označení ocelí [1].....</i>	36
<i>Obr. 16. Schéma metody HR.....</i>	41
<i>Obr. 17. Měřicí hlava.....</i>	42
<i>Obr. 18. Vzorek nezpracované oceli 11 353.....</i>	43
<i>Obr. 19. Porovnání tvrdosti u nezpracované oceli 11 353.....</i>	44
<i>Obr. 20. Cementovaná ocel 11 353.....</i>	45
<i>Obr. 21. Porovnání výsledků cementované oceli 11 353.....</i>	46
<i>Obr. 22. Nitridovaná ocel 11 353.....</i>	47
<i>Obr. 23. Porovnání výsledků nitridované oceli 11 353.....</i>	48
<i>Obr. 24. Nezpracovaná ocel 14 220.....</i>	49
<i>Obr. 25. Porovnání výsledků nezpracované oceli 14 220.....</i>	50
<i>Obr. 26. Cementovaná ocel 14 220.....</i>	51
<i>Obr. 27. Porovnání výsledků cementované oceli 14 220.....</i>	52
<i>Obr. 28. Nitridovaná ocel 14 220.....</i>	53
<i>Obr. 29. Porovnání výsledků nitridované oceli 14 220.....</i>	54
<i>Obr. 30. Porovnání hodnot tvrdosti metodou HRA.....</i>	55
<i>Obr. 31. Porovnání hodnot tvrdosti metodou HRC.....</i>	56
<i>Obr. 32. Porovnání hodnot tvrdostí metodou HR15N.....</i>	57

Obr. 33. Porovnání hodnot tvrdostí metodou HR30N 58

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Vztah průměru kuličky a zatěžující síly u metody Brinell [6]</i>	16
<i>Tab. 2. Vnikací tělesa a zkušební síly pro různé metody Rockwell [6]</i>	21
<i>Tab. 3. Dělení metody Vickers [6]</i>	23
<i>Tab. 4. Zkušební zatížení u metody Vickers [6]</i>	25
<i>Tab. 5. Mohsova stupnice [2].....</i>	31
<i>Tab. 6. Množství legujícího prvku [4]</i>	33
<i>Tab. 7. Třídy ocelí [1]</i>	35
<i>Tab. 8. Význam doplňkové číslice [1]</i>	35
<i>Tab. 9. Použité normy při měření</i>	40
<i>Tab. 10. Vnikací tělesa a síly pro dané metody Rockwell.....</i>	42