

# Měření tvrdosti modifikovaných ocelí

Jan Komárek

---

Bakalářská práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jan KOMÁREK  
Osobní číslo: T10268  
Studijní program: B3909 Procesní inženýrství  
Studijní obor: Technologická zařízení  
Forma studia: prezenční

Téma práce: Měření tvrdosti modifikovaných ocelí

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Příprava zkušebních těles pro zkoušky tvrdosti
3. Provedení zkoušky tvrdosti
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího BP.**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. David Maňas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

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

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

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



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

Příjmení a jméno: Komárek Jan

Obor: Technologická zařízení

## 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 <sup>1)</sup>;
- 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> 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 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 17. 5. 2013



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

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

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

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

<sup>2)</sup> 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).

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá měřením tvrdosti vybraných druhů modifikovaných ocelí. Teoretická část se zaměřuje na charakteristiku jednotlivých způsobů měření tvrdosti kovů. V praktické části se určuje tvrdost vybraných ocelí, které jsou v základním stavu, tepelně zpracovány nebo chemicko-tepelně zpracovány. Tvrdost ocelí se určuje zkouškou podle Rockwella při různých druzích zatížení. V závěru práce jsou jednotlivé tvrdosti ocelí porovnány podle měřené metody.

Klíčová slova: zkoušky tvrdosti, statické zkoušky tvrdosti, dynamické zkoušky tvrdosti, tepelné zpracování, chemicko-tepelné zpracování.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the hardness measurement of selected types of modified steels.

The theoretical part focuses on characteristics of different ways of measuring the hardness of metals. The practical part determines the hardness of selected steels that are in the ground state, heat treated or heat treated. Hardness of steels is determined by Rockwell test for various types of loads. In the end of the thesis are compared individual hardnesses of steels according to measuring methods.

Keywords: hardness testing, static hardness testing, dynamic hardness testing, heat treatment, chemical-heat treatment.

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Davidu Maňasovi Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi byly poskytnuty v průběhu vypracování této práce.

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

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ZKOUŠKY TVRDOSTI</b> .....	<b>12</b>
1.1 ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK .....	12
<b>2 STATICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI</b> .....	<b>14</b>
2.1 VRYPOVÉ ZKOUŠKY .....	14
2.1.1 Martensova zkouška.....	15
2.2 VNIKACÍ ZKOUŠKY .....	16
2.2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella .....	16
2.2.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	20
2.2.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	22
2.2.4 Zkoušky mikrotvrdosti .....	25
2.2.5 Nanotvrdost .....	30
<b>3 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI</b> .....	<b>32</b>
3.1 PLASTICKÉ NÁRAZOVÉ .....	32
3.1.1 Metoda volným pádem.....	33
3.1.2 Metoda stlačenou pružinou (Baumannovo kladívko) .....	33
3.1.3 Metoda porovnávací (Poldiho kladívko).....	34
3.2 ELASTICKÉ ODRAZOVÉ .....	35
3.2.1 Shoreho skleroskop .....	35
3.2.2 Duroskop .....	36
3.2.3 Tvrdoměr Equotip .....	37
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>39</b>
<b>4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>40</b>
4.1 CÍL PRÁCE .....	40
4.2 TYPY ZKOUŠEK.....	40
4.3 ZKUŠEBNÍ VZORKY .....	40
4.4 POSTUP MĚŘENÍ.....	41
<b>5 TEPENÉ ZPRACOVÁNÍ A CHEMICKO - TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ VYBRANÝCH DRUHŮ OCELÍ</b> .....	<b>42</b>
5.1 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ .....	42
5.1.1 Kalení .....	42
5.1.2 Popouštění .....	42
5.2 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ .....	43
5.2.1 Cementování .....	43
<b>6 OCEL 11 600</b> .....	<b>44</b>
6.1 NEZPRACOVANÁ OCEL 11 600.....	44
6.2 ZUŠLECHTĚNÁ OCEL 11 600 .....	45
<b>7 OCEL 12 050</b> .....	<b>47</b>



7.1	NEZPRACOVANÁ OCEL 12 050.....	47
7.2	ZUŠLECHTĚNÁ OCEL 12 050 .....	48
<b>8</b>	<b>OCEL 14 220.....</b>	<b>50</b>
8.1	NEZPRACOVANÁ OCEL 14 220.....	50
8.2	CEMENTOVANÁ OCEL 14 220 .....	51
<b>9</b>	<b>OCEL 15 230.....</b>	<b>53</b>
9.1	NEZPRACOVANÁ OCEL 15 230.....	53
9.2	ZUŠLECHTĚNÁ OCEL 15 230 .....	54
<b>10</b>	<b>DISKUZE VÝSEDKŮ .....</b>	<b>56</b>
10.1	METODA HRA .....	56
10.2	METODA HRC.....	57
10.3	METODA HR15N .....	58
10.4	METODA HR30N .....	59
10.5	METODA HR45N .....	60
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>67</b>

## ÚVOD

Historie měření tvrdosti kovů spadá až do roku 1722, kdy jako první určil vtiskovou metodou tvrdost René Antoine Ferchault de Réaumur, který vyjádřil tvrdost jako průnik hran dvojice trojbokých hranolů. O 100 let později roku 1822 představil Friedrich Mohs stupnici deseti nerostů, z nich každý následující je schopen vyrýt vryp do všech předcházejících nerostů. Tato stupnice se ale používala zejména pro mineralogii a byla příliš hrubá pro hodnocení kovů, proto byla roku 1892 vynalezena vrypová zkouška podle Martense. Na konci 19. století a začátkem 20. století vznikaly nové metody, k nejdůležitější patří zkouška tvrdosti podle Brinella, Rockwella a Vickerse. V tomto období bylo také vyrobeno v Kladně Poldiho kladívko, které bylo patentováno v mnoha zemích světa. V současné době se většinou používají přístroje, které jsou vybaveny počítačem a tvrdost nám vyhodnocují automaticky podle zvolené metody. [15]

Zkoušky tvrdosti patří mezi nejstarší a nejrozšířenější zkoušky kovů. Jsou poměrně levnou metodou a dají se provádět i na předmětech nejmenších rozměrů. Jedná se o zkoušky nedestruktivní, protože nedochází k porušení ani deformaci zkušební vzorku, ale jen k vrypu nebo vtisknu, který je způsoben vnikacím tělesem. Nejčastěji se používají k doplnění hodnot mechanických vlastností, zjištěných zkouškou tahem a rázem v ohybu. Vnikající těleso (indenter) musí mít požadovanou tvrdost, aby nepodléhalo plastickým deformacím, proto je z požadovaných vlastností nejvhodnější diamant, ale z důvodu velké ceny se používá jenom pro měření tvrdosti kovů nad 630 HV, do tvrdosti 450 HV se používá kalená ocelová kulička. Tyto zkoušky jsou poměrně levnou metodou a dají se provádět i na velmi malých součástkách.

Hlavním cílem bakalářské práce je stanovení tvrdosti vybraných druhů ocelí. Teoretická část je zaměřena na popis jednotlivých metod měření tvrdosti ocelí. V praktické části jsou porovnány tvrdosti ocelí s různým tepelným zpracováním a chemicko-tepelným zpracováním.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Zkoušky tvrdosti se nejčastěji používají k doplnění hodnot mechanických vlastností, zjištěných zkouškou tahem a zkouškou rázem v ohybu.

Jejich hlavní výhodou je jednoduchost a rychlost měření. Zkoušky se dají provést přímo bez další úpravy na daném předmětu a není nutné pro ně zhotovovat zkušební tělíška.

Zkoušky tvrdosti se provádí vždy na povrchu předmětu.

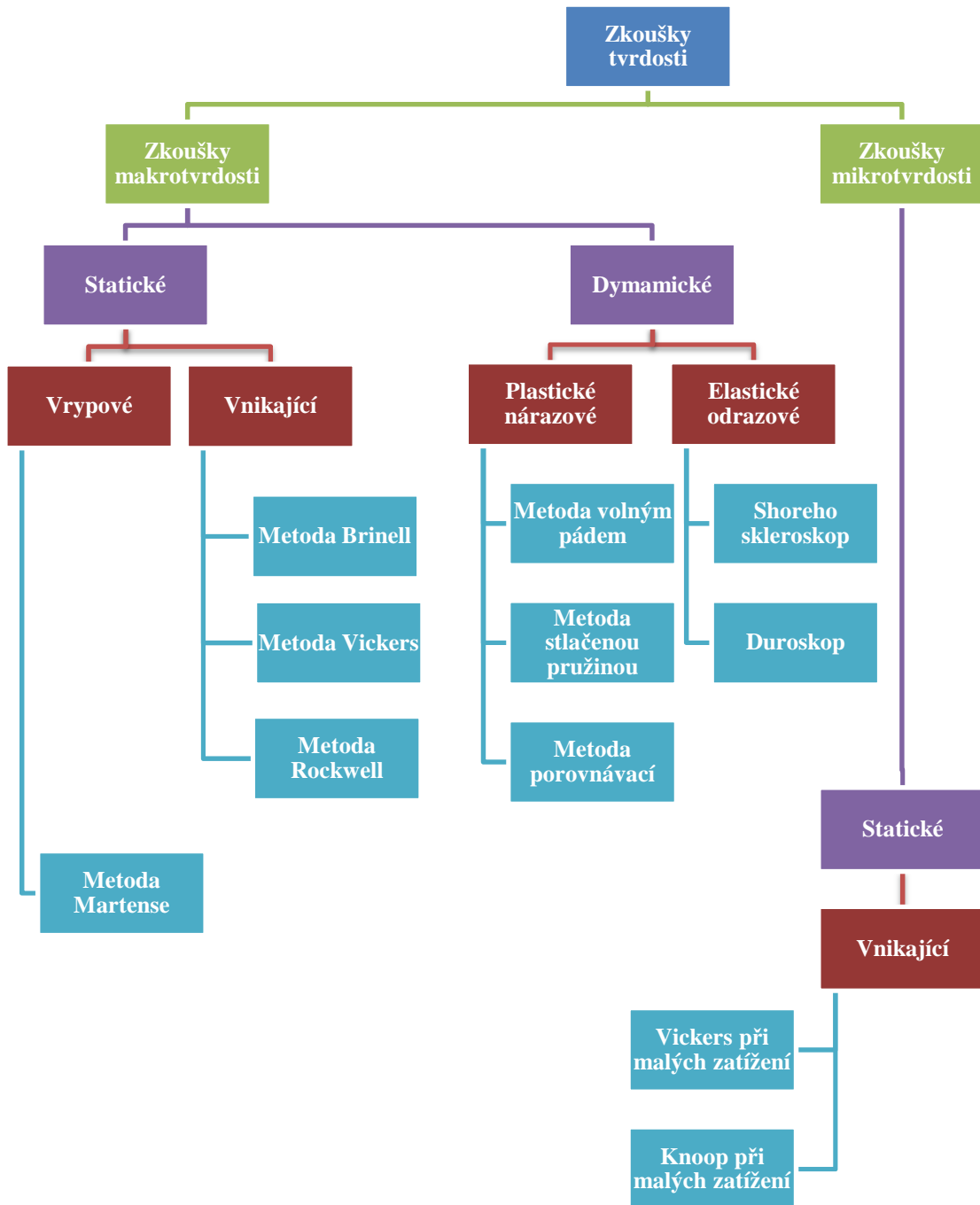
Tvrdot je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Čím menší odpor je proti těmto deformacím, tím menší zatížení je třeba k dosažení určité deformace, a tím menší tvrdost má zkoušené těleso. Určujeme ji tak, že těleso vhodného tvaru - indentor (kulička, kužel, jehlan) z vhodného dostatečně tvrdého materiálu (kalená ocel, slinutý karbid, diamant), zatlačujeme do zkoušeného materiálu. Tvrdot posuzujeme z velikosti deformace jeho povrchu. [4] [5] [7]

## 1.1 Rozdělení zkoušek

Zkoušky tvrdosti je možné rozdělit podle více hledisek:

- a) Principu zkoušky
  - zkoušky vrypové
  - zkoušky vnikající
  - zkoušky nárazové
  - zkoušky odrazové
  
- b) Rychlosti zatěžující síly
  - statické
  - dynamické
  
- c) Účelu měření
  - zkoušky makrotvrdoti
  - zkoušky mikrotvrdoti

Tab. 1. Rozdělení zkoušek tvrdosti [7]



## 2 STATICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI

Statické zkoušky tvrdosti jsou takové, u kterých je zatěžující síla stálá nebo se plynule zvětšuje. Při zkoušce dochází k porušení povrchu zkoušeného materiálu, na povrchu vznikne vryp nebo vtisk, podle toho jakou metodu použijeme a danou deformaci změříme mikroskopem. Vnikací těleso nesmí podléhat plastickým deformacím, musí mít proto nejvyšší tvrdost a mez pružnosti. K potlačení jeho elastických deformací při vnikání do povrchu materiálu má mít vysoký modul pružnosti.

Jako materiál vnikacího tělesa pro zkoušení kalených ocelí, tvrzené litiny a obecně všech materiálů a tvrdostí nad asi 630 HV lze použít jedině diamant. Slinutý karbid se doporučuje do tvrdosti max. 630 HV, kalená ocel do tvrdosti asi 450 HV. [3] [7]

### 2.1 Vrypové zkoušky

Tato zkouška patří mezi nejstarší způsoby zkoušení tvrdosti a její princip byl převzat z mineralogie, kde se ke klasifikaci tvrdosti užívá tzv. Mohsovy stupnice tvrdosti (Tab. 2). Ve stupnici je seřazeno 10 nerostů, z nichž každý následující je schopen vyrýt do všech předcházejících nerostů vryp. Pro měření tvrdostí technických materiálů je Mohsova stupnice velmi málo citlivá, a proto se v technické praxi používá mnohem citlivějších metod měření, které se provádějí na tvrdoměrech. [4] [8]

Tab. 2. Mohsova stupnice tvrdosti a tvrdost mat. užívaných ve strojírenství podle Mohsovy stupnice [4]

Mohsova stupnice tvrdosti		Tvrdość podle Mohsovy stupnice			
Mastek	1	Grafit	0,5	Iridium	6
Sůl kamenná nebo sádrovec	2	Olovo	1,5	Plantiniridium	6,5
Vápenec	3	Cín	1,5	Ocel tvrdá	8,5
Kazivec	4	Hliník	2,0	Tvrde (slnuté) kovy	9,8
Apatit	5	Zlato	2,5		
Živec	6	Stříbro	2,5		
Křemen	7	Antimon	3,5		
Topas	8	Čisté železo	4,5		
Korund	9	Platina	4,5		
Diamant	10	Ocel měkká	5		

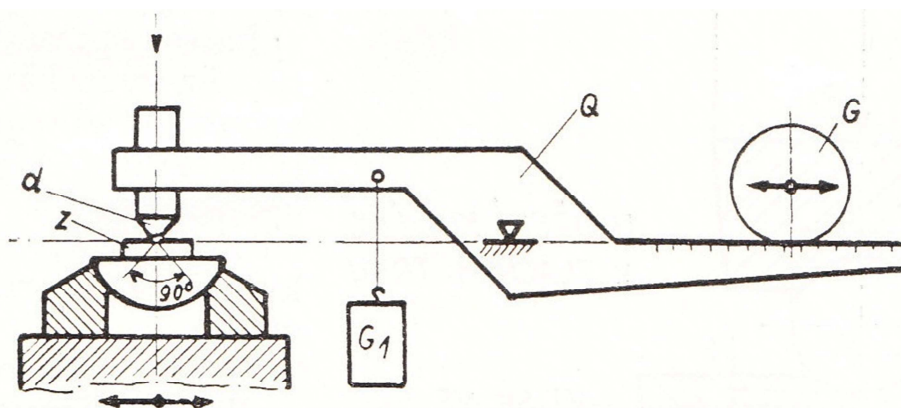
### 2.1.1 Martensova zkouška

Pokud chceme zachovat princip zkoušky podle Mohsovy stupnice tvrdosti, tak tvrdost kovů a slitin musíme, definovat jinak, a to pomocí šířky vrypu. K určování této tvrdosti se používá přístroje Martensova (Obr. 1).

Princip přístroje spočívá v tom, že po vyhlazené ploše zkoušeného kovu pojíždí diamantový kužel s vrcholovým úhlem  $90^\circ$ , který lze zatížit silou, až 19,8 N. Vytvořený vryp se měří pomocí optického mikroskopu. Mírou tvrdosti dle Martense je síla  $F$  potřebná k vytvoření vrypu širokého 0,01 mm. Druhou možností je, že se při stejném zatížení vytvoří vryp a porovnává se šířka vrypu.

Způsob zjišťování tvrdosti vrypovou metodou je značně nepřesný, a proto se velmi málo používá. Jediné současné praktické využití vrypové zkoušky je možné nalézt při studiu velmi tvrdých několik mikrometrů tenkých a tvrdých vrstev nitridů popř. karbidů kovů. Tato metoda se nazývá scratch test.

Způsob zkoušky metodou scratch test je poněkud pozměněn, neboť se používá diamant s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a vrcholovým zaoblením 0,2 mm. Zátěžná síla je proměnná. Na určité délce se vytvoří vryp s narůstající silou. U těchto vrstev se zkoumá jejich adhezivně - kohezivní chování (odezva vrstvy na pronikající pohybující se indentor). V tomto případě se určuje kritické zatížení  $L_C$ , které mělo za následek odtržení vrstvy. [4] [9]



d- diamant, Z- vzorek, G- posuvné závaží, Q- dvojramenná páka

Obr. 1. Martensův přístroj k vrypové zkoušce tvrdosti [4]

## 2.2 Vnikací zkoušky

Je to odolnost materiálu proti vnikání cizího tělesa do zkoušeného materiálu je dána velikostí sil, jimiž jsou atomy kovu navzájem vázány. Stejný kov proto může mít různou tvrdost v závislosti např. na těchto hlavních činitelích:

- **Velikost zrna** - Čím je kov jemněji krystalizován, tím je v jednotce objemu víc hranic zrn, které odolávají vnikání cizích těles. U jemnozrnných materiálů proto naměříme vyšší tvrdost nežli u hrubozrnných materiálů.
- **Teplota** - Čím je teplota měřeného kovu vyšší, tím se vlivem roztažnosti stávají vazby mezi atomy méně pevné a materiál se jeví měkčí.
- **Cizí příměsi** - Všechny příměsi ve zkoušeném materiálu snižují jeho plasticitu, a tím zvyšují tvrdost.
- **Vnitřní pnutí** - Jsou způsobena např. tvářením za studena, nestejnou rychlostí ochlazením povrchu a vnitřku výrobku, rozpadem fází v heterogenní struktuře. Všechna pnutí zvyšují tvrdost.

Zkoušky vnikající jsou nejpoužívanější zkoušky při zjišťování tvrdosti materiálu. Při této zkoušce zatlačujeme do zkušebního materiálu velmi tvrdé těleso (kuličku, kužel, jehlan) a měřítkem tvrdosti je velikost vzniklého vtisku (jeho průměr, hloubka nebo úhlopříčka) nejnámější jsou zkoušky tvrdosti podle Brinella, Rockwella a Vickerse. Tvrdost neželezných kovů (Cu, Sn, Pb, Al a jejich slitiny) zkoušíme nejčastěji podle Brinella, tvrdé a kalené materiály podle Rockwella. Zkouška tvrdosti podle Vickerse odstraňuje nevýhody obou předcházejících zkoušek a je nejpoužívanější. [1] [7] [9]

### 2.2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

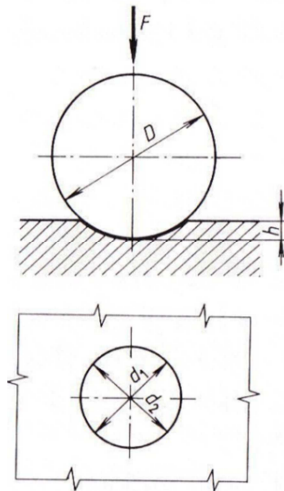
Autorem této metody je švédský inženýr Johan Augusta Brinell, který ji poprvé předvedl na veřejnosti v roce 1900 na světové výstavě v Paříži. Dnes je to jedna z nejběžnějších zkoušek převážně pro kovové materiály. Zkouška je vhodná na zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů s heterogenní strukturou. [7] [18]

Pro tuto zkoušku platí norma **ČSN EN ISO 6506-1, 2, 3,4 (42 0359)**. [20]



**Princip zkoušky:**

Zkouška spočívá ve vtláčování ocelové kalené kuličky nebo kuličky z tvrdokovu o průměru  $D$  do zkušební tělesa nebo výrobku působením síly  $F$ , směřující kolmo k měřenému povrchu po stanovenou dobu a po odlehčení se změří průměr vtisku  $d$  (aritmetický průměr dvou na sebe kolmých rozměrů  $d_1$  a  $d_2$ ) a stanoví se z něho tvrdost (Obr. 2). [1] [7]



Obr. 2. Princip zkoušky  
tvrdosti podle Brinella [1]



Obr. 3. Tvrdoměr Brinell  
3000 LDB BASIC [13]

Tvrdomost podle Brinella se určuje buď pomocí vzorce, anebo se přímo odečte z tabulek podle průměru vtisku. [7]

Vzorec pro výpočet tvrdosti:

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.1)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.2)$$

kde:  $F$  - zkušební zatížení [N]

$A$  - povrch vytlačovaného důlku [ $\text{mm}^2$ ]

$D$  - průměr kuličky [mm]

$d$  - aritmetický průměr vtisku [mm]

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

**Zkoušené těleso:**

Zkouška se provádí na povrchu, který je rovný, hladký, bez okují, mazadel a nečistot. Zkoušené těleso musí mít povrch upraven tak, aby umožnil přesné stanovení průměru vtisku. Povrch vzorku musí být co nejméně ovlivněn ohřevem nebo tvářením. Tloušťka zkušební vzorku musí mít alespoň osminásobek hloubky vtisku  $h$  (Obr. 2). Na protilehlé straně zkušební tělesa nesmí být patrné stopy deformace od vnikacího tělesa. [12] [23]

**Postup zkoušky:**

- Zkoušku provádíme na povrchu zkušební materiálu, anebo přímo na povrchu dané součásti, který musí být hladký a rovný, bez okují a mazadel.
- Teplota měření musí být v rozmezí 10 až 35 °C (obvykle  $23 \pm 5$  °C).
- Průměr kuličky a odpovídající zatížení je nutno volit tak, aby průměr vtisku  $d$  byl v rozmezí 0,25 D až 0,6 D.
- Rozdíl mezi hodnotami průměrů jednoho vtisku nesmí být větší než 5 %.
- Pro různý materiál se volí kuličky různého průměru s různou silou vytlačování (tab.3).
- Při zkoušce musí vzorek ležet na tuhé podložce tak, aby se nepohnul, a styčné plochy musí být čisté, bez cizích těles.
- Vzdálenost mezi středem vtisku a okrajem zkušební tělesa nebo výrobku musí být nejméně 2,5 d, vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků nejméně 4 d.
- Doba počátku zatěžování až do jeho plné hodnoty musí být v rozmezí 2 až 8 s. Doba plného zkušební zatížení se volí u ocelí a litin 10 až 15 s, u neželezných kovů může být podle měřeného materiálu 10 až 180 s.
- Po dobu zkoušky musí být přístroj chráněn proti rázům a chvění, které mohou ovlivnit výsledek měření. [1] [12] [23]

**Obecné schéma pro označování zkoušek tvrdosti:**

Tvrdosti podle Brinella HB označujeme dle materiálu, ze kterého je vyrobena kulička. [1]

HBW - kulička z tvrdokovu, používá se pro materiály s tvrdostí podle Brinella do 650.

HBS - kalená ocelová kulička, používá se pro materiály s tvrdostí podle Brinella do 450.

<u>XXX</u>	<u>HBW</u>	<u>XX</u>	/	<u>XXX</u>	/	<u>XX</u>	*) Uvádí se tehdy, liší - li se od stanovené doby (10 až 15 s) [1]
Hodnota tvrdosti	Symbol tvrdosti	Rozměr vnikacího tělesa		Velikost zkušební zatížení		Doba působení zkušební zatížení <sup>*)</sup>	

Tab. 3. Vztah průměru a zatěžující síly u metody Brinell [12]

Průměr kuličky v mm	10	5	2,5	2	1
Zkušební síla [N]	Poměr $0,102F/D^2$				
29 400	30				
14 710	15				
9 807	10				
7 355		30			
4 903	5				
2 452	2,5	10			
1 839			30		
1 226	1,25	5			
1 177				30	
980,7	1				
612,9		2,5	10		
392,3				10	
294,2					30
306,5		1,25	5		
245,2		1			
196,1				5	
153,2			2,5		
98,07				2,5	10
76,61			1,25		
61,29			1		
49,03				1,25	5
39,23				1	
24,52					2,5
12,26					1,25
9,807					1

Tab. 4. Volba poměru  $0,102 F / D^2$  pro různé materiály [12]

Materiál	Poměr $0,102F/D^2$	Tvrdość HB
Ocel	30	do 650
Litina (při zkouškách litiny musí být průměr kuličky 2,5 mm; 5 mm; 10mm)	10	$\leq 140$ HB
	30	$\geq 140$ HB
Měď a slitiny mědi	5	$< 35$
	10	35 až 200
	30	$> 200$
Lehké kovy a jejich slitiny	1,25 nebo 2,5	$< 35$
	5,10,15	35 až 80
	10,15	$> 80$
Cín, olovo, ložiskové kompozice a jiné slitiny	1,25	4.25
	1	3,2-20

### 2.2.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Tato zkouška byla vyvinuta v Anglii roku 1922 R. L. Smithem a G. E. Sanlandem, současný název pochází od tvrdoměru anglické firmy Vickers. Tato zkouška je především zkouškou laboratorní. Je vhodná pro přesnější práce kontrolní, přejímací nebo výzkumné. [7]

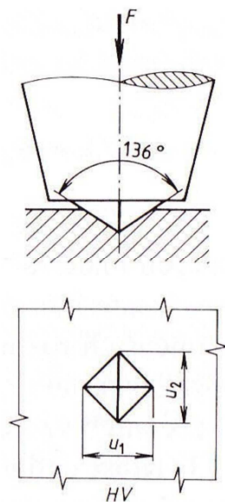
Pro tuto zkoušku platí norma ČSN EN ISO 6507-1, 2, 3, 4 (42 0374). [20]

#### *Princip zkoušky:*

Zkouška spočívá ve vtlačování diamantového čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  do materiálu působením síly  $F$ , která směřuje kolmo k měřenému povrchu po stanovenou dobu. K určení tvrdosti se změří po odlehčení délka úhlopříček vtisku (zjišťuje se aritmetický průměr obou změřených úhlopříček  $u_1, u_2$ ) (Obr. 4). Tato zkouška je vhodná zejména k měření velmi tenkých vrstev materiálů (nitridované vrstvy) a tvrdých materiálů (kalené součásti). [3] [4]

Ve velkých závodech se používá zdokonalených Vickersových tvrdoměrů tzv. diatestorů. Diatestory jsou vylepšené tvrdoměry tím, že obraz vtisku se promítá zvětšený na matnici.

[1]



Obr. 4. Princip zkouška tvrdosti podle Vickerse [1]



Obr. 5. Digitální tvrdoměr Vickers 50 kg [21]

Tvrdot podle Brinella se určuje buď pomocí vzorce, anebo se přímo odečte z tabulek podle průměru vtisku. [7]

$$HV = 0,102 \cdot \frac{F}{A} = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{u^2} \quad (2.3)$$

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (2.4)$$

kde: F - zkušební zatížení [N]

A - povrch vtisku [mm<sup>2</sup>]

u - aritmetický průměr vtisku [mm]

α - vrcholový úhel vnikacího tělesa [°]

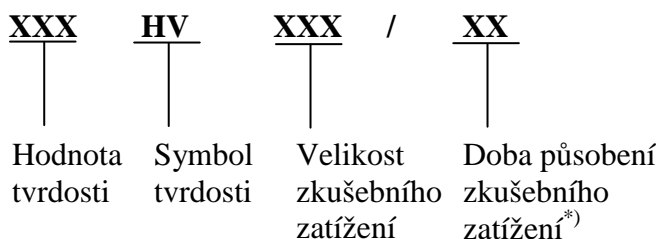
### **Zkoušené těleso:**

Zkouška se provádí na povrchu, který je rovný, hladký, bez okují, mazadel a nečistot. Zkoušené těleso musí mít povrch upraven tak, aby umožnil přesné měření rozměrů vtisku. Povrch vzorku musí být co nejméně ovlivněn ohřevem nebo tvářením. Tloušťka zkušebního vzorku musí být u slitin železa nejméně 1,2 u, v jiných případech 1,5 u. Zatížením musí působit plynule bez rázů a chvění. Na protilehlé straně zkušebního tělesa nesmí být patrné stopy deformace od vnikacího tělesa. Při zkouškách na zakřivených plochách se používá opravných součinitelů uvedených v normě. [12] [23]

### **Postup zkoušky:**

- Teplota měření musí být v rozmezí 10 až 35 °C (obvykle 23 ± 5 °C)
- Při zkoušce musí být použito některé z předepsaných zkušebních zatížení (tab. 5).
- Při zkoušce musí vzorek ležet na tuhé podložce tak, aby se nepohnul, a styčné plochy musí být čisté, bez cizích těles.
- Vzdálenost středu vtisku ke kraji zkušebního tělesa nebo ke kraji sousedního vtisku musí být nejméně 2,5 násobek velikosti úhlopříčky.
- Doba počátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí překročit 10 s. Doba působení plného zatížení se volí v rozmezí 10 až 15 s. Pro některé materiály mohou být i delší časy, které musí být vyznačeny v označení tvrdosti.
- Úhlopříčka vtisku se měří nejčastěji mikroskopicky s přesností ± 1 %.
- Rozdíl mezi hodnotami dvou úhlopříček vtisku nesmí být větší jak 5 %.
- Po dobu zkoušky musí být přístroj chráněn proti rázům a chvění, které mohou ovlivnit výsledek měření. [1] [4] [7] [12] [23]

*Obecné schéma pro označování zkoušek tvrdosti:* [1]



<sup>\*)</sup> Uvádí se jen, pokud se doba působení zkušebního zatížení liší od stanovené doby (10 až 15 s). [1]

Tab. 5. Zkušební zatížení při zkoušce tvrdosti metodou Vickers [24]

Zkoušky tvrdosti <sup>1)</sup>		Zkoušky tvrdosti při nízkém zatížení		Zkoušky mikrotvrdosti <sup>2)</sup>	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	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

<sup>1)</sup>Může být použito nominální zatížení větší než 980,7 N.  
<sup>2)</sup>Pro zkoušku mikrotvrdosti jsou doporučována následující zkušební zatížení.

### 2.2.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

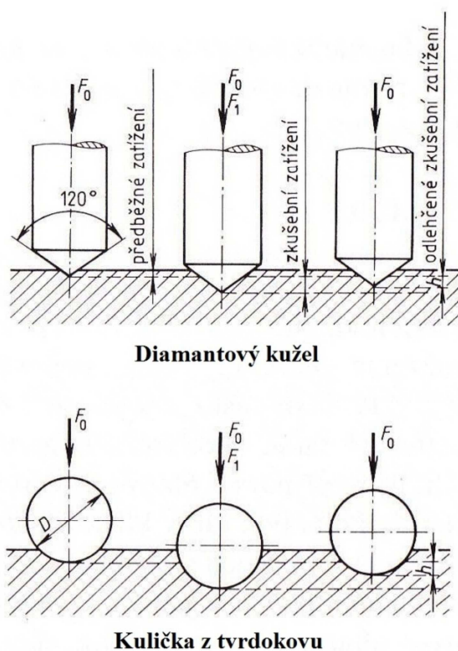
Tato zkouška byla vyvinuta v Americe S. P. Rockwellem a poprvé použita roku 1922. Od zkoušky podle Brinella a Vickerse se liší tím, že se neměří průměr vtisku ani délka úhlopříček, ale hloubka vtisku. Tato metoda je velmi rozšířená, protože je rychlá, snadná, vtisky malé. Většina tvrdoměrů pro tuto zkoušku je upravena tak, že hloubku vtisku odečítáme na číselníkovém úchylkoměru, kde ukazatel na číselníku ukazuje přímo tvrdost podle Rockwella. Z tohoto důvodu je tato metoda často používaná v provozu. Nejčastěji se používá v kalírnách při nitridování a cementování. [1] [7] [18] [23]

Pro tuto zkoušku platí norma **ČSN EN ISO 6508-1, 2, 3 (42 0360)**. [20]

**Princip zkoušky:**

Zkouška spočívá ve vlačování vnikacího tělesa s diamantovým kuželem o vrcholovém úhlu  $120^\circ$  (pro tvrdý materiál) nebo kuličky z tvrdokovu o průměru 1,5857 mm (1 / 16") nebo 3,175 mm (1 / 8") do povrchu zkušební tělesa. Měří se hloubka vtisku  $h$ , z které se určí tvrdost podle Rockwella (Obr. 6). [1] [7]

Celkové zkušební zatížení  $F = F_0 + F_1$  (tab. 6) se skládá s předběžného ( $F_0 = 98,07\text{N}$ ) a přídavného ( $F_1$  - je různé podle stupnice tvrdosti) (Tab. 6).



Obr. 6. Princip zkoušky tvrdosti podle Rockwella [1]



Obr. 7. Digitální dotykový tvrdoměr Rockwell 655 [13]

**Vztah pro výpočet tvrdosti podle Rockwella:**

$$\text{HR} = N - \frac{h}{S} \quad (2.5)$$

$$\text{HRA, HRC, HRD} = 100 - \frac{h}{0,002}$$

$$\text{HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK} = 130 - \frac{h}{0,002}$$

$$\text{HRN, HRT} = 100 - \frac{h}{0,001}$$

kde: N - číslo charakterizující stupnici

h - trvalá hloubka vtisku pod předběžným zkušebním zatížením po odstranění přídatného zkušebního zatížení (trvalá hloubka vtisku) [mm]

S - jednotka stupnice, charakterizující stupnici [mm]

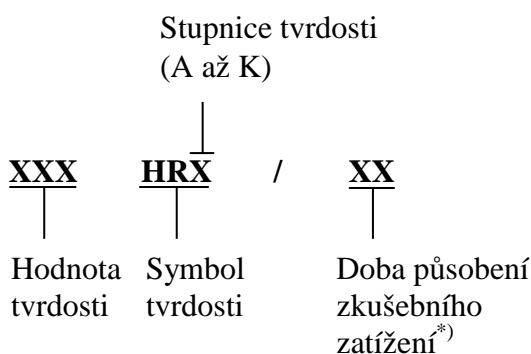
### **Zkoušené těleso:**

Zkouška se provádí na povrchu, který je rovný, hladký, bez okují, mazadel a nečistot. Zkoušené těleso musí mít povrch upraven tak, aby umožnil přesné měření rozměrů vtisku. Povrch vzorku musí být co nejméně ovlivněn ohřevem nebo tvářením. Tloušťka zkušebního vzorku nebo měřené povrchové vrstvy musí být nejméně 10 krát větší než hodnota  $h$  pro kuželová vnikací tělesa a nejméně 5 krát větší pro vnikací tělesa s kuličkou. Na protilehlé straně zkušebního tělesa nesmí být patrné stopy deformace od vnikacího tělesa. Při zkouškách na zakřivených plochách se používá opravných součinitelů uvedených v normě. [12] [23]

### **Postup zkoušky:**

- Teplota měření musí být v rozmezí 10 až 35 °C (obvykle  $23 \pm 5$  °C)
- Při zkoušce musí být použito některé z předepsaných zkušebních zatížení (tab. 6).
- Při zkoušce musí vzorek ležet na tuhé podložce tak, aby se nepohnul, a styčné plochy musí být čisté, bez cizích těles.
- Diamantový kužel nebo kuličku z tvrdokovu, která se dotýká povrchu zkoušeného tělesa, zatížíme předběžnou silou  $F_0$ . Potom zvolna sílu zvětšujeme během 2 až 8 s o přídatné zatížení  $F_1$ , až dosáhneme celkového zatížení  $F$  předepsaného normou (tab. 6). Pak přídatné zatížení  $F_1$  odlehčujeme na předběžné zatížení  $F_0$  a zjistíme hloubku vtisku.
- Doba působení celkového zkušebního zatížení je u materiálů, které vykazují silnou závislost plastické deformace na čase 10 až 15 s a u materiálů, které vykazují omezenou nebo žádnou závislost plastické deformace na čase 1 až 5 s.
- Vzdálenost středu vtisku ke kraji zkušebního tělesa nebo ke kraji sousedního vtisku se doporučuje nejméně 3 mm u stupnice A, B, C, 1 mm u stupnice N a 2 mm u stupnice T.
- Po dobu zkoušky musí být přístroj chráněn proti rázům a chvění, které mohou ovlivnit výsledek měření. [1] [7] [12] [23]



**Obecné schéma pro označování zkoušek tvrdosti:** [1]

<sup>\*)</sup> Uvádí se jen, pokud se doba působení zkušebního zatížení liší od stanovené doby (10 až 15 s). [1]

*Tab. 6. Zkoušky tvrdosti podle Rockwella - stupnice a rozsahy použití [24]*

Stupnice tvrdosti podle Rockwella	Značka tvrdosti	Typ vnikacího tělesa	Předběžné zatížení $F_0$ [N]	Přídavné zatížení $F_1$ [N]	Celkové zatížení $F$ [N]	Oblast použití (zkouška tvrdosti podle Rockwella)
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 HRA až 88 HRA
B	HRB	Kulička 1,5875 mm		882,6	980,7	20 HRB až 100 HRB
C	HRC	Diamantový kužel		1373	1471	20 HRC až 70 HRC
D	HRD	Diamantový kužel		882,6	980,7	40 HRD až 77 HRD
E	HRE	Kulička 3,175 mm		882,6	980,7	70 HRE až 100 HRE
F	HRF	Kulička 1,5875 mm		490,3	588,4	60 HRF až 100 HRF
G	HRG	Kulička 1,5875 mm		1373	1471	30 HRG až 94 HRG
H	HRH	Kulička 3,175 mm		490,3	588,4	80 HRH až 100HRH
K	HRK	Kulička 3,175 mm		1373	1471	40 HRK až 100 HRK
15N	HR15N	Diamantový kužel		29,42	117,7	147,1
30N	HR30N	Diamantový kužel	264,8		294,2	42 HR30N až 86 HR30N
45N	HR45N	Diamantový kužel	411,9		441,3	20 HR45N až 77 HR45N
15T	HR15T	Kulička 1,5875 mm	117,7		147,1	67 HR15T až 93 HR15T
30T	HR30T	Kulička 1,5875 mm	264,8		294,2	29 HR30T až 82 HR30T
45T	HR45T	Kulička 1,5875 mm	411,9		441,3	10 HR45T až 72 HR45T

#### 2.2.4 Zkoušky mikrotvrdosti

Mikrotvrdostí se rozumí tvrdost určená použitím zcela malých zatížení, která způsobí jen nepatrné vtisky. Tyto zkoušky našli uplatnění až po roce 1935. Zatím co při makrotvrdosti se zjišťuje tvrdost kovu jako krystalického celku, je možno při mikrotvrdosti stanovit tvrdost jednotlivých strukturních součástí kovu. Měření mikrotvrdosti je realizováno vtlačováním diamantového tělesa tvaru Vickersova nebo Knoopova jehlanu do povrchu měřeného tělesa silami, které jsou v rozsahu od 1 g (0,09807 N) do 1000 g (9,807 N).

Povrch zkoušeného tělesa musí být velmi pečlivě připraven. K tomuto zjištění se vzorek připravuje jako metalografický výbrus. To jsou výbrusy, při kterých nesmí dojít k deformačnímu nebo tepelnému ovlivnění povrchu. Skládají z několika na sebe navazujících kroků:

- odběr vzorku (musí plně charakterizovat studovaný materiál)
  - preparace vzorku (pokud jsou vzorky velmi malé je nutné je preparovat v umělé hmotě)
  - broušení (dosáhnoutí rovinného povrchu vzorku s minimálním poškozením, které se odstraní leštěním)
  - leštění (materiál z povrchu vzorku neubývá, ale nastává pouze deformace vrcholů povrchové drsnosti)
  - leptání (proces, při kterém dochází k zviditelnění jednotlivých strukturních součástí)
- [4] [7] [22] [25]

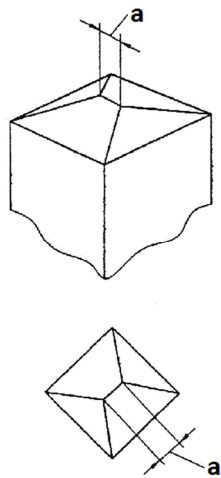
***Oblast použití zkoušek mikrotvrdosti je vhodná pro:***

- malé nebo tenké součásti
  - měření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkušební vzorku
  - měření mikrotvrdosti strukturních složek a fází
  - hodnocení vrstev po chemicko - tepelném zpracování
  - měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků
  - hodnocení svarových spojů
  - pro hodnocení oduhličujících procesů
  - studium difúzních pochodů
  - měření křehkých materiálů
  - měření tvrdosti v břitu nástroje
  - atd.
- [22]

## Zkouška mikrotvrdomosti podle Vickerse

### *Princip zkoušky:*

Určování mikrotvrdomosti Vickersovým jehlanem s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  se určuje stejně, jako byla popsána u Vickersovy zkoušky makrotvrdomosti. Pouze délka společné hrany mezi protilehlými stěnami jehlanu nesmí převyšovat 0,0005 mm (Obr. 8). Z důvodu velmi přesného měření úhlopříček vtisku musí být zajištěn přesný tvar vnikacího tělesa. Vztah pro výpočet mikrotvrdomosti je také stejný. (viz. kapitola 2.2.2). [4] [7]



*Obr. 8. Hrot vnikacího tělesa u zkoušek mikrotvrdomosti  
a - společná hrana o délce  
max. 0,5  $\mu\text{m}$  [22]*



*Obr. 9. Stolní tvrdoměr  
Micro - Vickers a Knoop  
412A/ 413A [13]*

### *Vztah pro výpočet mikrotvrdomosti:*

$$\text{HV} = 0,1855 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (2.6)$$

kde: F - zkušební zatížení [N]

u - aritmetický průměr vtisku [mm]

### *Zkoušené těleso:*

Zkouška se provádí na povrchu, který je rovný, hladký, bez okují, mazadel a nečistot. Mikrotvrdomost se obvykle měří na metalografických výbrusech. Tloušťka zkušebního tělesa musí být nejméně 1,5 násobek délky úhlopříčky vtisku. [7]

**Postup zkoušky:**

- Zkušební těleso musí být umístěno na tuhé podložce, tak aby se během zkoušky nepohnulo.
- Doba počátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí překročit 10 s. Doba působení plného zatížení se volí v rozmezí 10 až 15 s.
- Vzdálenost okraje vtisku od okraje zkušební tělesa musí být nejméně 1,5 násobek úhlopříčky vtisku. Vzdálenost okrajů dvou sousedních vtisků musí činit nejméně dvojnásobek úhlopříčky většího vtisku.
- Při zkoušce musí být použito některé z předepsaných zkušebních zatížení (Tab. 5) [4] [22]

**Zkouška mikrotvrlosti podle Knoop**

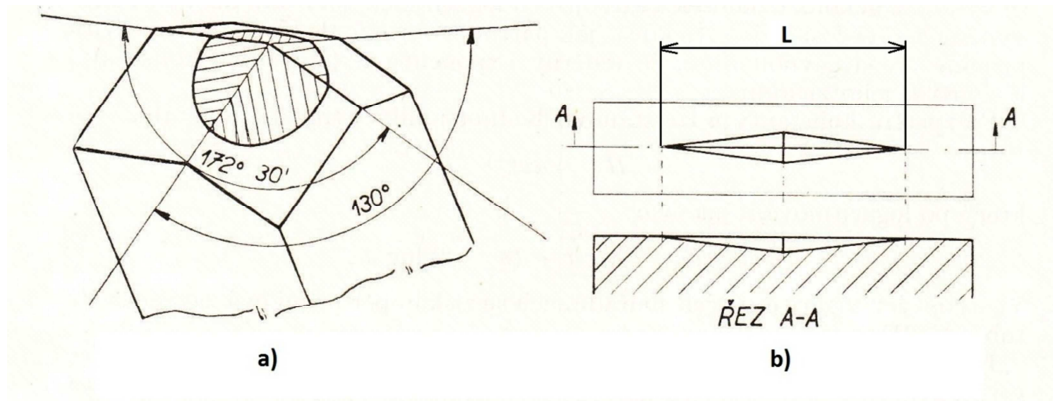
Tato zkouška byla vypracována v roce 1939 v Americe. Mikrotvrdoměr podle Knoop se liší od metody podle Vickerse ve tvaru jehlanu (indentor) (Obr. 10). Délka společné hrany mezi protilehlými stěnami jehlanu nesmí převyšovat 0,0005 mm (Obr. 11). [4] [9] [22]

Měření metodou Knoop se používá na měření tvrdosti velmi malých podlouhlých a tenkých vzorků z velmi tvrdých materiálů. [23]

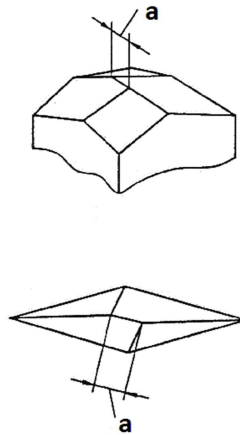
Pro tuto zkoušku platí norma **ČSN EN ISO 4545-1, 2, 3, 4 (42 0376)**. [20]

**Princip zkoušky:**

Metoda je založena na vlačování diamantového vnikacího tělesa ve tvaru čtyřbokého jehlanu s vrcholovými úhly  $172^{\circ}30'$  a  $130^{\circ}$  do zkoušeného materiálu působením síly  $F$ . Vtisk má tvar protáhlého kosočtverce a na rozdíl od metody Vickers se měří pouze delší úhlopříčka  $L$ . Stejně jako v případě tvrdosti podle Vickerse musí být zajištěn přesný tvar vnikacího tělesa. [12]



Obr. 10. a) Tvar diamantového jehlanu podle Knoopa, b) Vzhled vtisku Knoopova jehlanu [5]



Obr. 11. Hrot vnikacího tělesa u zkoušek mikrotvrlosti  
a - společná hrana o délce max. 0,5  $\mu\text{m}$  [22]

**Vztah pro výpočet mikrotvrlosti:**

$$\text{HK} = 0,102 \cdot \frac{F}{A} = 0,102 \cdot \frac{F}{L^2 \cdot 0,07028} = \frac{1,451 \cdot F}{L^2} \quad (2.7)$$

kde: F - zkušební zatížení [N]

A - povrch vytlačovaného dŮlku [ $\text{mm}^2$ ]

L - délka delší úhlopříčky [mm]

0,07028 - konstanta pro přepočet délky úhlopříčky na plochu vtisku

$$\text{konstanta } 0,102 = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,81}$$

**Zkoušené těleso:**

Musí být stejně připravené jako u měření mikrotvrdoti podle Vickerse.

**Postup zkoušky:**

- Provádí se stejně jako u měření mikrotvrdoti podle Vickerse.
- Při zkoušce musí být použito některé z předepsaných zkušebních zatížení (Tab. 7).

*Tab. 7. Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti podle Knoop [22]*

Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HK 0,01	0,09807
HK 0,02	0,1961
HK 0,025	0,2452
HK 0,05	0,4903
HK 0,1	0,9807
HK 0,2	1,961
HK 0,3	2,942
HK 0,5	4,903
HK 1	9,807

**2.2.5 Nanotvrdot**

Nanotvrdot je termín pro hodnoty mikrotvrdoti zjištěné při extrémně nízkých hodnotách zatížení (až 0,01 g). Takto vytvořené vtisky mají často rozměry menší než 100 nm ( $10^{-4}$  mm). Z důvodu požadované přesnosti naměřených hodnot mikrotvrdoti jsou schopny užívané přístroje (nanoindentory) měřit hloubku proniknutí indentoru  $h$  s přesností až 0,2 nm.

Nanotvrdot se využívá při měření velmi tenkých vrstev, povlaků, filmů a strukturních složek ve slitinách.

Při měření nanotvrdoti se nejčastěji používá vnikací tělísko, které je vyrobené z diamantu. Přednostně se používá vnikací těleso ve tvaru trojbokého jehlanu podle Berkoviche, který zachovává stejný poměr hloubky a plochy vtisku jako Vickersův jehlan, ale oproti jehlanu podle Vickerse (který je zakončen krátkým cca 0,0005 mm dlouhým příčným ostřím) má výhodu v možnosti vybrousit jeho špičku do bodu a zachovat tak geometrickou podobnost různě velkých a tedy i těch nejmenších vtisků. Dalším používaným indentorem je kulička,

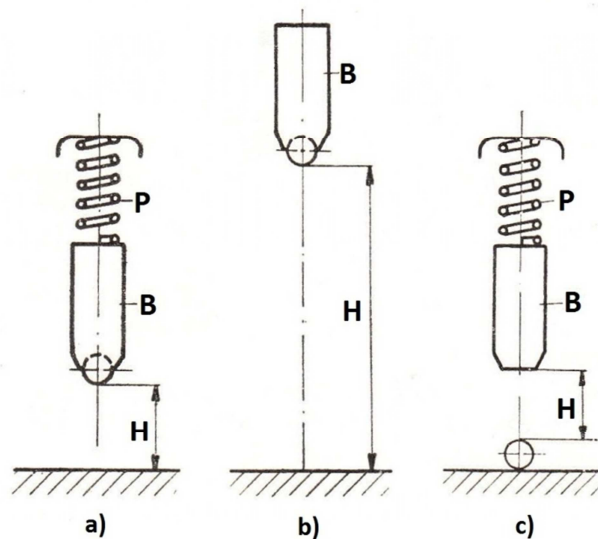
která má výhodu oproti Berkovichovu vnikacímu tělesu v postupném nárůstu zatížení, ale z důvodu obtížné výroby se nepoužívá tak často. Někdy se jako vnikající těleso používá také hrot ve tvaru rohu krychle, což je ostřejší hrot v porovnání s hrotem podle Berkoviche, tím tento hrot vyvolává větší napětí a deformace v okolí vtisku, čímž v okolí vtisku u křehkých materiálů vznikají dobře definovatelné trhlinky. [9] [22]

### 3 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI

Na rozdíl od statických zkoušek, kde se zkušební (vtiskovací) tělíčko nejprve bezrázově nastaví na zkoušený předmět, a pak se pozvolna vzrůstající silou vtlačuje, jsou při dynamických zkouškách poměry vtiskování zcela jiné. Zkušební tělíčko je buď z určité vzdálenosti proti zkoušenému předmětu vrženo, nebo na něm volně spočívá a je jiným tělesem rázem do něj vtisknuto. Přesnost dynamických zkoušek je obecně menší, než - li u vnikacích zkoušek tvrdosti, využívají se zejména v provozních podmínkách a pro měření tvrdosti velkých výrobků. Podle základního principu mohou být dynamické zkoušky tvrdosti buď plastické nárazové, kde se tvrdost určí z velikosti trvalého vtisku, nebo zkoušky elastické odrazové, u kterých se tvrdost určuje z pružných vlastností materiálu. [3] [4] [7]

#### 3.1 Plastické nárazové

Používají se tři metody (Obr. 12). Ráz se vyvozuje buď pružinou, která vymrští kuličku proti zkoušenému materiálu (a), nebo volným pádem, kdy závaží s kuličkou padá na zkoušený materiál (b). V jiném případě je kulička, na níž je veden ráz, v klidu na povrchu tělesa (c). [4]



Obr. 12. Schéma tří způsobů vtiskování kuličky do zkoušeného předmětu rázem [4];

a) vymrštění silou pružiny, b) volným pádem s beranem, c) rázem beranu

B - beran, P - pružina, H - výška

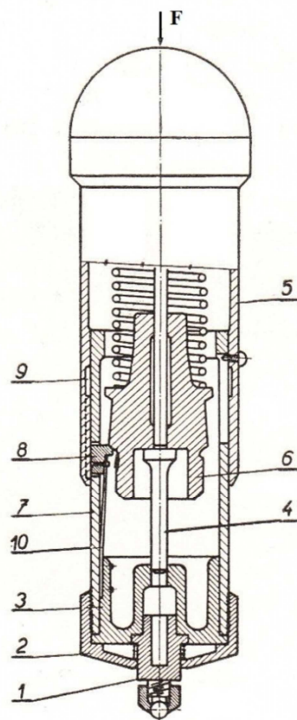


### 3.1.1 Metoda volným pádem

Do zkoušeného povrchu se vtláče kulička silou, která se vyvodí pádem beranu z určité výšky. Tvrdost se určí jako měrná deformační práce, tj. podíl celkové spotřebované práce a objemu vtisku. [7]

### 3.1.2 Metoda stlačenou pružinou (Baumannovo kladívko)

U Baumannova kladívka (Obr. 13) se kulička o průměru 5 nebo 10 mm vtláče do zkoušeného předmětu úderem razníku, který je po odjištění vymrštěn stlačenou pružinou. Pokud vzorek není dostatečně těžký, položí se na masivní podložku. Přístroj se přiloží kuličkou kolmo na zkoušený povrch a tlakem na zaoblený konec pláště se stlačuje pružina uvnitř pláště. Když je pružina stlačena na potřebnou délku, západka po odjištění vymrští razník, který uhoří na držák s kuličkou a ta vytvoří vtisk do zkoušeného materiálu. Lupou s měřítkem se změní průměr vtisku  $d$  a hodnota tvrdosti se vyhledá ve zvláštní tabulce, která je součástí výbavy přístroje. Při použití Baumannova kladívka je síla úderu razníku při každém měření stejně velká, vyvolaná stlačenou pružinou. [23]



Obr. 13. Řez Baumannovým kladívem [4]



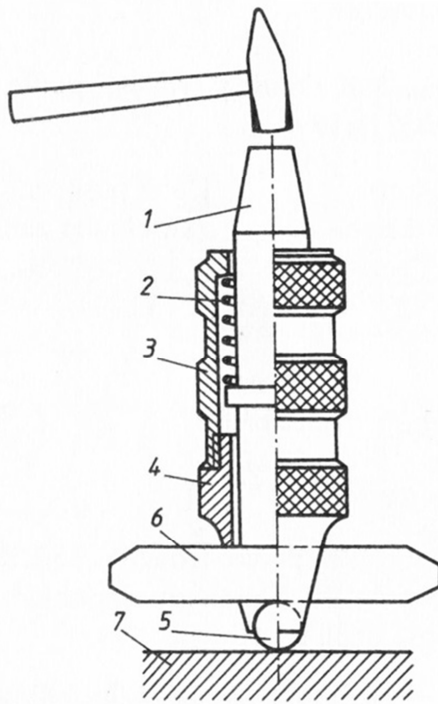
Obr. 14. Baumannovo kladívko (kulička 10mm) a lupa [16]

1 - nástavec s kuličkou, 2 - kryt, 3 - vodící kus, 4 - úderník, 5 - posuvný plášť, 6 - kladivo, 7 - pouzdro, 8 - západka, 9 - vybrání v plášti, 5, 10 - lisovací pružina

### 3.1.3 Metoda porovnávací (Poldiho kladívko)

Poldiho kladívko (Obr. 15) bylo vyrobeno Aloisem Repperem a patentováno v roce 1921. Je to přenosný jednoduchý tvrdoměr, který umožňuje stanovení tvrdosti na základě plasticke deformace vzniklé rázem a porovnáním známé pevnosti materiálu porovnávací tyčinky s pevností zkoušeného materiálu. Jde o nejmenší přenosný tvrdoměr pro měření tvrdosti metodou Brinell. Je používán převážně pro měření tvrdosti ocelí. Oblast jeho použití je především u velkých součástí ve výrobě a provozu. Výhodou tvrdoměru jsou jeho malé rozměry, hmotnost a možnosti použití prakticky v jakékoliv poloze. [3] [12]

Tvrdost měřená pomocí Poldiho kladívka se označuje symbolem HB Poldi. [23]



Obr. 15. Řez kladívkem Poldi [1]



Obr. 16. Kladívko Poldi a lupa [21]

1 - úderník, 2 - pružina, 3 - těleso, 4 - nástavec, 5 - kulička, 6 - pozorovací tyčinka, 7 - zkoušený materiál

Tvrdoměr se skládá z nástavce a odpruženého úderníku. Nástavec je ukončen držátkem ocelové kuličky o průměru 10 mm. Mezi kuličku a úderník se vkládá porovnávací tyčinka o hraně 11 mm a tvrdosti cca 200 HBS. Při zkoušce se tvrdoměr přiloží ke zkoušenému materiálu tak, aby kulička dosedla na zkoušené místo a osa tvrdoměru byla kolmá k povrchu zkoušeného materiálu. Na horní část tvrdoměru se udeří ručním kladivem, ráz se přenesse na kuličku a vytvoří vtisky ve zkoušeném předmětu a porovnávací tyčince (sílu

úderu není třeba měřit, jelikož poměr velikosti obou vtisků zůstává zachován nezávisle na působící síle). Lupou se změří průměr vtisku na zkoušeném materiálu i na porovnávací tyči. V tabulkách, které jsou ke každému tvrdoměru přiloženy, vyhledáme tvrdost podle velikosti vtisku. Tabulky platí pro porovnávací tyčinku z oceli o pevnosti  $R_m = 686,5$  MPa, je-li pevnost tyčinky odlišná, je nutno hodnotu tvrdosti odečtenou z tabulek korigovat koeficientem  $k$ , který je dán vztahem:

$$k = \frac{R_m}{686,5} \quad (3.1)$$

kde:  $R_m$  - skutečná pevnost porovnávací tyčinky [MPa]

Na srovnávacích tyčinkách bývá na čelní ploše vyznačena jak skutečná pevnost, tak i přepočítací koeficient  $k$ . [4] [12] [23]

## 3.2 Elastické odrazové

Metoda pružného odrazu je založena na měření tvrdosti na základě pružného odrazu tělesa, padajícího z určité výšky na povrch tělesa. Při nárazu se malá část kinetické energie spotřebuje na nevratnou plastickou deformaci povrchu zkoušeného tělesa a zbývající energie, která způsobila pružnou deformaci, se projeví odrazem tělesa. Tvrdost se určí z výšky odrazu (Shoreho skleroskop) nebo z úhlu odrazu (duroskop - používaný na měření tvrdosti svislých ploch). Takto získaná hodnota tvrdosti je ve srovnání s ostatními metodami velmi nepřesná. [4] [23]

### 3.2.1 Shoreho skleroskop

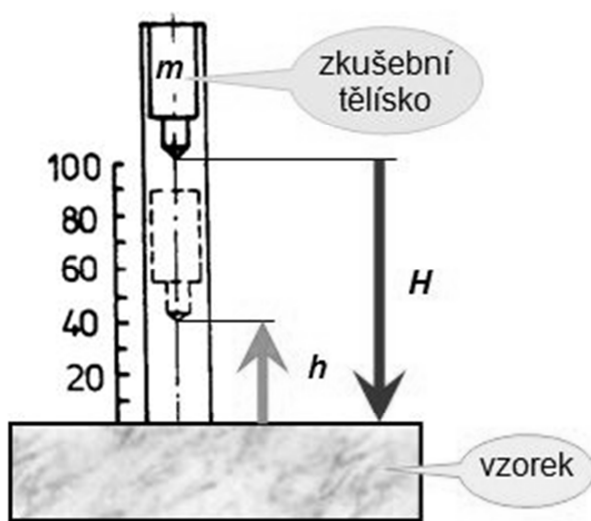
Tento přístroj (Obr. 17) se skládá ze skleněné kalibrované trubky, ve které se pohybuje malé válcové těleso o hmotnosti 2,5 g, zakončené na spodní části kulovitě zabroušeným diamantem a padá volně z výšky  $H = 254$  mm. Za trubkou je umístěna stupnice udávající empiricky zjištěné stupně tvrdosti podle Shoreho. Dílek HSh = 100 odpovídá výšce odrazu tělesa od tvrdě kalené uhlíkové oceli. Nastavení počáteční výšky tělíska se docílí například vysátím vzduch nad tělesem, anebo pružinou. Přesné odečítání výšky odrazu je zajištěno lupou.

Zkoušený materiál musí být v místě zkoušky hladký a měřicí přístroj musí být umístěn kolmo k jeho povrchu. Při zkoušce nesmí těleso dopadnout dvakrát na stejné místo, proto-

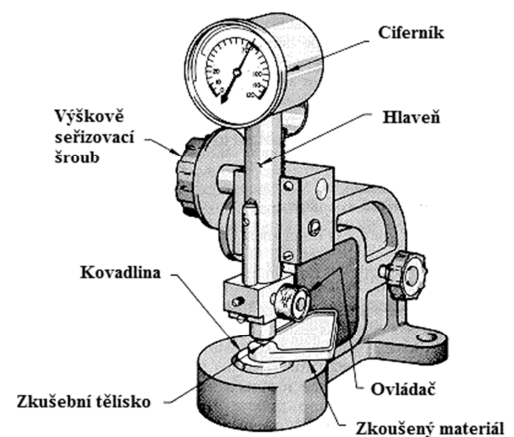
že v místě dopadu dochází k nepatrnému zpevnění povrchových vrstev materiálu, které by při opakovaném rázu zkreslilo výsledek měření.

Shoreho skleroskopy se už moc nepoužívají, používali se k určování tvrdosti tvrzených válců při zjišťování tvrdosti velmi tenkých povrchových vrstev. V současné době se Shoreho metoda našla největší uplatnění u měření nekovových materiálů (plasty, elastomery, kůže). [4] [12]

Tvrdot podle Shoreho skleroskopu se označuje symbolem HSh. [23]



Obr. 17. Schéma Shoreho skleroskopu [23]

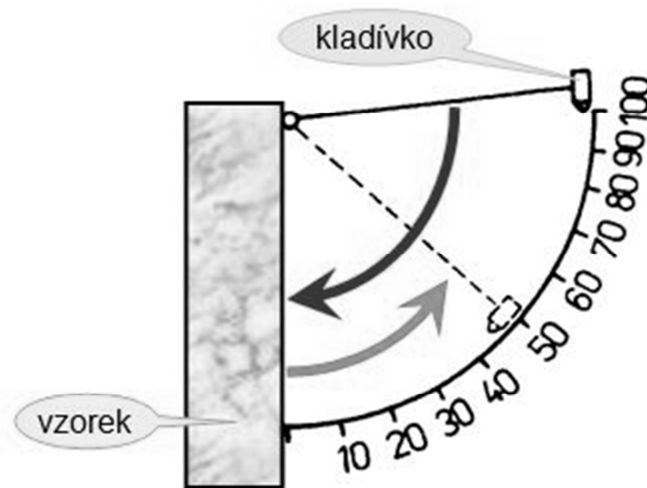


Obr. 18. Shoreho skleroskop  
(ciferníkový záznam) [14]

### 3.2.2 Duroskop

Tato metoda se používá na měření tvrdosti svislých ploch. Velikost tvrdosti je vyjádřena pomocí úhlu odrazu definovaného zkušebního tělesa (kladívka).

Přístroj (Obr. 19) se skládá z kladívka nesoucího na volném konci ocelovou kuličku, které je umístěno na otočném rameni. Kladívko padá z určitého úhlu na zkoušený předmět a při zpětném odrazu vezme s sebou vlečnou ručičku, která ukáže úhel odrazu kladívka. Dosažená hodnota tvrdosti se obvykle odečítá přímo na stupnici přístroje. Nepřesnosti při měření tvrdosti duroskopem jsou stejného druhu jako u Shoreho skleroskopu. [23]



Obr. 19. Schéma měření tvrdosti duroskopem [23]

### 3.2.3 Tvrdoměr Equotip

Je založen na Leebově principu. Měřicí metoda realizovaná přístroji EQUOTIP (Obr. 20) je jednoduchá dynamická zkouška tvrdosti. Nárazové tělíčko ze zušlechtěného kovu je vrženo silou vyvozenou pružinou proti kontrolované ploše. Dopad tělíška vyvolá deformaci kontrolované plochy, což vede ke snížení kinetické energie. Pro určení tvrdosti se měří rychlost padajícího a odraženého nárazového tělíška v určité definované vzdálenosti od kontrolované plochy. Poměr obou rychlostí, násobený tisícem, slouží ke stanovení hodnoty HL (tvrdost Leeb, nazváno podle autora této metody). Naměřené hodnoty (HL) se mohou zobrazit ve všech běžných stupnicích tvrdosti (HV, HB, HRA, HRB, HS, Rm). [11] [17]



Obr. 20. Přenosný tvrdoměr EQUOTIP 3  
PROCEQ SA [17]

Hlavní oblastí použití přístroje EQUOTIP 3 je měření na těžkých a velkých součástech, zejména součástech již zabudovaných do strojních celků a skupin. Kromě měření na rovinném povrchu lze měřit i na zakřivených plochách (rádius zakřivení  $R > 10$  mm). Protože se předpokládá, že přístroj bude využíván i v drsných dílenských podmínkách, může pracovat v rozsahu teplot (0 až 50) °C a při relativní vlhkosti max. 90 %. Přístroj je také chráněn proti stříkající vodě a prachu. [11]

### *Provedení zkoušky tvrdosti:*



#### **1. Vložení**

*Jednoduše vložte vnikající zařízení zasunutím do trubice směrem dopředu.*



#### **2. Umístění**

*Potom položte a přidržte vnikací zařízení na povrchu zkušební dílce a požadovaném místě měření.*



#### **3. Měřit**

*Spusťte ráz stiskem tlačítka.  
Hodnota tvrdosti bude trvale  
zobrazena.*



*Zobrazení informace na displeji.*

Obr. 21. Provádění zkoušky tvrdosti měřícím přístrojem EQUOTIP [17]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 4.1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo měření tvrdosti vybraných druhů ocelí (11 600, 12050, 14 220, 15 230), které byly v základním stavu (nezpracované), tepelně zpracované (zušlechtěné) a chemicko-tepelně zpracované (cementované).

### 4.2 Typy zkoušek

Měření tvrdosti bylo prováděno metodou Rockwell na stroji Easydur Italiana v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství ve Zlíně, pomocí pěti různých metod (HRA, HRC, HR15N, HR30N, HR45N), které zahrnují měření normálních a velmi tenkých povrchových vrstev. Tato metoda má výhodu oproti ostatním, že nemusí být vzorek nějak zvláště upraven z důvodu působení předběžného zatížení.

Tab. 8. Použité normy

pořadové číslo	název	norma
1	Zkouška tvrdosti podle Rockwella- Stupnice tvrdosti A	ČSN EN ISO 6508-1
2	Zkouška tvrdosti podle Rockwella- Stupnice tvrdosti C	ČSN EN ISO 6508-1
3	Zkouška tvrdosti podle Rockwella- Stupnice tvrdosti HR15N	ČSN EN ISO 6508-1
4	Zkouška tvrdosti podle Rockwella- Stupnice tvrdosti HR30N	ČSN EN ISO 6508-1
5	Zkouška tvrdosti podle Rockwella- Stupnice tvrdosti HR45N	ČSN EN ISO 6508-1

### 4.3 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky byly připraveny metalografickým výbrusem, při kterém byly vzorky nejprve preparovány zalitím do epoxidové pryskyřice na stroji SimpliMet 1000 Mounting Press, pro usnadnění manipulace při broušení a leštění. Pak následovalo broušení a leštění na stroji EcoMet 250 Pro Grinder-Polisher.

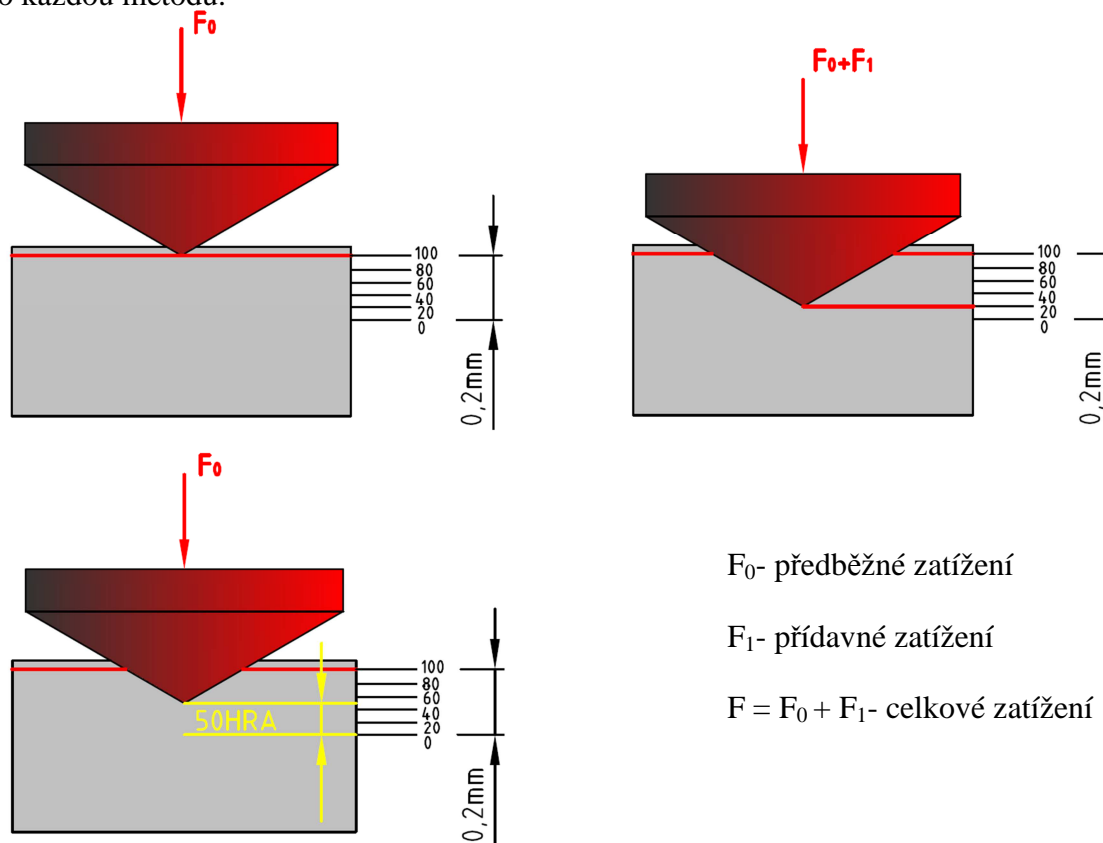


**Zkušební vzorky:**

11 600	Nezpracovaná a zušlechtěná ocel
12 050	Nezpracovaná a zušlechtěná ocel
14 220	Nezpracovaná a cementovaná ocel
15 230	Nezpracovaná a zušlechtěná ocel

**4.4 Postup měření**

Na zvoleném stroji se nastavila požadovaná zkouška tvrdosti a zkoušený vzorek se položil na tuhou podložku. Po zpuštění zkoušky se do materiálu zatlačil diamantový kužel s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  (Obr. 22) nejprve předběžným zatížením  $F_0$  (Tab. 6), a pak následně pozvolným zvětšováním síly o přídavné zatížení  $F_1$  (Tab. 6) až se dosáhlo celkového zatížení  $F$  (Tab. 6). Na tomto zatížení pak následně materiál nějakou dobu zůstal. Pak následovalo odlehčování přídavného zatížení na předběžné zatížení  $F_0$  a zjistila se hloubka vtisku. Na tomto stroji se tvrdost určila automaticky z hloubky vtisku. Měření bylo prováděno 10x pro každou metodu.



Obr. 22. Schéma metody

## 5 TEPENÉ ZPRACOVÁNÍ A CHEMICKO - TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ VYBRANÝCH DRUHŮ OCELÍ

### 11 600 zušlechtěná (popouštění při vysokých teplotách)

- kalící teploty 860 °C, uhlíkový potenciál  $\approx 0,3\%C$ , popouštění 500°C / 90 min.

### 12 050 zušlechtěná (popouštění při vysokých teplotách)

- kalící teploty 860 °C, uhlíkový potenciál  $\approx 0,3\%C$ , popouštění 500°C / 90 min.

### 14 220 cementovaná

- cementováno 0,9 mm, kalící teploty 820 °C / sůl AS 140, popouštění 160°C / 2 hod.

### 15 230 zušlechtěná (popouštění při vysokých teplotách)

- kalící teploty 860°C, uhlíkový potenciál  $\approx 0,3\%C$ , popouštění 540°C / 2 hod.

## 5.1 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování ocelí je pochod, při kterém je součástka podrobena jednomu nebo několika tepelným cyklům, aby se při daném složení materiálu dosáhlo požadované struktury a tím i vlastností. Každý cyklus tepelného zpracování se skládá z ohřevu, výdrže na teplotě a následném ochlazování. Znázorňuje se graficky v souřadnicích teplota - čas. [2]

### 5.1.1 Kalení

Získání větší tvrdosti a tím i vyšší pevnosti. Podstatou kalení je pomalé, stejnoměrné ohřátí ocelí na teplotu kalení (nad teplotu  $A_1 = 727^\circ C$ ) a následuje prudké ochlazení. Všechny druhy ocelí nejsou kalitelné, kalitelní oceli jsou ty, které mají obsah uhlíku vyšší jak 0,35 %. Podle druhu oceli ochlazujeme ve vodě, oleji nebo na vzduchu.

Kalení dělíme na martenzitické a bainitické. [1] [2]

### 5.1.2 Popouštění

Zakalená ocel je křehká a náchylná k praskání. Aby se úroveň vnitřního pnutí snížila a zlepšila se houževnatost, mělo by po zakalení vždy následovat popouštění. Je to ohřev na popouštěcí teplotu, která je nižší než teplota kalení  $A_1$ , pak následuje výdrž na této teplotě a následné ochlazování vhodnou rychlostí. Podle výšky popouštěcích teplot se rozlišuje popouštění při nízkých teplotách a vysokých teplotách. [5]

**Popouštění při nízkých teplotách (napouštění)** v rozmezí teplot 100 až 300°C. Jeho cílem je snížit hladinu vnitřního pnutí, zmenšit obsah zbytkového austenitu a zlepšení houževnatosti při zachování vysoké tvrdosti. Používá se zejména u nástrojových ocelí. U konstrukčních ocelí je toto popouštění méně časté. Popouští se zejména ve vroucí vodě, olejové nebo solné lázni. [6]

**Popouštění při vysokých teplotách (zušlechťování)** v rozmezí teplot 400 až 600°C. Při popouštění vzniká sorbitická struktura (ferit + cementit) s příznivou kombinací pevnostních vlastností (mez kluzu, pevnosti), houževnatost a plasticity. Tato struktura se získá martenzitickým kalením a následným popouštěním při vysokých teplotách. Používá se pro značně namáhané součásti z konstrukční oceli. [2] [6]

## 5.2 Chemicko-tepelné zpracování

Chemicko-tepelným zpracováním se vytváří povrchové vrstvy, jejíž složení se liší od základního materiálu, který zůstává beze změny. Změny složení povrchu se dosáhne difuzním sycením povrchu oceli různými prvky (C, N, C+N, B, Si, Al, apod.). Cílem chemicko-tepelného zpracování je zvýšení tvrdosti a odolnosti povrchu proti opotřebení při zachování houževnatého jádra. [2] [6]

### 5.2.1 Cementování

Cementování je nasycování povrchu nízkouhlíkových ocelí uhlíkem a následné zakalení. Nasycuje se uhlíkem povrch ocelí s nízkým obsahem uhlíku (do 0,25 %) a tím se vytváří na povrchu vrstva, která je obohacená uhlíkem až na eutektoidní nebo mírně nadeutektoidní koncentraci (0,9% C). Zakalením nacementované součásti se získá ve vrstvě martenzitická struktura o vysoké tvrdosti. Cementuje se při teplotách 850 až 950°C. Dobu výdrže na teplotě je nutné volit podle požadované tloušťky cementované vrstvy. Vytvářejí se vrstvy obvykle o tloušťce kolem 2 mm. Podle druhu prostředí, z něhož difunduje do ocelí uhlík, rozlišujeme tři způsoby cementování (v tuhém prostředí, tekutém prostředí a plynném prostředí). [2] [4]

## 6 OCEL 11 600

Ocel obvyklých vlastností s vyšším obsahem uhlíku udávaná normou ČSN 41 1600. Vhodná na strojní součásti namáhané staticky i dynamicky, u nichž se nevyžaduje svařitelnost. Součásti vystavené velkému měrnému tlaku (hřídele, klíny, čepy, pastorky, šneky, včetně lisů apod.). [2]

Tab. 9. Chemické složení oceli 11 600

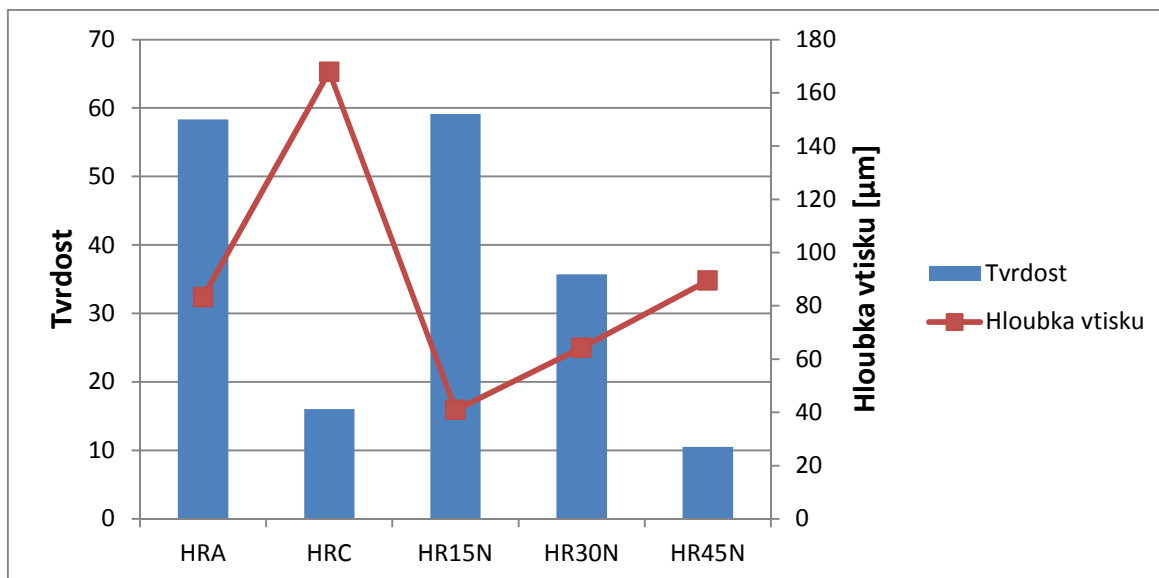
Chemické složení [hm %]		
P	S	N
max. 0,045	max. 0,04	max. 0,009

### 6.1 Nezpracovaná ocel 11 600

Tab. 10. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 11 600

Číslo měř.	HRA		HRC		HR15N		HR30N		HR45N	
	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
1	57,99	84,02	5,23	189,55	63,46	36,54	24,18	75,82	5,42	94,58
2	62,97	74,06	14,33	171,35	59,38	40,62	42,57	57,43	1,81	98,19
3	55,69	88,62	17,36	165,29	64,46	35,54	20,67	79,33	11,05	88,95
4	53,23	93,55	13,21	173,58	64,93	35,07	34,99	65,01	9,26	90,74
5	52,97	94,06	12,29	175,43	45,93	54,07	43,84	56,16	19,26	80,74
6	59,79	80,42	15,87	168,27	53,65	46,35	26,88	73,12	6,83	93,17
7	56,69	86,63	24,56	150,88	51,23	48,77	45,32	54,68	29,82	70,18
8	63,97	72,07	18	164,01	59,58	40,42	38,63	61,37	12,57	87,43
9	59,75	80,51	14,23	171,54	53,6	46,4	43,75	56,25	6,08	93,92
10	60,58	78,85	25,46	149,08	75,02	24,98	36,41	63,59	3,33	96,67
$\bar{x}$	<b>58,36</b>	<b>83,28</b>	<b>16,05</b>	<b>167,90</b>	<b>59,12</b>	<b>40,88</b>	<b>35,72</b>	<b>64,28</b>	<b>10,54</b>	<b>89,46</b>
s	<b>3,56</b>	<b>7,13</b>	<b>5,59</b>	<b>11,17</b>	<b>7,94</b>	<b>7,94</b>	<b>8,47</b>	<b>8,47</b>	<b>8,01</b>	<b>8,01</b>

t - tvrdost, h - hloubka vtisku [ $\mu\text{m}$ ],  $\bar{x}$  - aritmetický průměr, s - směrodatná odchylka



Obr. 23. Porovnání tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 11 600 danými metodami

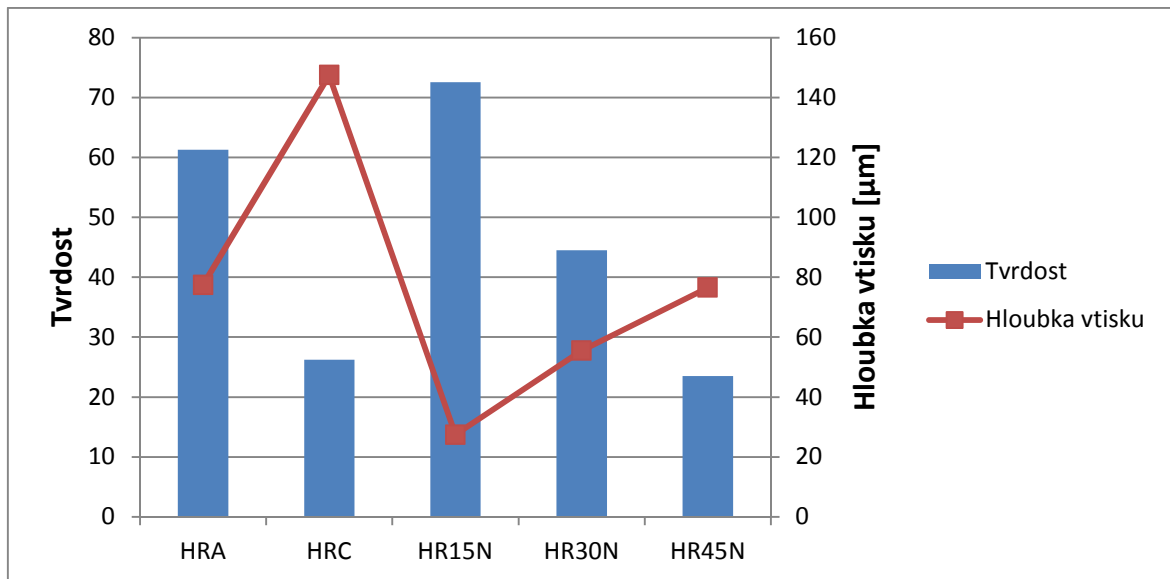
Z výsledků měření bylo zjištěno, že největší hodnota tvrdosti u nezpracované oceli 11 600 byla dosažena metodou HR15N (59,12 HR15N), tato tvrdost se lišila jen nepatrně oproti metodě HRA (58,36 HRA). Nejmenší tvrdost vykazovala metoda HR45N (10,54 HR45N) (Tab. 10, Obr. 23).

## 6.2 Zušlechtěná ocel 11 600

Tab. 11. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku zušlechtěné oceli 11 600

Číslo měř.	HRA		HRC		HR15N		HR30N		HR45N	
	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
1	61,86	76,29	26,79	146,42	70,34	29,66	54,27	45,73	18,64	81,36
2	58,18	83,64	25,44	149,13	79,53	20,47	49,82	50,18	30,43	69,57
3	60,79	78,42	26,51	146,99	72,28	27,72	51	49	26,98	73,02
4	58,8	82,41	25,01	149,99	81,76	18,24	49,44	50,56	20,72	79,28
5	62,02	75,96	25,82	148,37	63,18	36,82	35,88	64,12	17,87	82,13
6	60,48	79,05	26,6	146,81	69,91	30,09	49,44	50,56	28,59	71,41
7	64,79	70,42	27,24	145,53	67,92	32,08	38,44	61,56	22,29	77,71
8	62,57	74,87	24,21	151,59	74,89	25,11	37,63	62,37	15,79	84,21
9	58,82	82,36	25,91	148,18	76,83	23,17	47,93	52,07	33,37	66,63
10	64,58	70,84	28,99	142,02	69,01	30,99	31,33	68,67	20,15	79,85
$\bar{x}$	61,29	77,43	26,25	147,50	72,57	27,44	44,52	55,48	23,48	76,52
s	2,20	4,40	1,25	2,50	5,39	5,39	7,47	7,47	5,64	5,64

t - tvrdost, h - hloubka vtisku [ $\mu\text{m}$ ],  $\bar{x}$  - aritmetický průměr, s - směrodatná odchylka



Obr. 24. Porovnání tvrdost a hloubky vtisku zušlechtěné oceli 11 600 danými metodami

Z výsledků měření bylo zjištěno, že největší hodnota tvrdosti u zušlechtěné oceli 11 600 byla dosažena metodou HR15N (72,57 HR15N). Nejmenší tvrdost vykazovala metoda HR45N (23,48 HR45N) (Tab. 11, Obr. 24).

## 7 OCEL 12 050

Uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení udávaná normou ČSN 41 2050. Vhodná na hřídele těžních strojů, turbokompresorů, čerpadel, elektromotorů, na větší ozubená kola, šneky, automobilové klikové hřídele, ojnice, páky řízení, závěsy pružin, lamely spojek, čepy apod. [2]

Tab. 12. Chemické složení oceli 12 050

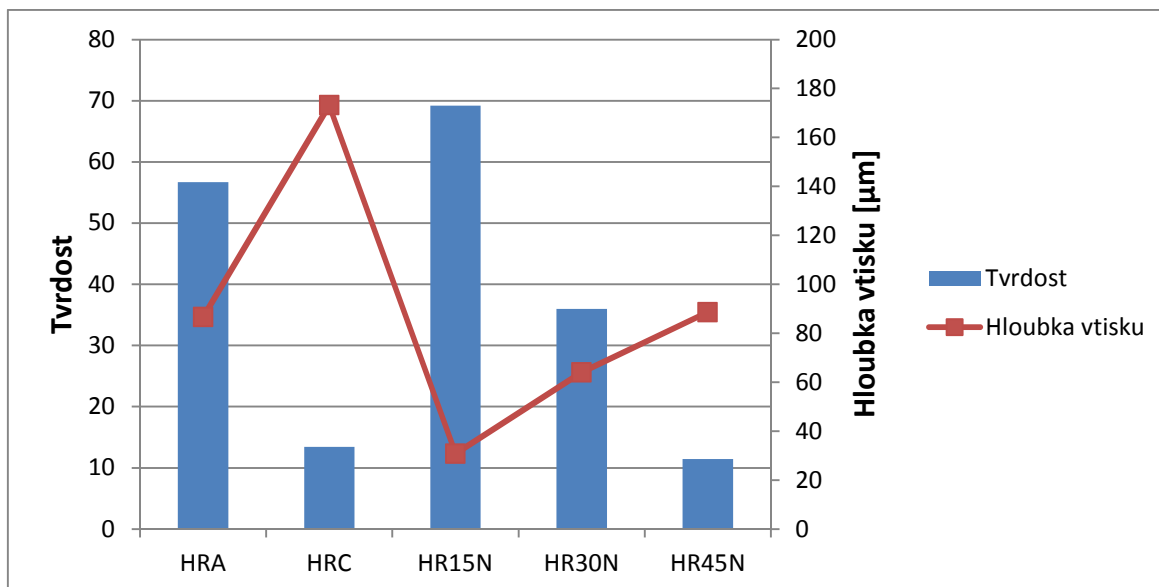
Chemické složení [hm %]							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,040	max. 0,040

### 7.1 Nezpracovaná ocel 12 050

Tab. 13. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 12 050

Číslo měř.	HRA		HRC		HR15N		HR30N		HR45N	
	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
1	52	96	13,68	172,64	77,25	22,75	32,76	67,24	12,76	87,24
2	58,35	83,31	8,43	183,15	59,91	40,09	36,41	63,59	17,07	82,93
3	56,38	87,24	17,31	165,38	74,79	25,21	38,63	61,37	8,5	91,5
4	55,74	88,52	18,21	163,58	61,62	38,38	35,22	64,78	8,02	91,98
5	56,36	87,28	17,22	165,57	70,71	29,29	28,73	71,27	12,76	87,24
6	57,26	85,49	12,81	174,39	74,22	25,78	30,81	69,19	7,03	92,97
7	57,88	84,25	6,34	187,32	71,89	28,11	<b>17,36</b>	<b>82,64</b>	8,83	91,17
8	54,23	91,55	11,53	176,94	67,35	32,65	45,41	54,59	22,57	77,43
9	56,6	86,81	16,34	167,33	66,26	33,74	40,01	59,99	9,92	90,08
10	62,31	75,39	12,31	175,38	68,16	31,84	36,02	63,98	6,89	93,11
$\bar{x}$	<b>56,71</b>	<b>86,58</b>	<b>13,42</b>	<b>173,17</b>	<b>69,22</b>	<b>30,78</b>	<b>36,00</b>	<b>64,00</b>	<b>11,44</b>	<b>88,57</b>
s	<b>2,55</b>	<b>5,11</b>	<b>3,76</b>	<b>7,52</b>	<b>5,36</b>	<b>5,36</b>	<b>4,74</b>	<b>4,74</b>	<b>4,78</b>	<b>4,78</b>

t - tvrdost, h - hloubka vtisku [μm],  $\bar{x}$  - aritmetický průměr, s - směrodatná odchylka, červeně označené hodnoty jsou vyřazené hodnoty, se kterými se nepočítá v důsledku velké chyby měření.



Obr. 25. Porovnání tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 12 050 danými metodami

Z výsledků měření bylo zjištěno, že největší hodnota tvrdosti u nezpracované oceli 12 050 byla dosažena metodou HR15N (69,22 HR15N). Nejmenší tvrdost vykazovala metoda HR45N (11,44 HR45N). Červené hodnoty u metody HR30N (tab. 13) nemohly být započítány do výsledku v důsledku velké chyby (Tab. 13, Obr. 25).

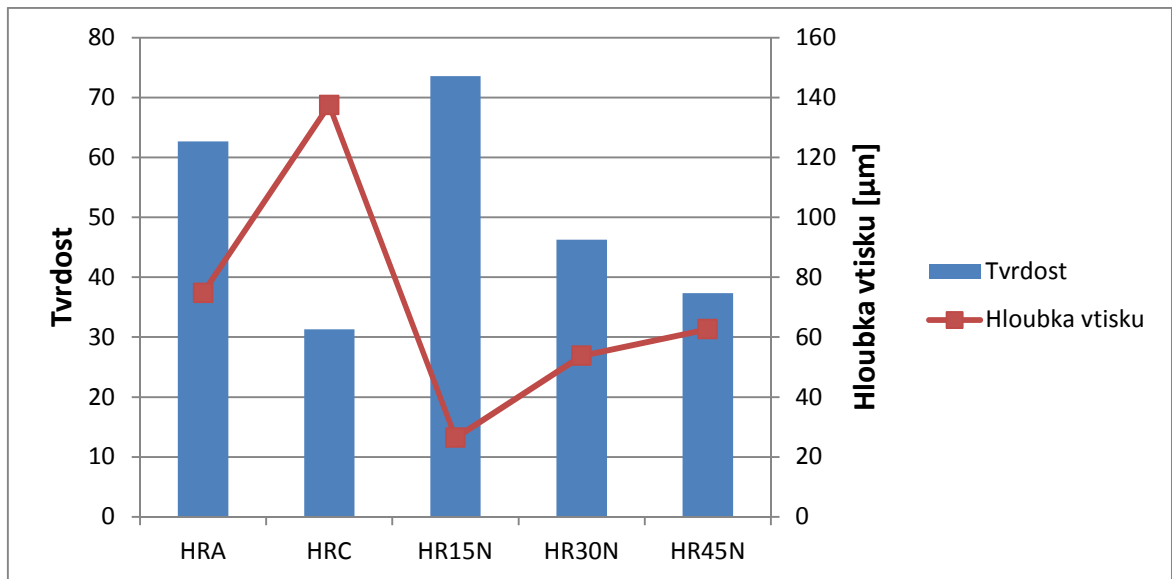
## 7.2 Zušlechtěná ocel 12 050

Tab. 14. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku zušlechtěné oceli 12 050

Číslo měř.	HRA		HRC		HR15N		HR30N		HR45N	
	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
1	52,07	95,87	31,39	137,23	75,65	24,35	44,98	55,02	50,76	49,24
2	66,81	66,39	36,95	126,1	62,28	37,72	43,28	56,72	38,59	61,41
3	65,03	69,94	30,7	138,61	63,84	36,16	39,58	60,42	19,58	80,42
4	59,58	80,84	32,71	134,58	85,92	14,08	48,96	51,04	56,31	43,69
5	66,03	67,95	25,13	149,75	73,09	26,91	43,9	56,1	25,03	74,97
6	62,31	75,39	28,83	142,35	86,73	13,27	34,47	65,53	34,56	65,44
7	61,5	77	30,01	139,98	73,27	26,73	57,96	42,04	22,38	77,62
8	65,86	68,28	32,47	135,06	73,79	26,21	44,37	55,63	57,16	42,84
9	70,74	58,52	34,63	130,74	82,42	17,58	46,93	53,07	36,12	63,88
10	56,64	86,72	30,16	139,69	58,77	41,23	58,02	41,98	33,14	66,86
$\bar{x}$	62,66	74,69	31,30	137,41	73,58	26,42	46,25	53,76	37,36	62,64
s	5,19	10,37	3,06	6,13	9,22	9,22	6,97	6,97	12,85	12,85

t - tvrdost, h - hloubka vtisku [ $\mu\text{m}$ ],  $\bar{x}$  - aritmetický průměr, s - směrodatná odchylka





Obr. 26. Porovnání tvrdosti a hloubky vtisku zušlechtěné oceli 12 050 danými metodami

Z výsledků měření bylo zjištěno, že největší hodnota tvrdosti u zušlechtěné oceli 12 050 byla dosažena metodou HR15N (73,58 HR15N). Nejmenší tvrdost vykazovala metoda HRC (31,30 HRC) (Tab. 14, Obr. 26).

## 8 OCEL 14 220

Ocel Mn - Cr je vhodná k cementování, kyanování a objemovému tváření, je udávána normou ČSN 41 4220. Ocel je dobře tvárná za tepla a po žíhání i za studena, dobře obrobitelná, dobrá svařitelnost, s velmi tvrdou cementovanou vrstvou a velkou pevností v jádře. Používá se na hřídele, ozubená kola, vačkové hřídele, pístní čepy, pera, zubové spojky, včetně obráběcích strojů, trny, upínací nářadí apod. [2]

Tab. 15. Chemické složení oceli 14 220

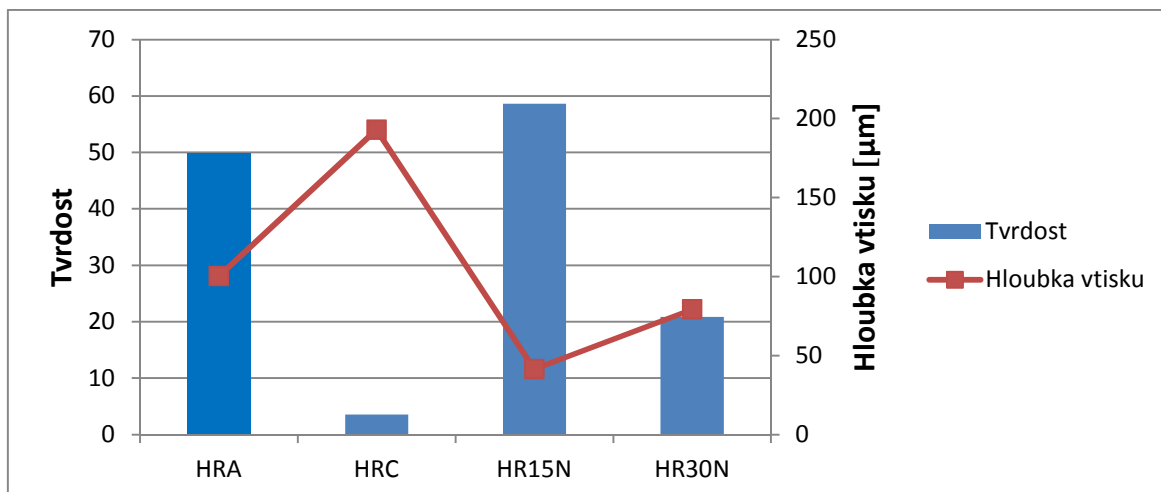
Chemické složení [hm %]					
C	Mn	Si	Cr	P	S
0,14-0,19	1,10-1,40	0,17-0,37	0,80-1,10	max. 0,035	max. 0,035

### 8.1 Nezpracovaná ocel 14 220

Tab. 16. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 14 220

Číslo měř.	HRA		HRC		HR15N		HR30N		HR45N	
	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
1	48,04	103,92	-2,57	205,14	54,22	45,78	62,7	37,3	-4,82	104,82
2	51,6	96,81	-4,26	208,51	57,02	42,98	16,97	83,03	-2,4	102,4
3	51,12	97,76	-3,21	206,42	70,57	29,43	17,17	82,83	-7,38	107,38
4	58,16	83,69	1,55	196,9	44,09	55,91	23,52	76,48	0,77	99,23
5	51,15	97,71	5,08	189,84	52,14	47,86	10,63	89,37	-12,92	112,92
6	47,97	104,06	-2,33	204,67	65,93	34,07	21,05	78,95	-1,51	101,51
7	51,1	97,8	-1,72	203,44	66,97	33,03	23,04	76,96	-16,15	116,15
8	44,06	111,88	8,24	183,53	58,78	41,22	27,17	72,83	-8,56	108,56
9	49,89	100,23	0,61	198,79	58,58	41,42	28,11	71,89	-14,73	114,73
10	45,46	109,09	2,21	195,57	58,06	41,94	19,97	80,03	-5,01	105,01
$\bar{x}$	49,86	100,30	3,54	192,93	58,64	41,36	20,85	79,15	-	-
s.	3,70	7,39	2,78	5,57	7,36	7,36	5,15	5,15	-	-

t - tvrdost, h - hloubka vtisku [ $\mu\text{m}$ ],  $\bar{x}$  - aritmetický průměr, s - směrodatná odchylka, červeně označené hodnoty jsou vyřazené hodnoty, se kterými se nepočítá v důsledku dosažení záporných hodnot a velké chyby měření.



Obr. 27. Porovnání tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 14 220 danými metodami

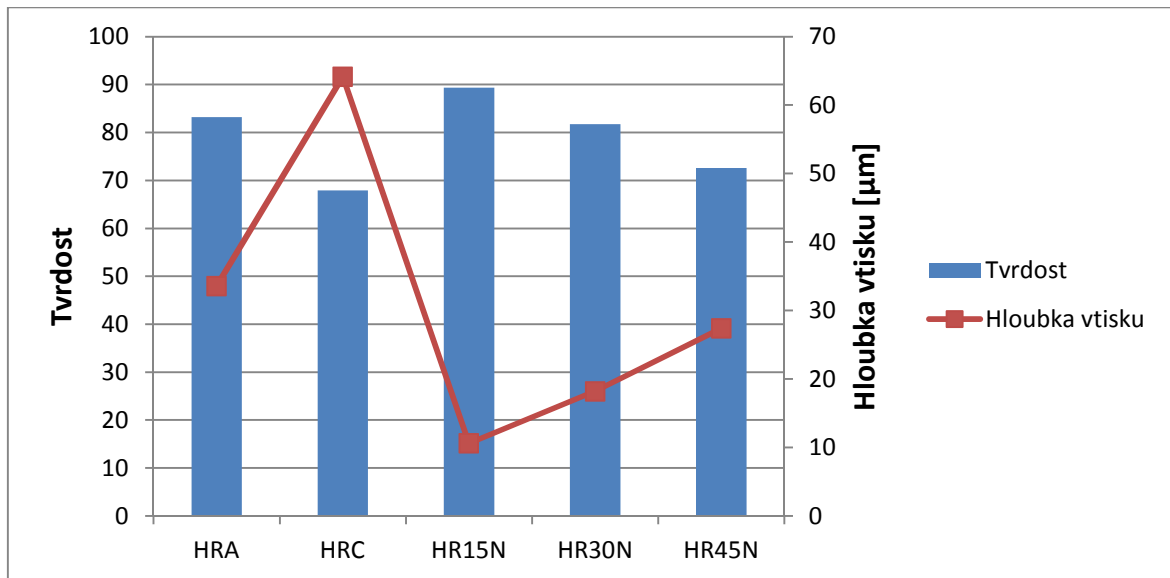
Z výsledků měření bylo zjištěno, že největší hodnota tvrdosti u nezpracované oceli 14 220 byla dosažena metodou HR15N (58,64 HR15N). Nejmenší tvrdost vykazovala metoda HRC (3,54 HRC). Červeně označené hodnoty u měření metodami HRC a HR45N nebyly započítány v důsledku záporné hodnoty a červené hodnoty u metody HR30N v důsledku velké chyby. Tvrdost metodou HR45N nebyla zjištěna v důsledku změřených devíti záporných hodnot z deseti měření (Tab. 16, Obr. 27).

## 8.2 Cementovaná ocel 14 220

Tab. 17. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku cementované oceli 14 220

Číslo měř.	HRA		HRC		HR15N		HR30N		HR45N	
	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
1	80,46	39,09	65,84	68,33	98,05	1,95	80,15	19,85	77,77	22,23
2	84,2	31,6	68,3	63,4	94,17	5,83	81,19	18,81	64,13	35,87
3	84,7	30,61	66,22	67,57	91,95	8,05	79,14	20,86	70,2	29,8
4	79,51	40,99	68,96	62,08	95,78	4,22	82,42	17,58	74,56	25,44
5	84,05	31,9	69,41	61,18	83,28	16,72	84,64	15,36	71,71	28,29
6	85,17	29,66	60,93	78,14	88,77	11,23	82,47	17,53	77,49	22,51
7	79,7	40,61	66,19	67,63	79,25	20,75	<b>93,84</b>	<b>6,16</b>	76,31	23,69
8	86,19	27,63	72,33	55,35	86,54	13,46	82,65	17,35	75,79	24,21
9	83,7	32,61	69,87	60,27	83,51	16,49	81,05	18,95	69,57	30,43
10	84,46	31,08	71,19	57,62	92,47	7,53	82,23	17,77	68,35	31,65
$\bar{x}$	<b>83,21</b>	<b>33,58</b>	<b>67,92</b>	<b>64,16</b>	<b>89,38</b>	<b>10,62</b>	<b>81,77</b>	<b>18,23</b>	<b>72,59</b>	<b>27,41</b>
s	<b>2,28</b>	<b>4,56</b>	<b>3,11</b>	<b>6,21</b>	<b>5,81</b>	<b>5,81</b>	<b>1,51</b>	<b>1,51</b>	<b>4,29</b>	<b>4,29</b>

t - tvrdost, h - hloubka vtisku [ $\mu\text{m}$ ],  $\bar{x}$  - aritmetický průměr, s - směrodatná odchylka, červeně označené hodnoty jsou vyřazené hodnoty, se kterými se nepočítá v důsledku velké chyby měření.



Obr. 28. Porovnání tvrdosti a hloubky vtisku cementované oceli 14 220 danými metodami

Z výsledků měření bylo zjištěno, že největší hodnota tvrdosti u cementované oceli 14 220 byla dosažena metodou HR15N (89,38 HR15N). Nejmenší tvrdost vykazovala metoda HRC (67,92 HRC). Červeně označené hodnoty u měření metodou HR30N nebyly započítány v důsledku velké chyby (Tab. 17, Obr. 28).

## 9 OCEL 15 230

Ocel Cr - V k zušlechťování, povrchovému kalení a nitridování, je dána normou ČSN 41 5230. Používá se na velmi namáhané zušlechťované strojní části a na části nitridované, včetně nitridovaných ozubených kol. Vzhledem k velké prokalitelnosti použitelná i pro velké výrobky. Bezešvé trubky, velmi namáhané svařované konstrukce součástí strojů a letadel, např. klikové hřídele, hlavy vrtulí, ojnice, nápravy motorových vozidel apod. [2]

Tab. 18. Chemické složení oceli 15 230

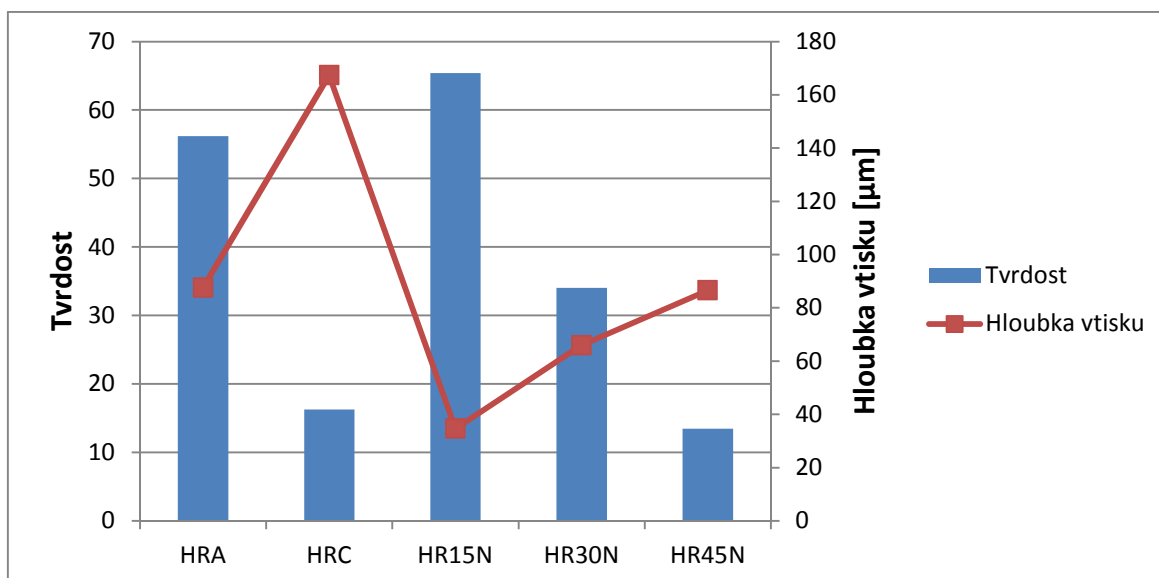
Chemické složení [hm %]						
C	Mn	Si	Cr	V	P	S
0,24-0,34	0,40-0,80	0,17-0,37	2,20-2,50	0,10-0,20	max. 0,035	max. 0,035

### 9.1 Nezpracovaná ocel 15 230

Tab. 19. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 15 230

Číslo měř.	HRA		HRC		HR15N		HR30N		HR45N	
	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
1	52,87	94,26	21,01	157,99	69,29	30,71	36,07	63,93	13,29	86,71
2	52,95	94,11	16,88	166,24	75,59	24,41	21,2	78,8	3,19	96,81
3	56,31	87,38	15,37	169,27	65,22	34,78	32,57	67,43	3,23	96,77
4	60,77	78,47	19,96	160,08	58,44	41,56	28,35	71,65	13,14	86,86
5	61,29	77,43	21,55	156,9	66,45	33,55	42,81	57,19	17,83	82,17
6	57,61	84,78	16,1	167,8	60,86	39,14	38,25	61,75	10,67	89,33
7	58,44	83,12	12,74	174,53	70,24	29,76	48,91	51,09	-2,46	102,46
8	57,73	84,54	17,48	165,05	54,13	45,87	22,85	77,15	24,65	75,35
9	56,88	86,24	11,25	177,51	58,15	41,85	36,26	63,74	17,5	82,5
10	47,24	105,53	10,51	178,99	75,4	24,6	32,99	67,01	17,54	82,46
$\bar{x}$	56,21	87,59	16,29	167,44	65,38	34,62	34,03	65,97	13,45	86,55
s	3,98	7,96	3,71	7,42	7,02	7,02	8,07	8,07	6,63	6,63

t - tvrdost, h - hloubka vtisku [ $\mu\text{m}$ ],  $\bar{x}$  - aritmetický průměr, s - směrodatná odchylka, červeně označené hodnoty jsou vyřazené hodnoty, se kterými se nepočítá v důsledku dosažení záporných hodnot.



Obr. 29. Porovnání tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 15 230 danými metodami

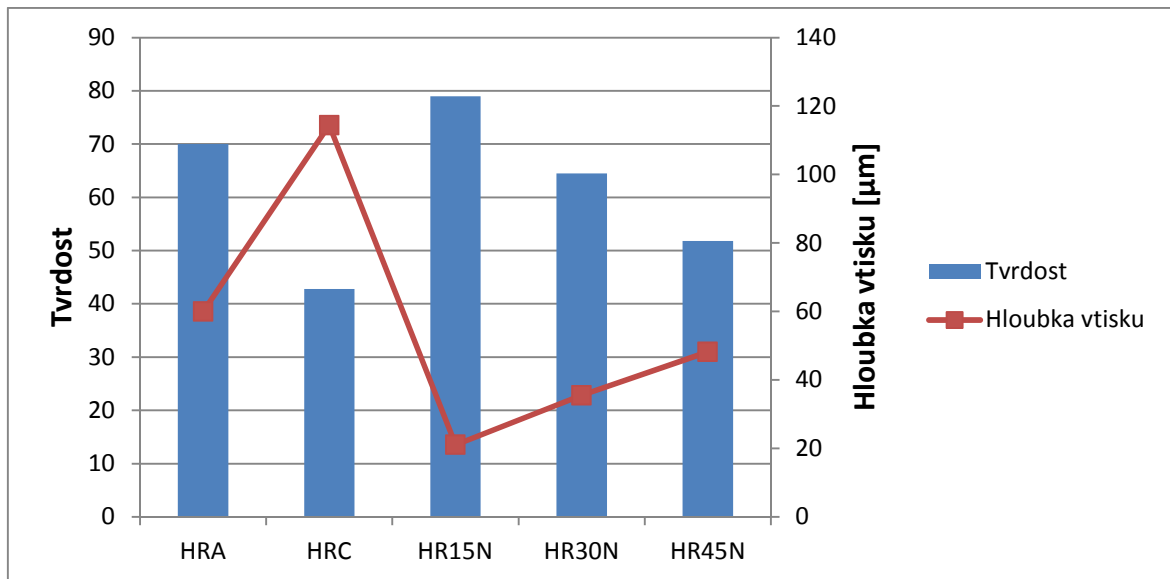
Z výsledků měření bylo zjištěno, že největší hodnota tvrdosti u nezpracované oceli 15 230 byla dosažena metodou HR15N (65,38 HR15N). Nejmenší tvrdost vykazovala metoda HR45N (13,45 HR45N). Červeně označené hodnoty u měření metodou HR45N nebyly započítány v důsledku záporné hodnoty (Tab. 19, Obr. 29).

## 9.2 Zušlechtěná ocel 15 230

Tab. 20. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku zušlechtěné oceli 15 230

Číslo měř.	HRA		HRC		HR15N		HR30N		HR45N	
	t	h	t	h	t	h	t	h	t	h
1	75,69	48,62	45,29	109,42	80,38	19,62	65,69	34,31	60,48	39,52
2	75,74	48,53	41,76	116,48	86,73	13,27	64,88	35,12	44,23	55,77
3	59,23	81,55	44,91	110,18	83,6	16,4	71,15	28,85	44,89	55,11
4	72,54	54,92	43,92	112,16	78,49	21,51	53,14	46,86	48,01	51,99
5	66,9	66,2	40,86	118,28	64,04	35,96	66,17	33,83	58,87	41,13
6	67,97	64,07	35,77	128,47	72,51	27,49	55,5	44,5	49,91	50,09
7	71,21	57,58	40,55	118,9	75,03	24,97	56,55	43,45	51,33	48,67
8	72,42	55,16	42,78	114,44	84,65	15,35	70,81	29,19	57,11	42,89
9	65,05	69,9	44,04	111,93	86,64	13,36	78,01	21,99	53,7	46,3
10	73,56	52,88	48,21	103,59	77,54	22,46	63,22	36,78	49,73	50,27
$\bar{x}$	70,03	59,94	42,81	114,39	78,96	21,04	64,51	35,49	51,83	48,17
s	4,96	9,92	3,19	6,39	6,76	6,76	7,39	7,39	5,33	5,33

t - tvrdost, h - hloubka vtisku [μm],  $\bar{x}$  - aritmetický průměr, s - směrodatná odchylka



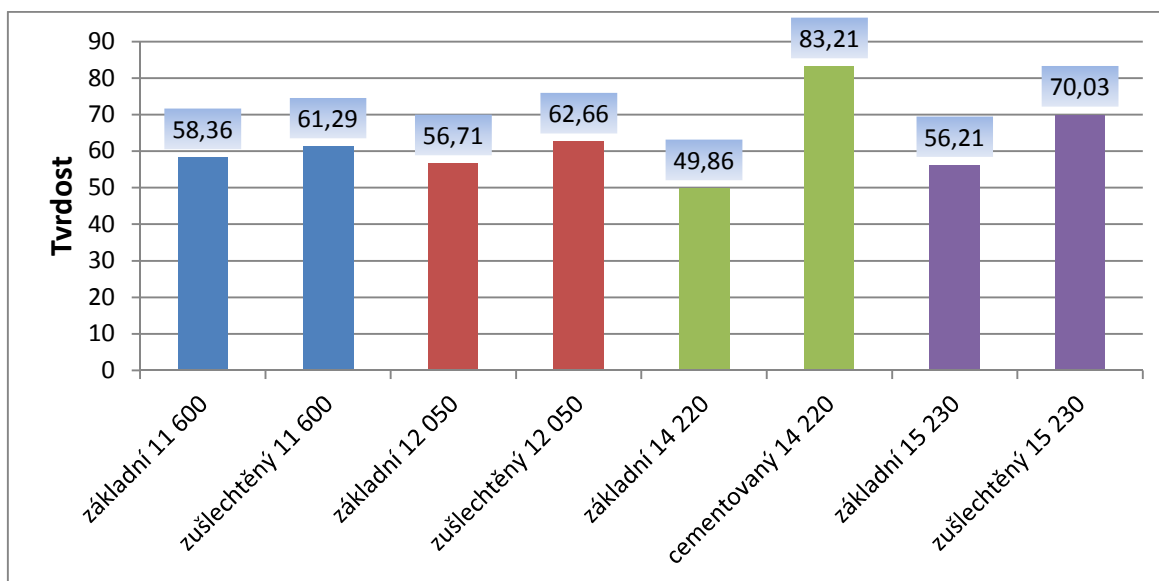
Obr. 30. Porovnání tvrdosti a hloubky vtisku zušlechtěné oceli 15 230 danými metodami

Z výsledků měření bylo zjištěno, že největší hodnota tvrdosti u zušlechtěné oceli 15 230 byla dosažena metodou HR15N (78,96 HR15N). Nejmenší tvrdost vykazovala metoda HRC (42,81 HRC) (Tab. 20, Obr. 30).

## 10 DISKUZE VÝSEDKŮ

Cílem praktické části bakalářské práce bylo měření tvrdosti vybraných druhů ocelí, které byly v základním stavu, tepelně a chemicko-tepelně modifikovány (zušlechťování, cementování). Pro měření tvrdosti vybraných typů ocelí (11 600, 12 050, 14 220, 15 230) byly použity metody měření tvrdosti HRA, HRC, HR15N, HR30N, HR45N. Naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

### 10.1 Metoda HRA

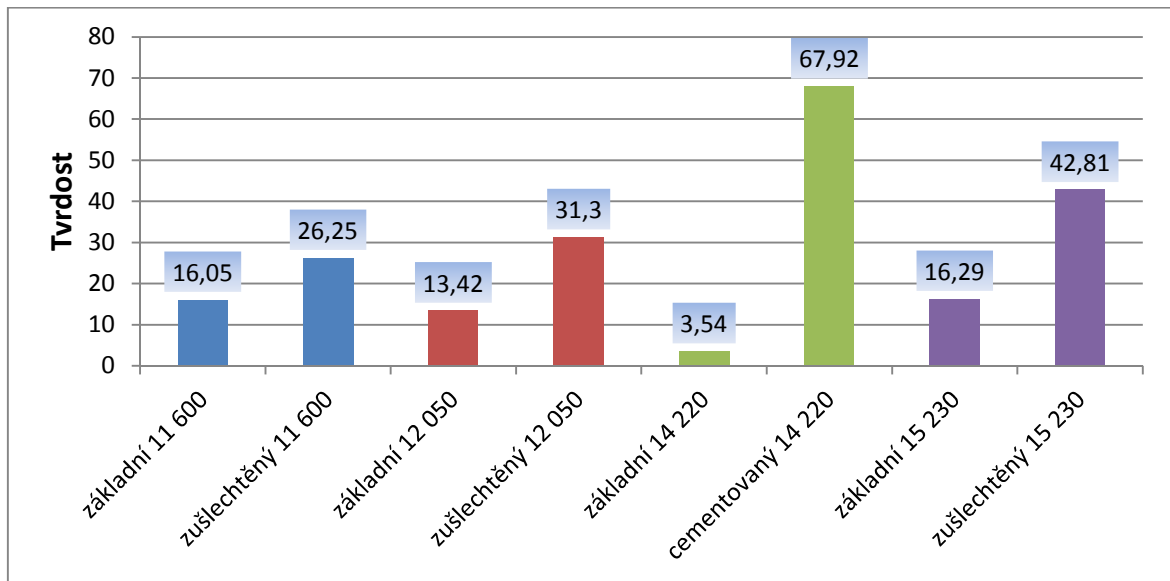


Obr. 31. Porovnání všech zkušebních vzorků metodou HRA

Z výsledků měření tvrdosti vyplynulo, že největší tvrdostí měřené metodou HRA bylo dosaženo u modifikované oceli 14 220, která byla chemicko-tepelně zpracována. Pokud se podíváme na oceli, které nebyly modifikovány, vykazují z hlediska tvrdosti velmi podobné hodnoty. Nejnižších hodnot tvrdosti měřené metodou HRA vykazuje ocel 14 220, která byla v základním stavu, tudíž nebyla tepelně ani chemicko-tepelně zpracována. Naopak nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u cementované oceli 14 220, kde bylo dosaženo tvrdosti 83,21 HRA. Vysoká hodnota tvrdosti je způsobena strukturou tvořenou martenzitem a austenitem zbytkovým. Druhá nejvyšší tvrdost byla zjištěna u zušlechtěné oceli 15 230, následované zušlechtěnými oceli 12 050 a 11 600. Jejich hodnoty tvrdosti odpovídají dosaženým strukturám při daném tepelném zpracování, které byly tvořeny bainitickou či martenzickou strukturou.



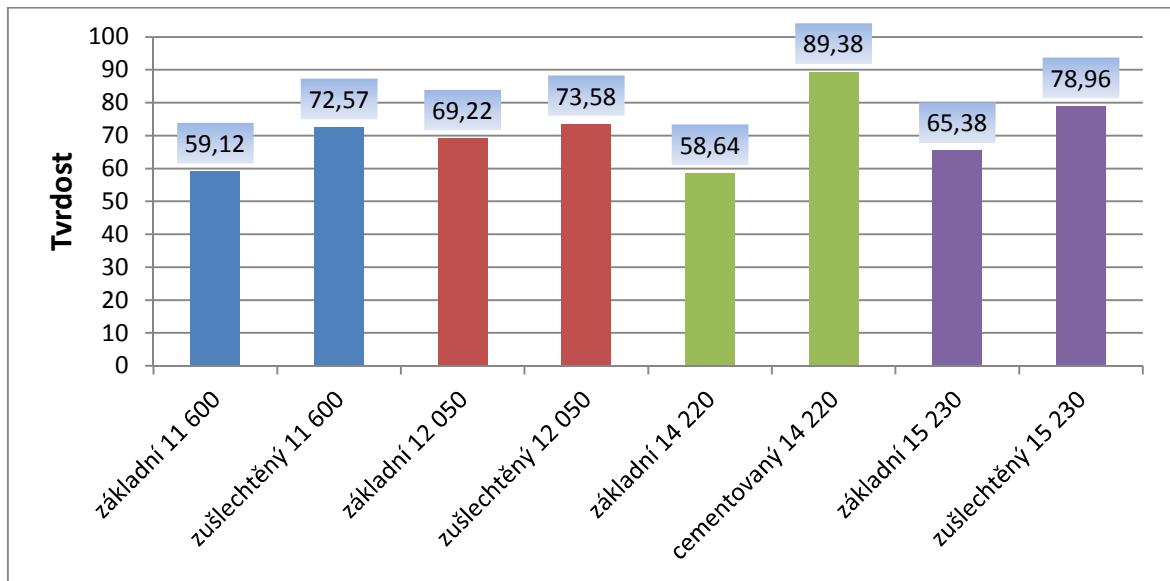
## 10.2 Metoda HRC



Obr. 32. Porovnání všech zkušebních vzorků metodou HRC

Z výsledků měření tvrdosti vyplynulo, že největší tvrdostí měřené metodou HRC bylo dosaženo u modifikované oceli 14 220, která byla chemicko-tepelně zpracována. Pokud se podíváme na oceli, které nebyly modifikovány, vykazují z hlediska tvrdosti velmi podobné hodnoty až na ocel 14 220, při které hodnoty tvrdosti vycházely velmi malé, a polovina naměřených hodnot vyšla v záporných číslech, které museli být vyřazeny. Nejnižších hodnot tvrdosti měřené metodou HRC vykazuje ocel 14 220, která byla v základním stavu, tudíž nebyla tepelně ani chemicko-tepelně zpracována. Naopak nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u cementované oceli 14 220, kde bylo dosaženo tvrdosti 67,92 HRC. Vysoká hodnota tvrdosti je způsobena strukturou tvořenou martenzitem a austenitem zbytkovým. Druhá nejvyšší tvrdost byla zjištěna u zušlechtěné oceli 15 230 následované zušlechtěnými ocelmi 12 050 a 11 600. Jejich hodnoty tvrdosti odpovídají dosaženým strukturám při daném tepelném zpracování, které byly tvořeny bainitickou či martenzitickou strukturou.

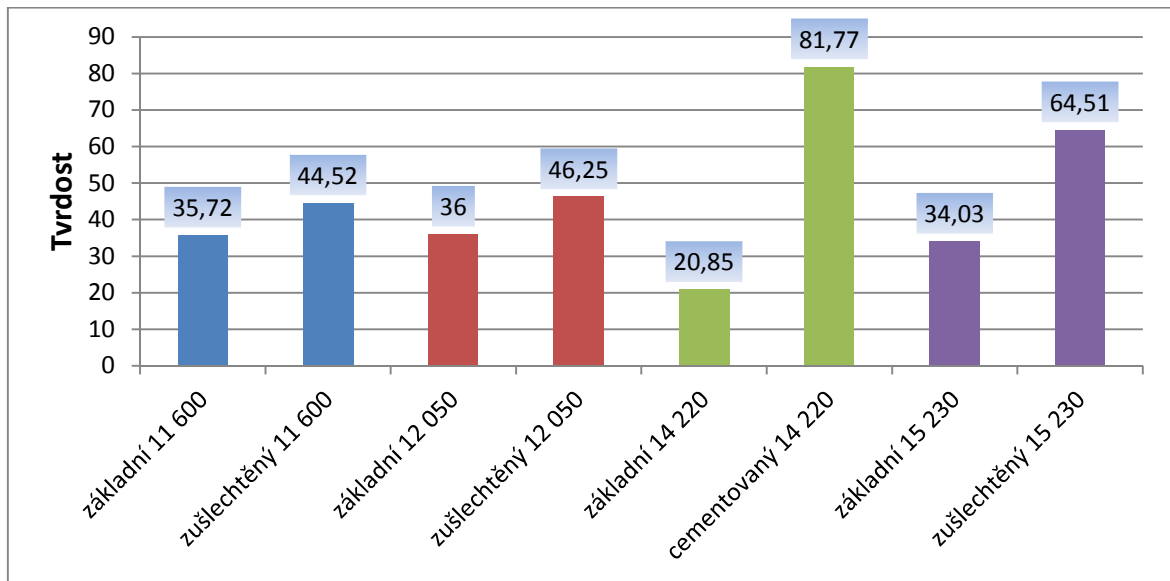
### 10.3 Metoda HR15N



Obr. 33. Porovnání všech zkušebních vzorků metodou HR15N

Z výsledků měření tvrdosti vyplynulo, že největší tvrdostí měřené metodou HR15N bylo dosaženo u modifikované oceli 14 220, která byla chemicko-tepelně zpracována. Pokud se podíváme na oceli, které nebyly modifikovány, vykazují z hlediska tvrdosti velmi podobné hodnoty ocel 11 600 s ocelí 14 220 a ocel 12 050 s ocelí 15 230. Nejnižších hodnot tvrdosti měřené metodou HR15N vykazuje ocel 14 220, která byla v základním stavu, tudíž nebyla tepelně ani chemicko-tepelně zpracována. Naopak nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u cementované oceli 14 220, kde bylo dosaženo tvrdosti 89,38 HR15N. Vysoká hodnota tvrdosti je způsobena strukturou tvořenou martenzitem a austenitem zbytkovým. Druhá nejvyšší tvrdost byla zjištěna u zušlechtěné oceli 15 230 následované zušlechtěnými ocelmi 12 050 a 11 600. Jejich hodnoty tvrdosti odpovídají dosaženým strukturám při daném tepelném zpracování, které byly tvořeny bainitickou či martenzitickou strukturou.

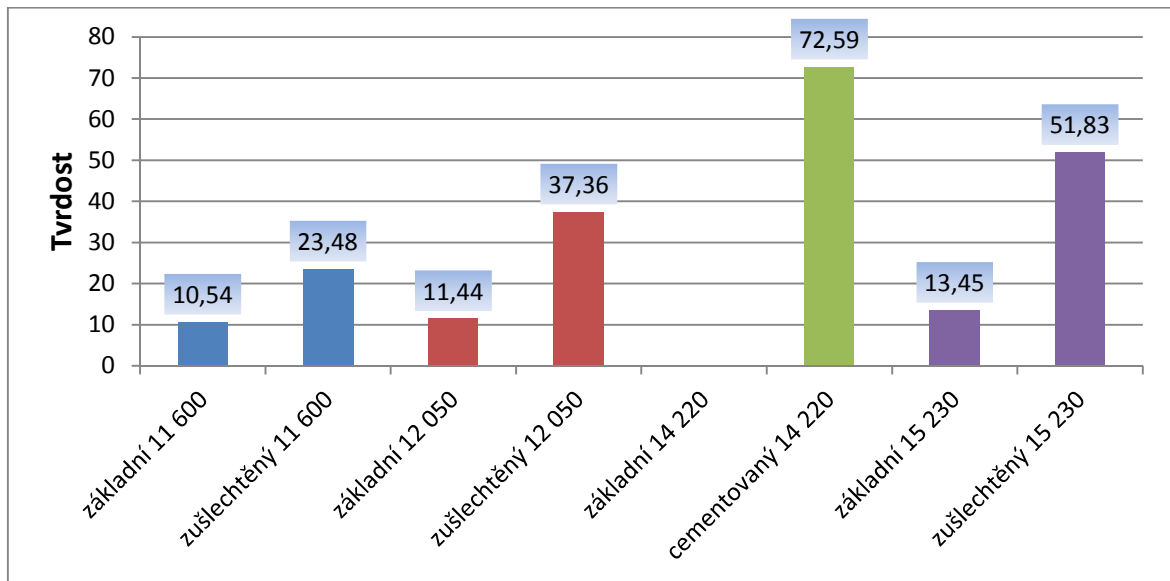
## 10.4 Metoda HR30N



Obr. 34. Porovnání všech zkušebních vzorků metodou HR30N

Z výsledků měření tvrdosti vyplynulo, že největší tvrdostí měřené metodou HR30N bylo dosaženo u modifikované oceli 14 220, která byla chemicko-tepelně zpracována. Pokud se podíváme na oceli, které nebyly modifikovány, vykazují z hlediska tvrdosti velmi podobné hodnoty až na ocel 14 220, která byla v porovnání s ostatními hodnotami tvrdosti významně menší. Nejnižších hodnot tvrdosti měřené metodou HR30N vykazuje ocel 14 220, která byla v základním stavu, tudíž nebyla tepelně ani chemicko-tepelně zpracována. Naopak nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u cementované oceli 14 220, kde bylo dosaženo tvrdosti 81,77 HR30N. Vysoká hodnota tvrdosti je způsobena strukturou tvořenou austenitem, martenzitem a austenitem zbytkovým. Druhá nejvyšší tvrdost byla zjištěna u zušlechťené oceli 15 230 následované zušlechťenými ocelmi 12 050 a 11 600. Jejich hodnoty tvrdosti odpovídají dosaženým strukturám při daném tepelném zpracování, které byly tvořeny bainitickou či martenzitickou strukturou.

## 10.5 Metoda HR45N



Obr. 35. Porovnání všech zkušebních vzorků metodou HR45N

Z výsledků měření tvrdosti vyplynulo, že největší tvrdostí měřené metodou HR45N bylo dosaženo u modifikované oceli 14 220, která byla chemicko-tepelně zpracována. Pokud se podíváme na oceli, které nebyly modifikovány, vykazují z hlediska tvrdosti velmi podobné hodnoty až na ocel 14 220, u které vycházela tvrdost v záporných číslech a tudíž byla tato metoda měření tvrdosti vyřazena. Nejnižších hodnot tvrdosti měřené metodou HR45N vykazuje ocel 11 600, která byla v základním stavu, tudíž nebyla tepelně ani chemicko-tepelně zpracována. Naopak nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u cementované oceli 14 220, kde bylo dosaženo tvrdosti 72,59 HR45N. Vysoká hodnota tvrdosti je způsobena strukturou tvořenou martenzitem a austenitem zbytkovým. Druhá nejvyšší tvrdost byla zjištěna u zušlechtěné oceli 15 230 následované zušlechtěnými ocelmi 12 050 a 11 600. Jejich hodnoty tvrdosti odpovídají dosaženým strukturám při daném tepelném zpracování, které byly tvořeny bainitickou či martenzitickou strukturou.

## ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce řeší problém měření tvrdosti ocelí, které byly tepelně a chemicko tepelně modifikovány. Použité byly oceli 11 600, 12 050, 15 230 a 14 220. Měření tvrdosti bylo realizováno zkouškami Rockwell a to metodami HRA, HRC, HR15N, HR30N a HR45N. Testované zkušební vzorky byly kaleny a popuštěny, cementovány.

Z naměřených výsledků vyplynulo, že největší tvrdost byla zjištěna u oceli, která byly chemicko-tepelně zpracována a byla cementována. Jednalo se o ocel 14 220. Materiály s druhou největší hodnotou tvrdosti byly zušlechtěny (15 230). Nejmenší hodnota tvrdosti byla zjištěna u tepelně zpracované oceli 11 600.

U základních materiálů se naměřené hodnoty tvrdosti lišily s ohledem na použitou metodu měření tvrdosti. U metod HR30N a HR15N byly největší hodnoty tvrdosti zjištěny u materiálu 12 050. U metody HRA to byla ocel 11 600 a u metody HRC a HR45N to byla ocel 15 230.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1. 3.*, přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 266 s. ISBN 80-718-3262-6.
- [2] LEINVEBER, Jan. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 3. dopl. vyd.* Úvaly: ALBRA, 2006, xiv, 914 s. ISBN 80-736-1033-7.
- [3] LUKOVICS, Imrich. *Konstrukční materiály a technologie. 1. vyd.* Brno: VUT, 1992, 273 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0399-3.
- [4] PÍŠEK, František. *Nauka o Materiálu II.: 1. svazek.* Praha: Československé akademie věd, 1959.
- [5] PLUHAŘ, Jaroslav, Josef KORITA a KOL. *Strojírenské materiály: Druhé přepracované vydání.* Praha: Nakladatelství technické literatury, 1977.
- [6] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech. 4. vyd.* V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-807-0432-440.
- [7] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů. 4. vyd.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 175 s. ISBN 80-704-3417-1.
- [8] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy. Vyd. 1.* V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010, 204 s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [9] *Ateam.zcu.cz* [online]. 2005 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)
- [10] Converter. [online]. © 2002 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrlost-shore.htm>
- [11] Jemná mechanika a optika. [online]. [2007] [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://jmo.fzu.cz/2007/Jmo-07-08/JMO-200707-08.pdf>
- [12] Metrotest s. r. o. Kladno. [online]. 22.11.2010 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: [http://www.metrotest.cz/files/zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrlosti.pdf)
- [13] Měření tvrdosti. [online]. 2005-2011 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://www.merenitvrlosti.cz/>
- [14] Missouri university of science and technology. [online]. © 1997-2013 [cit. 2013-01-19]. Dostupné z: <http://classes.mst.edu/ide120/lessons/hardness/equipment/scleroscope/index.html>
- [15] NOVOTNÝ, Tomáš. Studium mechanických vlastností tenkých vrstev. *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: [http://is.muni.cz/th/211366/prif\\_m/Novotny\\_Diplomova\\_prace.txt](http://is.muni.cz/th/211366/prif_m/Novotny_Diplomova_prace.txt)

- [16] PCE Instruments. [online]. © 18.12.2012 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://www.warensortiment.de/technische-daten/baumann-hammer-pce-hbx-05.htm>
- [17] PROMINENT, spol. s.r.o. Kroměříž. [online]. © 2007-2013 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: [http://www.prominent-km.cz/fa\\_proceq/pdf/EQUOTIP3.pdf](http://www.prominent-km.cz/fa_proceq/pdf/EQUOTIP3.pdf)
- [18] Quido. [online]. © 2005 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://www.quido.cz/mereni/brinell.htm>
- [19] STROJÍRNY POLDI. [online]. [cit. 2013-01-18]. Dostupné z: <http://www.strojpoli.cz/web-galerie-soubory/Historie/HISTORIE%20STROJ%C3%8DREN%20POLDI.pdf>
- [20] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. [online]. © 2013 [cit. 2013-01-18]. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Vysledky.aspx>
- [21] Výrobní stroje, s.r.o. [online]. [© 2009-2013] [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://www.vyrobnistroje.cz/cz/Default.aspx>
- [22] Vysoké učení technické v Brně. [online]. [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/index.htm>
- [23] Vysoké učení technické v Brně. MOLLIKOVÁ, Eva. [online]. 2005 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/Index.html>
- [24] VŠB- Technická univerzita Ostrava. [online]. © 2008 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/Vyuka/2008tvrlosti.pdf>
- [25] Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. [online]. 2.12.2008 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: [http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_metalografie\\_1/teorie.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

F	zkušební zatížení [N]
F <sub>0</sub>	předběžné zatížení [N]
F <sub>1</sub>	přídavné zatížení [N]
D	průměr kuličky [mm]
d	aritmetický průměr vtisku [mm]
A	povrch vtisku [mm <sup>2</sup> ]
u	aritmetický průměr vtisku [mm]
N	číslo charakterizující stupnici
h	trvalá hloubka vtisku pod předběžným zkušebním zatížením po odstranění přídavného zkušebního zatížení (trvalá hloubka vtisku) [mm]
S	jednotka stupnice charakterizující stupnici [mm]
A	povrch vytlačovaného důlku [mm <sup>2</sup> ]
L	délka delší úhlopříčky [mm]
R <sub>m</sub>	skutečná pevnost porovnávací tyčinky [MPa]
Cu	měď
Sn	cín
Pb	olovo
Al	hliník
HB	tvrdosti podle Brinella
HV	tvrdost podle Vickerse
HR	tvrdost podle Rockwella
HL	tvrdost podle Leeba
HK	tvrdost podle Knoopu
k	konstanta
g	tíhové zrychlení na Zemi



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Martensův přístroj k vrypové zkoušce tvrdosti [4]</i> .....	15
<i>Obr. 2. Princip zkoušky tvrdosti podle Brinella [1]</i> .....	17
<i>Obr. 3. Tvrdoměr Brinell 3000 LDB BASIC [13]</i> .....	17
<i>Obr. 4. Princip zkouška tvrdosti podle Vickerse [1]</i> .....	20
<i>Obr. 5. Digitální tvrdoměr Vickers 50 kg [21]</i> .....	20
<i>Obr. 6. Princip zkoušky tvrdosti podle Rockwella [1]</i> .....	23
<i>Obr. 7. Digitální dotykový tvrdoměr Rockwell 655 [13]</i> .....	23
<i>Obr. 8. Hrot vnikacího tělesa u zkoušek mikrotvrdosti</i> .....	27
<i>Obr. 9. Stolní tvrdoměr Micro - Vickers a Knoop 412A/ 413A [13]</i> .....	27
<i>Obr. 10. a) Tvar diamantového jehlanu podle Knoopa, b) Vzhled vtisku</i> .....	29
<i>Obr. 11. Hrot vnikacího tělesa u zkoušek mikrotvrdosti</i> .....	29
<i>Obr. 12. Schéma tří způsobů vtiskování kuličky do zkoušeného předmětu rázem [4];</i> .....	32
<i>Obr. 13. Řez Baumannovým kladivem [4]</i> .....	33
<i>Obr. 14. Baumannovo kladivo (kulička 10mm) a lupa [16]</i> .....	33
<i>Obr. 15. Řez kladívkem Poldi [1]</i> .....	34
<i>Obr. 16. Kladívko Poldi a lupa [21]</i> .....	34
<i>Obr. 17. Schéma Shoreho skleroskopu [23]</i> .....	36
<i>Obr. 18. Shoreho skleroskop</i> .....	36
<i>Obr. 19. Schéma měření tvrdosti durokopem [23]</i> .....	37
<i>Obr. 20. Přenosný tvrdoměr EQUOTIP 3 PROCEQ SA [17]</i> .....	37
<i>Obr. 21. Provádění zkoušky tvrdosti měřícím přístrojem EQUOTIP [17]</i> .....	38
<i>Obr. 22. Schéma metody</i> .....	41
<i>Obr. 23. Porovnání tvrdost a hloubky vtisku nezpracované oceli 11 600 danými metodami</i> .....	45
<i>Obr. 24. Porovnání tvrdost a hloubky vtisku zušlechtěné oceli 11 600 danými metodami</i> .....	46
<i>Obr. 25. Porovnání tvrdost a hloubky vtisku nezpracované oceli 12 050 danými metodami</i> .....	48
<i>Obr. 26. Porovnání tvrdost a hloubky vtisku zušlechtěné oceli 12 050 danými metodami</i> .....	49
<i>Obr. 27. Porovnání tvrdost a hloubky vtisku nezpracované oceli 14 220 danými metodami</i> .....	51

<i>Obr. 28. Porovnání tvrdost a hloubky vtisku cementované oceli 14 220 danými metodami .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 29. Porovnání tvrdost a hloubky vtisku nezpracované oceli 15 230 danými metodami .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 30. Porovnání tvrdost a hloubky vtisku zušlechtěné oceli 15 230 danými metodami .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 31. Porovnání všech zkušebních vzorků metodou HRA .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 32. Porovnání všech zkušebních vzorků metodou HRC .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 33. Porovnání všech zkušebních vzorků metodou HR15N .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 34. Porovnání všech zkušebních vzorků metodou HR30N .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 35. Porovnání všech zkušebních vzorků metodou HR45N .....</i>	<i>60</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Rozdělení zkoušek tvrdosti [7] .....</i>	13
<i>Tab. 2. Mohsova stupnice tvrdosti a tvrdost mat. užívaných ve strojírenství podle Mohsovy stupnice [4].....</i>	14
<i>Tab. 3. Vztah průměru a zatěžující síly u metody Brinell [12] .....</i>	19
<i>Tab. 4. Volba poměru <math>0,102 F / D^2</math> pro různé materiály [12] .....</i>	19
<i>Tab. 5. Zkušební zatížení při zkoušce tvrdosti metodou Vickers [24].....</i>	22
<i>Tab. 6. Zkoušky tvrdosti podle Rockwella - stupnice a rozsahy použití [24].....</i>	25
<i>Tab. 7. Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti podle Knoop [22].....</i>	30
<i>Tab. 8. Použité normy .....</i>	40
<i>Tab. 9. Chemické složení oceli 11 600.....</i>	44
<i>Tab. 10. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 11 600.....</i>	44
<i>Tab. 11. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku zušlechtné oceli 11 600 .....</i>	45
<i>Tab. 12. Chemické složení oceli 12 050.....</i>	47
<i>Tab. 13. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 12 050.....</i>	47
<i>Tab. 14. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku zušlechtné oceli 12 050 .....</i>	48
<i>Tab. 15. Chemické složení oceli 14 220.....</i>	50
<i>Tab. 16. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 14 220.....</i>	50
<i>Tab. 17. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku cementované oceli 14 220 .....</i>	51
<i>Tab. 18. Chemické složení oceli 15 230.....</i>	53
<i>Tab. 19. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku nezpracované oceli 15 230.....</i>	53
<i>Tab. 20. Naměřené hodnoty tvrdosti a hloubky vtisku zušlechtné oceli 15 230 .....</i>	54