

# Měření tvrdosti kovů

Luboš Ošťádal

---

Bakalářská práce  
2008

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2007/2008

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Luboš OŠŤÁDAL**  
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Téma práce: **Měření tvrdosti kovů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše na dané téma
2. Příprava vzorků pro zkoušky tvrdosti
3. Provedení zkoušek tvrdosti
4. Vyhodnocení výsledků měření

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle zadání vedoucího BP**

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

Datum zadání bakalářské práce: **19. února 2008**

Termín odevzdání bakalářské práce: **6. června 2008**

Ve Zlíně dne 31. ledna 2008

doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



*Miroslav Mañas*  
doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Úkolem této bakalářské práce je pomocí zkoušek tvrdosti určit tvrdost kovových materiálů s různým tepelným a chemicko-tepelným zpracováním. V teoretické části pomocí literárních zdrojů seznamuji s vývojem a druhy zkoušek tvrdosti. V praktické části aplikuji vybrané metody na vyhodnocení tvrdosti jednotlivých vzorků a jejich srovnání.

Klíčová slova:

Brinell, Rockwell, Vickers, tvrdost, hloubka vtisku, délka úhlopříček, indentor

## **ABSTRACT**

The task of this bachelor labour is by the way of hardness test, establishing the hardness of metallic materials with different thermal and chemical-thermal processing. In the theoretical part with the help of literature sources to introduce with development and tests of hardnesses. In the practical part I will apply the assortment of samples at the results of hardness test of different materials and its confrontation.

Keywords:

Brinell, Rockwell, Vickers, hardness, depth dinge, quantity of diagonal, indertor

Na úvod této bakalářské práce bych velice rád poděkoval za pomoc a odborné vedení panu Ing. Davidovi Maňasovi Ph.D. Za trpělivost, cenné rady a ochotu, s kterou se mi věnoval, aby mi dopomohl práci zdokonalit a přivést k úspěšnému konci.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>9</b>
<b>1 VNIKACÍ ZKOUŠKY TRVDOSTI</b> .....	<b>11</b>
1.1 HISTORIE VÝVOJE VNIKACÍCH ZKOUŠEK .....	12
1.2 METODA BRINELL .....	12
1.2.1 Podstata zkoušky .....	13
1.2.2 Provedení zkoušky .....	14
1.2.3 Vnikací tělesa a zkušební síly .....	16
1.2.4 Zkušební tělesa (vzorky) .....	17
1.2.5 Zápis hodnoty tvrdostí.....	18
1.2.6 Přesnost výsledků zkoušky.....	18
1.2.7 Modifikovaná metoda měření tvrdosti HBT .....	19
1.3 LUDWIKOVA ZKOUŠKA .....	19
1.4 ROCKWELLOVA ZKOUŠKA .....	20
1.4.1 Podstata zkoušky .....	20
1.4.2 Provedení zkoušky .....	21
1.4.3 Vnikací tělesa a zkušební síly .....	23
1.4.4 Zkušební tělesa (vzorky) .....	24
1.4.5 Zápis hodnoty tvrdosti.....	24
1.4.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Rockwell .....	24
1.5 VICKERSOVA ZKOUŠKA .....	25
1.5.1 Podstata zkoušky .....	25
1.5.2 Provedení zkoušky .....	26
1.5.3 Vnikací tělesa zkušební síly .....	27
1.5.4 Zkušební tělesa (vzorky) .....	28
1.5.5 Zápis hodnoty tvrdosti.....	28
1.5.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Vickers .....	29
1.6 NĚKTERÉ DALŠÍ METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	29
1.6.1 Knoopova zkouška .....	29
1.6.2 Bierkovičova zkouška .....	30
1.6.3 Zkouška mikrotvrdosti .....	31
1.6.3.1 Nanoindentační zjištění mechanických hodnot.....	32
1.6.4 Univerzální tvrdost.....	33
1.6.4.1 Postata zkoušky.....	33
1.6.4.2 Příklady značení.....	34
1.7 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY VNIKACÍ .....	34
1.7.1 Tvrdoměr Poldi .....	35
1.7.2 Baumanovo kladívko.....	37
<b>2 ZKOUŠKY ODRAZOVÉ</b> .....	<b>38</b>

2.1	SHOREHO METODA (SHOREHO SKLEROSKOP) .....	38
2.2	DUROSKOP .....	40
2.3	TVRDOMĚR EQUOTYP.....	40
<b>3</b>	<b>ZKOUŠKY VRYPOVÉ .....</b>	<b>41</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>44</b>
4.1	URČOVÁNÍ TVRDOSTI .....	44
4.2	POSTUP MĚŘENÍ PŘI ZKOUŠCE PODLE ROCKWELLA HRC, HR45N.....	46
4.3	POSTUP MĚŘENÍ PŘI ZKOUŠCE PODLE VICKERSE HV30.....	47
<b>5</b>	<b>ZÁKLADNÍ MATERIÁL OCEL 14 220.....</b>	<b>49</b>
5.1	VYHODNOCENÍ TVRDOSTI ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU OCEL 14 220 .....	49
5.1.1	Měření podle Rockwella HRC, HR45N.....	49
5.1.2	Měření podle Vickerse HV30 .....	51
<b>6</b>	<b>TEPELNĚ ZPRACOVANÁ OCEL 14220 - ZUŠLECHTĚNA .....</b>	<b>53</b>
6.1	VYHODNOCENÍ TVRDOSTI ZUŠLECHTĚNÉHO VZORKU .....	54
6.1.1	Měření podle Rockwella HRC, HR45N.....	54
6.1.2	Měření podle Vickerse HV30 .....	56
<b>7</b>	<b>POVRCHOVĚ KÁLENÁ OCEL.....</b>	<b>58</b>
7.1	VYHODNOCENÍ TVRDOSTI POVRCHOVĚ KALENÉHO VZORKU.....	59
7.1.1	Měření podle Rockwella HRC, HR45N.....	59
7.1.2	Měření podle Vickerse HV30 .....	62
<b>8</b>	<b>NITRIDOVANÁ OCEL.....</b>	<b>63</b>
8.1	VYHODNOCENÍ TVRDOSTI.....	64
8.1.1	Měření podle Rockwella HRC, HR45N.....	64
8.1.2	Měření podle Vickerse HV30 .....	66
<b>9</b>	<b>CEMENTOVANÁ A KALENÁ OCEL .....</b>	<b>68</b>
9.1	VYHODNOCENÍ TVRDOSTI.....	69
9.1.1	Měření podle Rockwella HRC, HR45N.....	69
9.1.2	Měření podle Vickerse HV30 .....	71
<b>10</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>73</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>78</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>80</b>

## ÚVOD

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

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



# **I. TEORETICKÁ ČÁST**

Zkoušky tvrdosti patří mezi nejstarší zkoušky kovů a jiných technických materiálů. Ve srovnání s ostatními mechanickými zkouškami jsou rychlé a jednoduché. Jedná se prakticky o zkoušky nedestruktivní, neboť funkční a vzhledové porušení zkoušených dílů je většinou bezvýznamné a z toho plyne výhoda zkoušet hotové výrobky bez jejich destrukce nebo znehodnocení. Proto patří zkoušky tvrdosti mezi provozně i laboratorně nejvíce užívané mechanické zkoušky.[3,10]

*„Tvrdost je obecně definována jako vlastnost, jež se projevuje odporem proti pružné, nebo plastické deformaci tělesa, nebo oddělování části povrchu, nebo jejich kombinaci.“*[10]  
Posuzujeme ji podle velikosti stopy, která vznikla vtlačováním tělesa vhodného tvaru a z dostatečně tvrdého materiálu do zkoušeného vzorku určitou silou za definovaných podmínek. [2]

Podle charakteru zátěžné síly členíme zkoušky na:

- 1) Statické – indenter se vtlačuje klidnou silou ve směru kolmém ke zkoušenému povrchu. Tyto zkoušky jsou označovány jako „zkoušky vnikací“. Jsou nejčastější pro svoji přesnost, jednoduchost a dobrou reprodukovatelnost.
- 2) Dynamické – indenter proniká do zkoumaného povrchu rázem vedeným kolmo – tzv. „rázové zkoušky“

Další dělení:

- 1) Vrypové - porušení je dosaženo pohybem ostrého nástroje rovnoběžně s povrchem zkoušeného kovu tak, aby se vytvořil vryp. Tento způsob zatížení se volí u křehkých materiálů, zvláště u minerálů.
- 2) Vnikací (vtisková)
- 3) Odrazové
- 4) Kyvadlové

*„Přesné porovnávání hodnot tvrdosti je možné pouze při použití stejné metody a stejného zkušebního zařízení. Hodnoty tvrdosti zjištěné jednou metodou nelze obecně převádět na jiné stupnice tvrdosti nebo pevnost v tahu. Takových převodů je třeba se vyvarovat s výjimkou takových případů, kdy jsou k dispozici podklady pro přepočet z porovnávacích zkoušek.“* [10]

# 1 VNIKACÍ ZKOUŠKY TRVDOSTI

Tyto zkoušky jsou nejrozšířenější a nejdůležitější. Vtisk se vytváří pozvolným vtlačováním příslušného vnikacího tělesa plynule se zvětšující se silou. Všeobecného rozšíření dosáhly statické vnikací metody, u kterých je měřítkem tvrdosti velikost plastické deformace nebo metody, u kterých je měřítkem tvrdosti velikost elasticko plastické deformace. [3,10]

*„Tvrdost je u vnikacích metod definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa.“ [7]*

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

Rozhodujícími činiteli jsou hlavně:

- a) Tvar krystalových elementů
- b) Jemnost krystalizace - jemnozrná struktura má v objemu více krystalografických rozhraní, které více odolávají vnikání cizích těles a z toho důvodu vykazuje jemnozrná struktura větší tvrdost
- c) Teplota – čím větší teplota, tím se vlivem roztahování stávají vazby méně pevné a kov je měkčí. Teplotu je nutno uvažovat relativně s ohledem na bod tání (kovy s nízkým bodem tání jsou při stejné krystalizaci za normální teploty měkčí než kovy tající při vysoké teplotě)
- d) Cizí příměsi – všechny příměsi snižují plasticitu kovu, a tím zvětšují jeho tvrdost
- e) Vnitřní pnutí – tvrdost zvětšují různá pnutí, způsobena např. tvářením za studena. tepelná pnutí od nestejného ochlazování, pnutí způsobena nestabilními fázemi atd.[7]

Vnikací tělesa jsou obvykle jednoduchého geometrického tvaru (koule, kužel, jehlan), nebo tvaru, který se těmto tvarům přibližuje – např. kužel s malým zaoblením vrcholu u některých metod Rockwell. Zvolením těchto tvarů se sledovala jednoduchost a reprodukovatelnost jejich výroby, optimální využití vlastností materiálu vnikacího tělesa (např. tvar vnikacího tělesa Vickers respektuje tvar krystalu diamantu a tak i jeho maximální tvrdost). Volbou tvaru kužele a jehlanu (pyramidy) se sledovala možnost stanovování tvrdosti nezá-

vislé na velikosti použité zkušební síly (podobnost vtisků). Tvrдост u vnikacích metod je definována jako poměr mezi použitým zatížením a plochou vtisku (metody Brinell, Vickers), nebo poměrem mezi použitým zatížením a plochou průmětu vtisku (Knoop). U metod Rockwell je tvrдост určována přímo z trvalé hloubky vtisku. [10]

## 1.1 Historie vývoje vnikacích zkoušek

*Kirsch* (1981) navrhl zatlačování válcového indentoru zvětšující se silou až do okamžiku, kdy se objevil první trvalý vtisk. Příslušné tlakové napětí bylo mírou tvrдостi. Protože bylo skutečné zjištění tohoto napětí spojeno s jistými nepřesnostmi, bylo doporučeno čelní plochu bombírovat velkým poloměrem. Další vývoj směřoval ke zjištění souvislosti mezi tvrдостí a mezi kluzu. Z tohoto důvodu bylo prováděno např. několikastupňové zatěžování kuličkou ve stejném místě, přičemž po zatížení bylo provedeno rekrystalizační žhání. Tento cyklus se opakoval, dokud se vtisk již více nezvětšoval. Z dosaženého rozměru vtisku pak byla určena tvrдост – *Hanriot* 1912. Na začátku 20. století byla vyvinuta celá řada podobných metod, které však pro svoji zdlouhavost, ale i nepřesnost nenašli uplatnění.

Podle požadavků praxe se rozšířilo několik druhů vnikacích zkoušek, které se od sebe liší tvarem a materiálem indentoru, velikostí zatížení a způsobem vyhodnocení. Uvedeny budou chronologicky podle pořadí vzniku. [7]

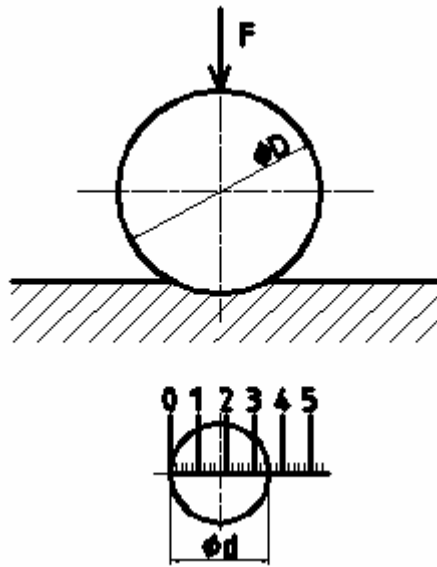
*„Zkušební metody byly vytvořeny v době, kdy se jako zákonná jednotka síly používal kilogram, resp. kilopond. Odtud pramení většinou celočíselná zkušební zatížení (např. 1, 5, 10, 30 kp pro metody Vickers, 60, 100 a 150 kp pro metody Rockwell, nebo 250, 750 a 3000 kp pro některé metody Brinell). Po zavedení soustavy SI, která používá jako zákonnou jednotku pro sílu 1Newton (1kp = 9,80665N) bylo nutno síly přepočítat na nové jednotky. Proto jsou dnes zkušební síly definovány čísly s několika desetinnými místy. Naopak změna zatížení na celočíselné hodnoty by bývala znamenala změnu všech stupnic tvrдостi, úpravy tvrdoměrů, výměnu všech etalonů tvrдостi a tvrdoměrných destiček i změny výrobní dokumentace.“* [10]

## 1.2 Metoda Brinell

V roce 1900 na druhém mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálu v Paříži poprvé předvedl švédský inženýr Brinell svoji metodu určování tvrдостi, která se velmi rychle rozšířila a je dnes ve všech průmyslových státech normována (ČSN 42 0371).[12]

### 1.2.1 Podstata zkoušky

Zkouška spočívá v zatlačování určitou silou vnikací tělísko (ocelové kuličky nebo kuličky z tvrdokovu o průměru  $D$ ) do povrchu vzorku. Tvrdost se vyjadřuje poměrem zatížení k ploše kulovitého vtisku. Ocelová kulička se používá pro materiály s tvrdostí podle Brinella ne vyšší než 450 HB. Kulička z tvrdokovu se používá pro materiály s tvrdostí podle Brinella ne vyšší než 650 HB. Hodnoty tvrdosti získané použitím ocelové kuličky a kuličky z tvrdokovu se podstatně liší při tvrdostech nad 350 HB. [3,10]



Obr. 1. Zkouška dle Brinella [7]

Tvrdost podle Brinella HBS, nebo HBW je dána vztahem:

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

F zkušební síla [ N ]

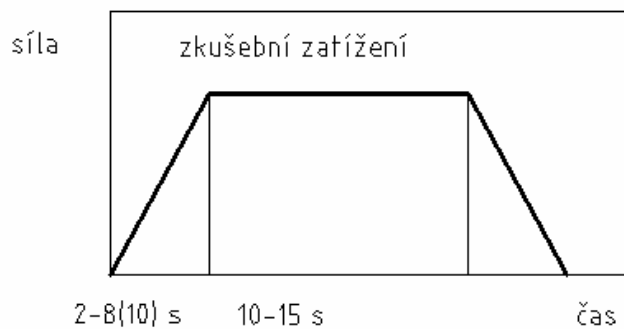
d průměr vtisku v [mm]

D průměr kuličky [mm]

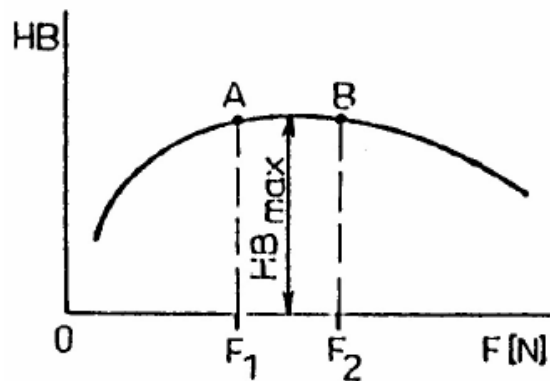
koeficient  $0,102 = 1/9,80665$

### 1.2.2 Provedení zkoušky

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



Obr.2. Průběh zkušebního zatížení – metoda Brinell [10]



Obr. 3. Závislost tvrdosti HB na velikosti zátěžné síly [9]

- vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek vtisku (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a minimálně 3 násobek průměru vtisky při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin
- vzdálenost středů dvou sousedících vtisků musí být nejméně 4 násobek průměru vtisku (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a minimálně 6 násobek průměru vtisku při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin
- po zkoušce se změří průměr každého vtisku ve dvou na sebe kolmých směrech. Pro stanovení tvrdosti se průměrná hodnota velikosti vtisku [10]

Měření průměru je pomocí měřicího mikroskopu, tzv. Brinellovy lupy, možné až na setiny mm, kdežto přesné změření hloubky je mnohem obtížnější. Při sériových zkouškách je měření mikroskopem zdlouhavé, proto jsou tvrdoměry konstruovány tak, že lze tuto hloubku odečíst přímo na přístroji. S ohledem na možnost vytvoření valu v okolí vtisku je tento postup vhodný pouze při poměrném stanovování tvrdosti. Pro přesné určení hodnoty tvrdosti je třeba vycházet z průměru vtisku.

Zkušební podmínky je nutno dodržovat z důvodu srovnatelnosti naměřených výsledků. Na výsledek má vliv zejména velikost zatížení, které se volí s ohledem na průměr použité kuličky a měřený materiál (tab.1). [7]

### 1.2.3 Vnikací tělesa a zkušební síly

Pro zkoušky tvrdosti podle Brinella se používají ocelové nebo tvrdokovové kuličky průměrů (v mm), zkušební síly uvedené v následující tabulce. Pro úplnost jsou uvedeny též síly v původních, dnes neplatných jednotkách kp: [10]

S ohledem na materiál kuličky, na její poloměr a zátěžovou sílu je Brinellova zkouška vhodná pouze pro měkké a heterogenní materiály např. neželezné kovy, šedé litiny apod.[7]

Tab. 1. Vztah průměru kuličky a zatěžující síly u metody Brinell [10]

Průměr kuličky [mm]		10	5	2,5	2	1
zkušební síla		Poměr $0,102F/D^2$				
N	(kp)					
29 400	3 000	30				
14 710	1 500	15				
9 807	1 000	10				
7 355	750		30			
4 903	500	5				
2 452	250	2,5	10			
1 839	187,5			30		
1 226	125	1,25	5			
1 177	120				30	
980,7	100	1				
612,9	62,5		2,5	10		
392,3	40				10	
294,2	30					30
306,5	31,25		1,25	5		
245,2	25		1			
196,1	20				5	
153,2	15,625			2,5		
98,07	10				2,5	10
76,61	7,8125			1,25		
61,29	6,25			1		
49,03	5				1,25	5
39,23	4				1	
24,52	2,5					2,5
12,26	1,25					1,25
9,807	1					1

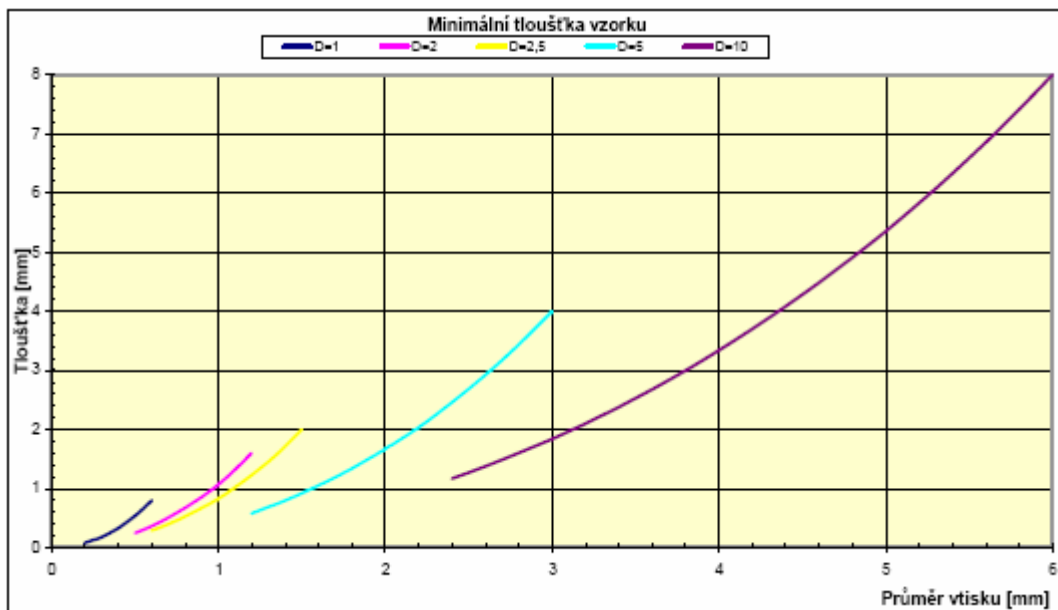


Tab. 2. Volba poloměru  $0,102F/D^2$  pro různé materiály [10]

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

#### 1.2.4 Zkušební tělesa (vzorky)

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



Obr. 4. Minimální tloušťka vzorku u metody Brinell [10]

### 1.2.5 Zápis hodnoty tvrdosti

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

- průměr kuličky
- velikost zkušebního zatížení
- doba působení zkušebního zatížení v sekundách, liší-li se od doby stanovené touto normou[10]

Příklad: 450 HBW 5/850

### 1.2.6 Přesnost výsledků zkoušky

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

Další závadou je, že průměr vtisku, na jehož měření závisí přesnost celé zkoušky, je velmi ovlivněn vtažením materiálu po obvodu vtisku (nezpevněný materiál), nebo vytlačení obvodového valu (zpevněný materiál). Příčina další chyby při stanovení tvrdosti je deformace použité kalené kuličky. Kulička se nejprve deformuje pružně, později plasticky. Po této deformaci jsou vtisky plošší a širší – stanovuje se nižší tvrdost. Proto se pro měření tvrdosti nad 400 HB používají kuličky ze slinutých karbidů. [2]

### 1.2.7 Modifikovaná metoda měření tvrdosti HBT

Princip spočívá ve vyhodnocení tvrdosti z hloubky vtisku

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

HBT tvrdost podle Brinella určená z hloubky

F působící síla [ N ]

D průměr kuličky

h hloubka vtisku

$k_1$  korekční konstanta tvrdoměru

$k_2$  korekční konstanta materiálu

Uvedená metoda se obvykle používá v případě nutnosti automatizace měřicího procesu např. na lince pro zušlechtní materiálu apod. Odchyly tvrdosti zjištěné měřením z hloubky vtisku (HB – HBT) jsou korigovány konstantami  $k_1$  a  $k_2$ . Velikost odchylek se pohybuje při měření měkkých materiálu cca 3 – 4 %, u středně tvrdých 1% a u tvrdých materiálu dosahuje 3,5% naměřené hodnoty tvrdosti. [10]

### 1.3 Ludwikova zkouška

Přes rychlé rozšíření Brinellovy zkoušky byla pocíťována její velká nevýhoda v tom, že tvrdost je závislá na velikosti zatížení. (V roce 1885 vyslovil *Kick* známý zákon o úměrnosti přetvárné práce a příslušného deformovaného objemu. Tento zákon pro Brinellovu zkoušku neplatí, neboť poměry napjatosti se při změně zatížení mění složitějším způsobem). Tento nedostatek odstranil *Ludvik* v roce 1907 náhradou kuličky kuželem, kde zů-

stává při všech zatíženích poměr tangenciálního a normálového napětí stejný a hodnota tvrdosti je na zatížení nezávislá [7]

Ludvik použil kužele z kalené ocele s vrcholovým úhlem 120, 90 a 60° z praktických se zaoblenými vrcholy s poloměrem 0,2 mm.

Williams zkoušel na mědi zpevnění materiálu v okolí vtisku v souvislosti s vrcholovým úhlem. Při 120° je měď nejvíce zpevněna při dně vtisku a ke kraji její tvrdost zcela rovnoměrně ubývá. Při 90° je tvrdost rozdělena rovnoměrněji, s tím, že ve dně je podstatně menší a okraj je naopak více zpevněn, než v předešlém případě. Při 60° tento trend pokračuje, dno je minimálně zpevněno zatímco deformace v okolí vtisku jsou do značné vzdálenosti výrazné.

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

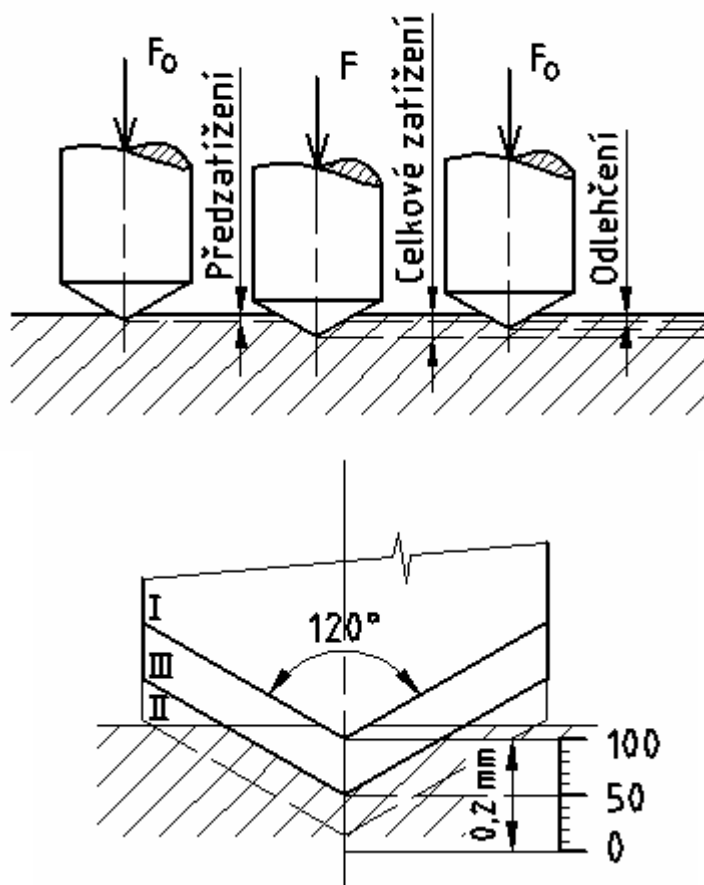
## **1.4 Rockwellova zkouška**

Rockwellova zkouška je založena na principu Ludwikovy zkoušky. *Rockwell* však použil indentor z diamantu a zatížení podstatně menšího než *Ludvik* (9,8 – 49 kN). Protože tření při vnikání indentoru je tím menší, čím větší je jeho vrcholový úhel, volil *Rockwell* diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° se zaoblením poloměrem 0,2 mm (ČSN 42 0373). [8]

### **1.4.1 Podstata zkoušky**

Metoda je vypracována pro sériové kontrolní zkoušky kalených, zušlechťovaných nebo jinak tepelně zpracovaných ocelí. Tato zkouška tvrdosti nevyžaduje upravený povrch, neboť hloubka vtisku se měří tak, že při zatížení 98 N se ustaví hloubkoměr na nulu, zatíží se hlavní silou viz tab. č. 4. Po odlehčení na hodnotu původních 98 N se odečte hloubka vtisku. Kdyby se odečítalo při plném zatížení, jevila by se tvrdost značně menší nejen o pružné deformace vtisku, ale také o veškeré pružné deformace stojanu stroje, podložky apod.

Celková měřitelná hloubka při použití kuželového indentoru je 0,2 mm. Tato hloubka je rozdělena na 100 dílku viz tab. č. 4. Tvrdost materiálu je rovna tvrdosti diamantu v případě, že se hrot po odlehčení na 98 N vrátí do původní, nulové polohy [7]



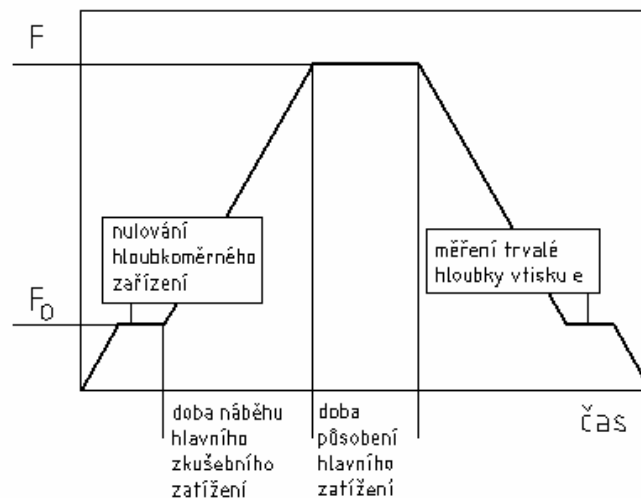
Obr. 5. Zkouška dle Rockwella [8]

Nejměkčí kov, který se dá touto metodou zkoušet odpovídá pevnosti v tahu 80 MPa. Metodu HRC lze dle naší normy použít od minimální tvrdosti HRC 20. Doporučuje se ji však používat od HRC 30, neboť při menších tvrdostech jsou naměřené tvrdosti málo přesné. Pro měkčí materiály je nutno použít namísto diamantového kužele ocelovou uličku s menším zatížením viz tab. č. 4. U nejtvrdějších materiálů, např. slinutých karbidů, je nebezpečí, že při zatížení 1471 N dojde k poškození diamantového indentoru. Z toho důvodu se u nejtvrdějších materiálů používá zatížení pouze 588 N (HRA) [7]

#### 1.4.2 Provedení zkoušky

- Zkouška se provádí obvykle při teplotě 10 až 35 °C, v arbitrážních případech při teplotě  $23 \pm 5^\circ\text{C}$

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



Obr. 6. Průběh zkušebního zatížení – metoda Rockwell [10]

- Vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být alespoň 4 násobek průměru vtisku (ale nejméně 2 mm). Vzdálenost středu vtisku od kraje vzorku musí být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku ( platí pro metody HRA – K)
- Vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být minimálně 2,5 násobek průměru vtisku (platí pro metody HRxxN aT) [10]

### 1.4.3 Vnikací tělesa a zkušební síly

Tab. 3. Vnikací těla a zkušební síly pro různé metody Rockwell [10]

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

#### 1.4.4 Zkušební tělesa (vzorky)

- Zkouška se provádí na povrchu, který je hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména zcela bez mazadel (s výjimkou titanu, kde mazadlo může být použito, ale tato skutečnost musí být uvedena v protokolu)
- Příprava povrchu zkušebního tělesa se provádí tak, aby byla co nejvíce omezena změna jeho vlastností vyvolaná např. ohřevem nebo tvářením při řezání, broušení a leštění vzorku
- Tloušťka vzorku musí být nejméně 10 násobek hodnoty  $e$  (trvalá hloubka vtisku). Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být patrné stopy deformace způsobené vnikacím tělesem
- Při zkouškách na vypuklých površích (válcové, kulové) se používá opravných součinitelů. Součinitelé jsou uvedeni v příloze normy
- V případě, že nejsou k dispozici opravné součinitele pro kulové a vyduté válcové plochy, musí být zkoušky na těchto plochách předmětem zvláštní dohody
- *Mimořádnou pozornost je třeba věnovat zkoušce na zaobleném povrchu. Vypuklá strana musí být obrácena ke vnikacímu tělesu. Jestliže je k vnikacímu tělesu obrácen vydutá, může dojít k chybám v důsledku zploštění v podložce*[10]

#### 1.4.5 Zápis hodnoty tvrdosti

Tvrdot podle Rockwella se vyjadřuje čísly určující hodnotu tvrdosti a písmeny HR s uvedením stupnice tvrdosti [7]

Příklad: 62 HRC , 75 HR 30 N

#### 1.4.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Rockwell

Stejně jako tomu bylo u předchozí zkoušky, jeví se i zde v okolí vtisku diamantu i kuličky u Rockwellovy zkoušky val nebo vtažení materiálu. Jelikož se však při této metodě určuje tvrdost z hloubky vtisku, nemají tyto jevy na přesnost měření tvrdosti velkého vlivu, i když je tím vlastní tvrdost značně ovlivněna, neboť celková deformace, a tedy i hloubka vtisku, závisí na utvoření valu. Daleko nejpříznivěji se projevuje nepřesné provedení diamantu, a to jak nesprávný vrcholový úhel, tak i nesprávný poloměr zaoblení vrcholu. Při zvětšení vrcholových úhlů se dosahuje mělčích vtisků a tedy vyšších hodnot tvrdosti, kdežto u menších úhlů je to naopak. [2]



## 1.5 Vickersova zkouška

Ve stejné době jako v Americe vznikala Rockwellova metoda vznikla v Anglii jiná vnikací zkouška, kterou popsali Smith a Sandland. V Evropě je tato zkouška známa podle tvrdoměru firmy Vickers. V USA je obvykle označována diamond pyramid hardness test. [7]

### 1.5.1 Podstata zkoušky

Diamantové vnikací těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a s daným vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami je vtlačováno do povrchu vzorku. Tento úhel je volen tak, aby tření co nejméně ovlivňovalo výsledek a dále proto, aby se hodnoty tvrdosti příliš neodlišovaly od tvrdosti stanovené metodou dle Brinella.

Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku, jenž se uvažuje jako pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou a s vrcholovým úhlem rovnajícím se úhlu vnikajícího tělesa [10]

$$HV = 0,102 \times \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d_{1,2}^2} = 0,1891 \frac{F}{d_{1,2}^2} \quad (3)$$

F zkušební zatížení [ N ]

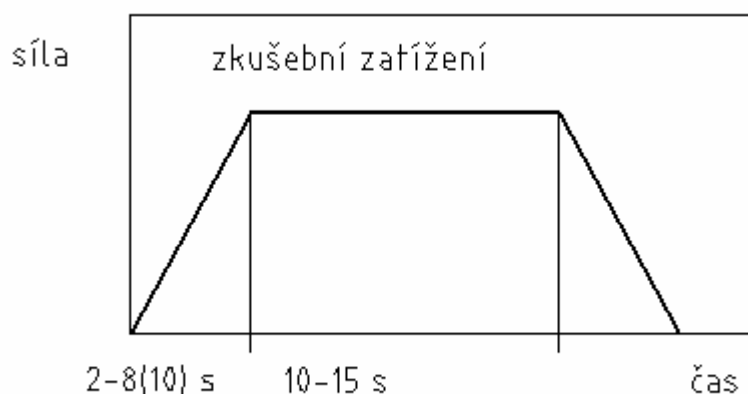
$d_{1,2}$  aritmetický průměr dvou délek úhlopříček  $d_1, d_2$  [ mm ]

Tab. 4. Členění metody Vickers [10]

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

### 1.5.2 Provedení zkoušky

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



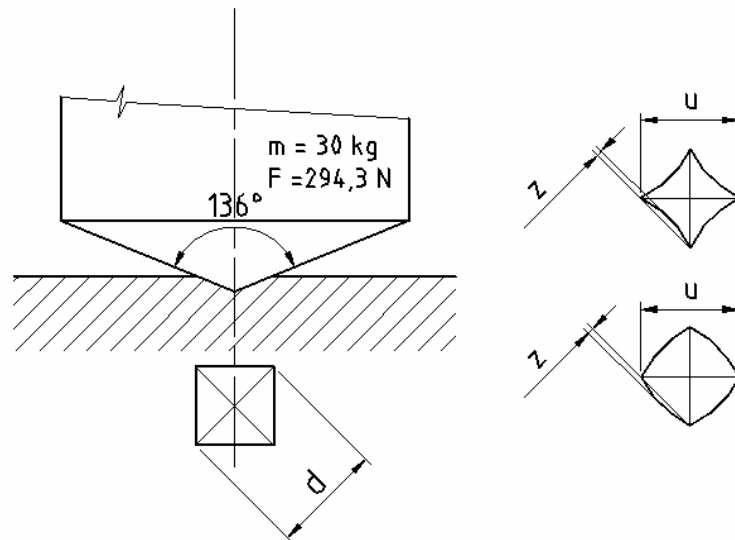
Obr. 7. Průběh zkušebního zatížení [10]

- Vzdálenost středu vtisku od okraje vorku musí být minimálně 2,5 násobek velikosti úhlopříčky (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a minimálně 3 násobek velikosti úhlopříčky při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin
- Vzdálenost středů dvou sousedních vtisků musí být nejméně 3 násobek velikosti úhlopříčky (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a 6 násobek velikosti úhlopříčky při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin
- Po zkoušce se úhlopříčky nesmí lišit a více než o 5% střední hodnoty [10]

### 1.5.3 Vnikací tělesa zkušební síly

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

Následkem rozdílného zpevnění při hranách jehlanu a uprostřed ploch nemusí být průměr vtisku přesně čtvercový, nýbrž strany mohou být buď vyduté u měkkých materiálů A, nebo naopak vypouklé u zpevněných materiálů B viz obr. č. 8 [7,10]



Obr. 8. Schéma zkoušky dle Vickerse - deformace vtisku [7]

Při zkoušce musí být použito některého následujícího zkušebního zatížení

Tab. 5. Zkušební zatížení pro zkoušku dle Vickerse [10]

Zkouška tvrdosti <sup>1)</sup>		Zkouška tvrdosti při malém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti <sup>2)</sup>	
Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení [N]	Symbol	Nominální hodnota zkušebního zatížení [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

1) Může být použito zatížení větší než 980,7 N

2) Pro zkoušku mikrotvrdosti jsou doporučována následující zkušební zatížení

#### 1.5.4 Zkušební tělesa (vzorky)

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

#### 1.5.5 Zápis hodnoty tvrdosti

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

Příklad 730 HV 30

### 1.5.6 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Vickers

Při měření tvrdosti je výsledek ovlivněn chybami, které jsou způsobeny jak vlastnostmi zkoušené látky, tak zkoušecím zařízením. Je-li struktura zkoušeného materiálu příliš hrubá a síla, kterou je jehlan do materiálu vtlačován malá, může nastat případ, že vtisk se bude rozprostírat pouze na jedné strukturní součásti a výsledná tvrdost nebude odpovídat celkové tvrdosti. Proto se tato zkouška nehodí pro měření hrubých a nestejnorodých struktur jako je litina. Jako u zkoušky podle Brinella se objevují rozdílné vtisky u materiálů nezpevněných a zpevněných. Pokusy bylo zjištěno (Fisher), že v závislosti na stupni zpevnění zkoušeného materiálu se mění hodnoty tvrdosti se zvyšujícím zatížením v kladném nebo záporném směru. [2]

## 1.6 Některé další metody měření tvrdosti

### 1.6.1 Knoopova zkouška

V roce 1939 byla v americkém National Bureau of Standards vypracována nová metoda zkoušky tvrdosti, jež se od metody Vickersovy odlišuje tvarem indentoru. Metoda je určena pro měření velmi tenkých vrstev (např. nitridových vrstev), s poměrem úhlopříček asi 7,11:1. Hloubka vtisku je asi 1/30 délky dlouhé úhlopříčky. [2,7,8]

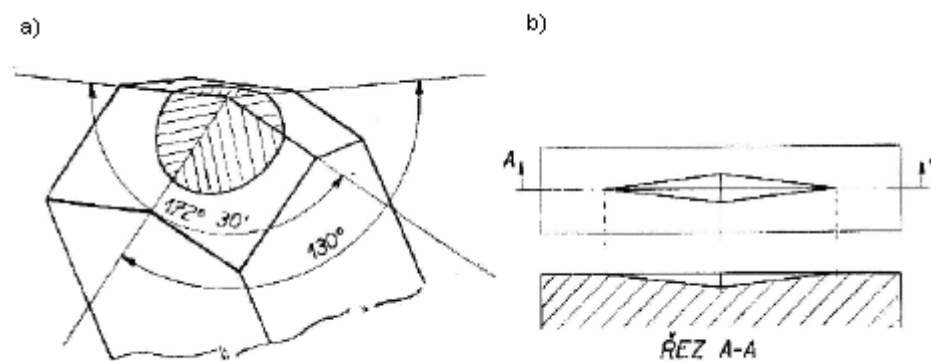
Metoda je založena na vtlačování diamantového vnikacího tělesa ve tvaru čtyřbokého jehlanu s vrcholovými úhly 172,5° a 130° do zkoušeného materiálu definovanou silou. Vtisk má tvar protáhlého kosočtverce a na rozdíl od metody Vickers se měří pouze delší úhlopříčka. [8,10]

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

$$HK = \frac{1,4509 \times F}{l^2} \quad (4)$$

F      působící síla [ N ]

l      délka delší úhlopříčky [ mm ]



Obr. 9. Indentor dle Knoopova [2]

a) Tvar diamantového jehlanu podle Knoopova. b) Vzhled vtisku Knoopova jehlanu

Výhodou Knoopova indentoru je, že deformace jsou relativně největší u krátké úhlopříčky a v tomto směru je tedy největší odpružení při odlehčení. Ve směru dlouhé úhlopříčky je odpružení zanedbatelné. Další výhodou je možnost vtisky vytvořit tak, že lze s velkou přesností změřit tvrdost u úzkých součástí např. drátů. Klade-li se delší úhlopříčka rovnoběžně s povrchem lze u cementovaných popř. nitrídaných povrchů zachytit podstatně citlivěji změny tvrdosti, než Vickersovým indentorem. S ohledem na malou hloubku průniku indentoru se tato metoda může s výhodou použít i u materiálů se slabou povrchovou vrstvou. [7]

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

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

Chyby vznikající u metody Knoop mají obdobné příčiny u metody Vickers, větší nároky jsou kladeny na ostrost hran vnikacího tělesa a úpravu zkoušeného povrchu [10]

### 1.6.2 Bierkovičova zkouška

Bierkovičova zkouška tvrdosti je další zkouškou, která se vyvinula s Vickersovy metody. Jako indentor je zde volen pravidelný diamantový jehlan jehož základnou je rovnostranný trojúhelník. Vrcholový úhel tohoto jehlanu je  $65^\circ$ . U této metody se měří velikost výšek jednotlivých stran.

Tato metoda našla největší uplatnění hlavně u velmi tvrdých materiálů, např. slinutých karbidů [7]

### 1.6.3 Zkouška mikrotvrlosti

Název mikrotvrlost se ustálil pro tvrdost určenou použitím zcela malých zatížení, tak aby vznikly vtisky nepatrné velikosti. Často se uvádí 19,8 N jako hranice mezi makro a mikrotvrdotí. Zatímco při makrotvrdoti se zjišťuje tvrdost kovu jako krystalického celku, je možno při mikrotvrdoti stanovit tvrdosti jednotlivých strukturních součástí kovu. Mikrotvrdot nelze určovat obvyklými tvrdoměry, neboť vyžaduje nesrovnatelně větší přesnost jak při zatěžování, tak i při proměřování vtisku. Nejpřesnější je přímé zatěžování závažím nebo přesně cejchovanou pružinkou. K proměřování vtisku slouží přesná optika. [2,7]

Pro zkoušky mikrotvrlosti jsou použitelné jediné vnikací metody s diamantovým indentorem. Prakticky přichází v úvahu pouze metoda Vickersova, Knoopova nebo Biekovičova.

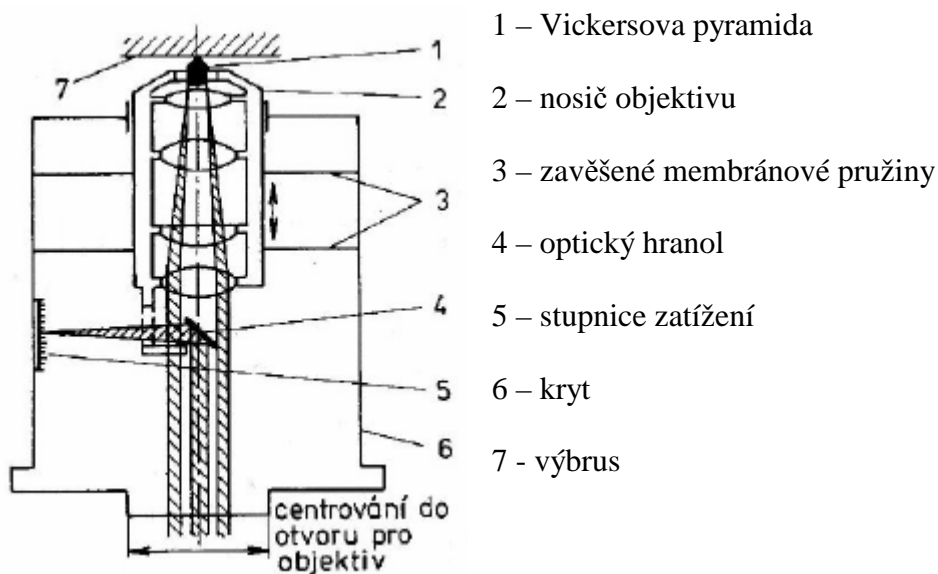
Jednou z nejpřesnějších konstrukcí je u nás používaný *Hanemannův* mikrotvrdoměr (1940). Vnikací tělísko – Vickersův jehlan – je usazen přímo do speciálního objektivu, který se vloží místo normálního objektivu do metalografického mikroskopu. Objektiv je zavěšen na pružných membránách, které dovolují pohyb ve směru optické osy. Prohnutí membránových pružin, kterému odpovídá zatížení působící na diamant, se měří na obrazu zatěžovací stupnice uvnitř objektivu. Po odlehčení a zaostření na strukturu se pomocí měřicího okuláru změní vytvořený vtisk. Odpovídající mikrotvrdot se vypočítá dle vztahu:

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

F      zátěžná síla [ N ]

u      průměrná hodnota úhlopříčky [ mm ]

Podle použitého zatížení se mikrotvrdot značí např. HV 0,05 (0,49 N – 50g) [2,7]



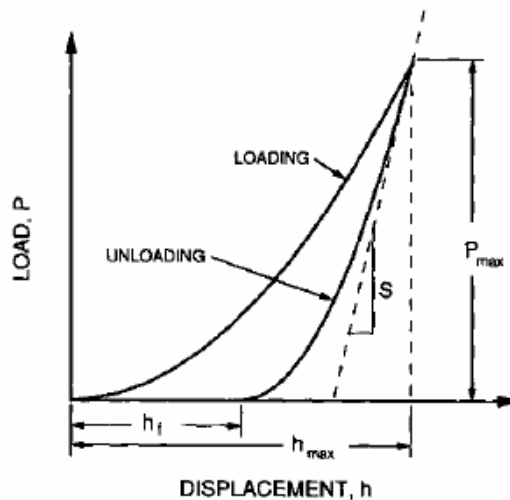
Obr. 10. Schéma Hanemannova mikro-  
tvrdoměru [7]

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

### 1.6.3.1 Nanoindentační zjištění mechanických hodnot

Nanotvrdoměru je termín pro hodnoty mikrotvrdoměru zjištěné při extrémně nízkých hodnotách zatížení (až 0,01 g). Takto vytvořené vtisky mají často rozměry menší 100 nm ( $10^{-4}$  mm). Z důvodu požadované přesnosti naměřených hodnot mikrotvrdoměru jsou schopny užívané přístroje (nanoindentory) měřit hloubku proniknutí indentoru  $h$  s přesností až 0,2 nm [7]





Obr. 11. Indentační křivka [7]

Indentační křivka elasticko- plastického materiálu  $L_{max}$ . ( $P_{max}$ ) je maximální zatížení indentoru,  $h_{max}$  je maximální hloubka proniknutí indentoru,  $h_f$  je hloubka proniknutí indentoru po odlehčení S je sklon počátečního úseku odlehčování křivky

Z hloubky průniku se stanoví veličina, která se označuje termínem dynamická tvrdost DHV. Z indentační křivky lze získat množství informací a parametrů pro kvantifikaci a porovnávání deformačního chování materiálu např. maximální zatížení indentoru, hloubku proniknutí indentoru při maximálním zatížení indentoru  $L_{max}$ . [7]

#### 1.6.4 Univerzální tvrdost

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

##### 1.6.4.1 Postata zkoušky

Diamantové vnikací těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a s daným vrcholovým úhlem ( $136^\circ$ ) mezi protilehlými stěnami je vlačováno do povrchu vzorku. Zkušební síla je aplikována buď v režimu posuvu, nebo řízené síly. Zkušební síla  $F$  a hloubka vtisku  $h$  se průběžně měří ve fázi zatěžování i odlehčování. Univerzální tvrdost je definována jako podíl zkušební síly  $F$  a plochy vtisku  $A(h)$  vypočítané z hloubky vtisku pod zatížením [10]

$$HU = \frac{F}{A(h)} = \frac{F}{26,43 \times h^2} \quad (6)$$

$$A(h) = \frac{4 \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \times h^2 \quad (7)$$

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

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

#### 1.6.4.2 Příklady značení

Univerzální tvrdost je označována symbolem  $HU$ , za kterým následují zkušební podmínky v pořadí a) zatížení v  $N$

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

příklady:

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

$HU 0,5/20/3 = 8700N/mm^2$  (univerzální tvrdost zjištěná při zkušební síle 0,5 N aplikované v průběhu 20 s ve 3 krocích) [10]

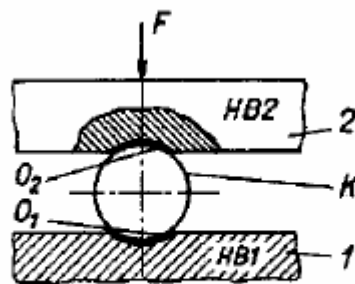
## 1.7 Dynamické zkoušky vnikací

Na rozdíl od statických zkoušek, kde se zkušební tělisko nejprve nastaví na zkoušený předmět a pak se pozvolna vzrůstající silou vtlačuje, jsou při dynamických zkouškách poměry vtiskovací zcela jiné. Zkušební tělisko je buď z jisté vzdálenosti proti zkoušenému předmětu vrženo nebo na něm volně spočívá a je jiným tělesem rázem do něj vtisknuto.

Dynamické zkoušky jsou obdobou zkoušek statických. U nás se nejvíce uplatňuje měření tvrdosti pomocí kladívka Poldi a Baumannova kladívka. V těchto případech je vnikacím tělískem kulička. [2,7,10]

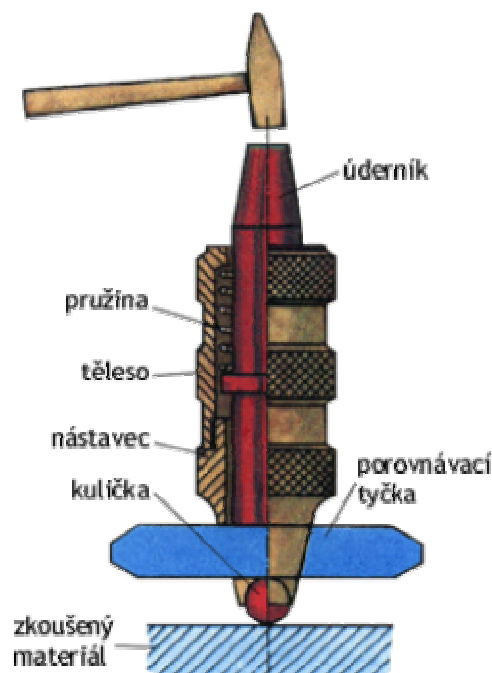
### 1.7.1 Tvrdoměr Poldi

Je to přenosný tvrdoměr, který umožňuje stanovení tvrdosti na základě plastické deformace vzniklé rázem a porovnání velikosti vzniklého vtisku s velikostí vtisku na materiálu o známé tvrdosti. Jde o nejmenší přenosný tvrdoměr pro měření tvrdosti metodou Brinell. Oblast jeho využití je především při nutnosti změření tvrdosti na velkých výrobcích a konstrukcích., kde nelze využít měření na statickém nebo přenosném tvrdoměru, které pracují normalizovanou metodou Brinell. Výhodou tvrdoměru jsou jeho malé rozměry, hmotnost a možnost funkčnosti prakticky v jakékoliv poloze. Tvrdoměr byl vyroben a patentován již v r. 1921 [7,10]



1 — zkoušený materiál; 2 — srovnávací tyčka;  
K — kulička; O<sub>1</sub> — plocha vtisku ve zkoušeném  
materiálu; O<sub>2</sub> — plocha vtisku ve srovnávací tyčince

Obr. 12. Zkouška tvrdosti Poldiho kladívkem [7]



Obr. 13. Poldino kladívko [8]

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

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

Výsledná informace o hodnotě tvrdosti je zapisována následujícím způsobem: HB POLDI [2,7,10]

### 1.7.2 Baumanovo kladívko

Baumanovo kladívko pracuje na princípu vyvolání rázové energie k vytvoření vtisku pružinou, která má definovanou tuhost. Proto je kulička vždy stálou energií vtiskována do zkoušeného materiálu.

Odjištěním a spuštěním pružiny dojde k úderu razníku na vnikací tělísko ve tvaru kuličky a k jeho vtlačení do povrchu zkušebního tělesa. Měří se průměr vtisku  $d_{\text{mat}}$ , který zůstane na povrchu zkušebního materiálu. Tvrdost se určuje jako poměr zkušebního zatížení a povrchu vtisku (má povahu napětí). Tvrdost materiálu je určena pomocí hodnoty  $d_{\text{mat}}$  (aritmetický průměr dvou kolmých vtisků ve zkoušeném materiálu  $d_{\text{mat1}}$  a  $d_{\text{mat2}}$ ) z tabulek

Výsledná informace o hodnotě tvrdosti je zapisována následujícím způsobem: HB BAUMANN [2,7]

## 2 ZKOUŠKY ODRAZOVÉ

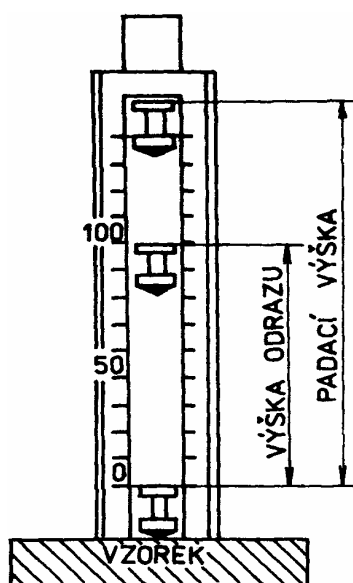
Metoda pružného odrazu je založena na měření tvrdosti na základě pružného odrazu tělesa, padajícího z určité výše na povrch kovu. Výška nebo úhel odrazu tohoto tělesa charakterizuje tvrdost zkoušeného materiálu.

Při nárazu tělesa se malá část kinetické energie spotřebuje na nevratnou plastickou deformaci povrchu zkoušeného tělesa a zbývající energie se projeví odrazem tělesa. Celková energie je součtem trvalých a pružných energií. Poměr těchto energií je pak ukazatelem tvrdosti materiálu. Hodnota u dynamických odrazových metod nedosahuje přesnosti statických metod. [2,7]

### 2.1 Shoreho metoda (Shoreho skleroskop)

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

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



Obr. 14. Shoreho skleroskop[7]

### *Stupnice HSC*

hmotnost pádového tělesa 2,5 g

pádová výška 254 mm

$$HSC = \frac{10^4 \times h_2}{65 \times h_1} \quad (8)$$

$h_1$  padací výška [ mm ]

$h_2$  výška odrazu [ mm ]

### *Stupnice HSD*

hmotnost pádového tělesa 36,2 g

pádová výška 19 mm

$$HSD = \frac{140 \times h_2}{h_1} \quad (9)$$

$h_1$  pádová výška [ mm ]

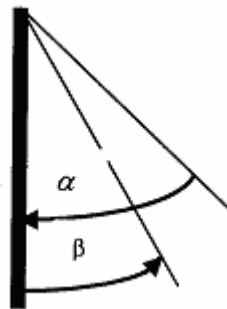
$h_2$  výška odskoku [ mm ]

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

Přesnost měření závisí na mnoha faktorech, jako je hladkost povrchu, kolmost dopadu tělíška, hmotnosti zkoušeného předmětu a také především na modulu pružnosti zkoušeného materiálu, takže porovnávat lze výsledky měření jen materiálů s přibližně stejným modulem pružnosti. [10]

## 2.2 Duroskop

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



Obr. 15. Duroskop [7]

## 2.3 Tvrdoměr Equotyp

Princip měření tvrdosti vychází ze stanovení kinetické energie sondy vymrštěné pomocí pružiny kolmo proti měřenému povrchu. Tvrdost je odvozena z porovnání rychlosti sondy před dopadem a po odrazu sondy od měřeného povrchu. Ztráta energie je tím větší, čím větší je deformace, tedy čím je materiál měkčí. Jako vnikací tělíska se používá kulička ze slinutých karbidů, popř. u velmi tvrdých materiálů kulička diamantová. Rychlosti kuličky před a po dopadu jsou obě měřeny nekontaktně. V pouzdru vnikacího tělíska je proto umístěn permanentní magnet, který indukuje napětí při průchodu cívkou umístěnou ve spodní části sondy. Toto indukované napětí je úměrné rychlosti. Vhodné pro měření tvrdosti hrubozrnných materiálů a součástí s větší hmotností. [10]



### 3 ZKOUŠKY VRYPOVÉ

Tato zkouška patří mezi nejstarší způsoby zkoušení tvrdosti a její princip byl převzat z mineralogie, kde se ke klasifikaci tvrdosti užívá tzv. Mohsovy stupnice . V této stupnici je seřazeno 10 nerostů, z nichž každý následující je schopen vyrýt do všech přecházejících nerostů vryp [2,7]

Tab. 6. Srovnání Mohsovy mineralogické stupnice a materiálů ve strojírenství [2]

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

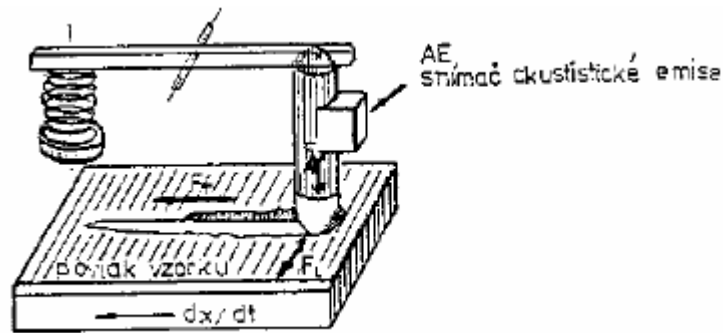
Citlivost této stupnice je však velmi malá, proto se u kovů a jejich slitin určuje tvrdost na základě šířky vytvořeného vrypu. K určování této tvrdosti se používá přístroj, který zavedl *Martens*

Po vyhlazené ploše zkoušeného kovu pojíždí diamantový kužel s vrcholovým úhlem 90°, který lze zatížit silou až 19,8 N. Vytvořený vryp se měří pomocí optického mikroskopu. Číslem tvrdosti dle Martense je zatížení, které vytvoří vryp šířky 0,01 mm. Druhou možností je, že při stejném zatížení se vytvoří vryp a porovnává se šířka vrypu. [7]

Způsob zjišťování tvrdosti vrypovou metodou je značně nepřesný, a proto se velmi málo používá. Jediné současné praktické využití je možno nalézt při studiu velmi tvrdých povrchových několik mikronů tenkých vrstev nitridů popř. karbidů kovů. V literatuře se tato zkouška nazývá *scratch test*. [2,7]

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

případě se pak určuje kritické zatížení  $L_c$ , které mělo za následek adhezní odtržení vrstvy.  
[7]



Obr. 16. Schématické znázornění  
vrypové zkoušky [7]

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

„Přístroj scratch testu zaznamenává průběh normálové  $F_n$  a tangenciální  $F_t$  síly působící na indentor, případně i hodnoty frikčního koeficientu  $\mu = F_t/F_n$  a signál akustické emise, který vzniká při rozvoji a šíření vnitřních trhlinek vlivem vnějšího zatěžování. Po provedení zkoušky se povrch vyhodnocuje pomocí optického popř. řádkovacího elektronového mikroskopu. Sledují se lokality s adhezním i kohezním porušením vrstvy. Všechna tato porušení vrstvy se vyhodnocují v korelaci s výsledky signálu akustické emise. Zjištěné hodnoty se udávají v závislosti zatížení  $L_c$  a jsou plně uznávány jako veličiny charakterizující adhezní vlastnosti systému tenká vrstva-substrát.“ [7]

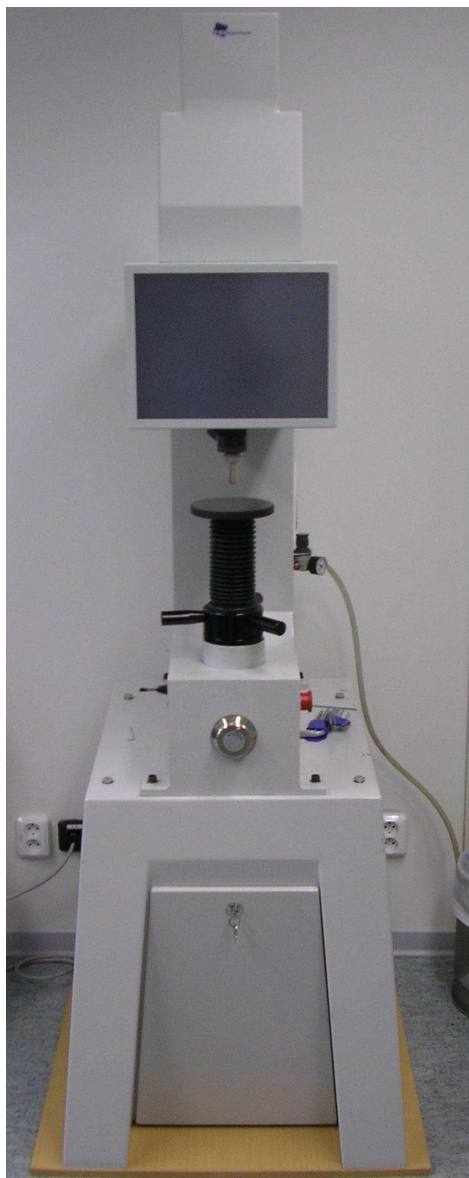
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## **4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

Pro experimentální část bakalářské práce byly vybrány dva typy zkoušek tvrdosti Rockwell a Vickers pro měření tvrdosti kovů. Byl vybrán materiál ocel 14 220 v základním stavu žíhaná na měkko. Vzorky ze základního materiálu byly tepelně a chemicko-tepelně zpracovány. Jedná se o průmyslově zpracováváný typ materiálu. Vzorky jsou válcového tvaru o rozměrech  $\phi$  25 mm a výšky 20 mm.

### **4.1 Určování tvrdosti**

Měření tvrdosti jsou realizována ve dvou základní typech. Podle Rockwella a Vickerse. Abychom mohli měřit i velmi tenké vrstvy, bylo nutné použít u zkoušky Rockwell dva druhy zkoušek. Obecně byly všechny vzorky měřeny metodou HRC, která však nebyla vhodná pro velmi tenké povlaky. Proto jsme přistoupili na alternativu měření podle HR45N, kde je zatížení velmi malé, což umožňuje měřit velmi tenké povrchové vrstvy (např. nitridace). Všechny zkoušky probíhaly na stroji Easydur Italiana podle stanovených norem.



*Obr. 17. Easydur italiana*

*Tab. 7. Použité metody při měření materiálu*

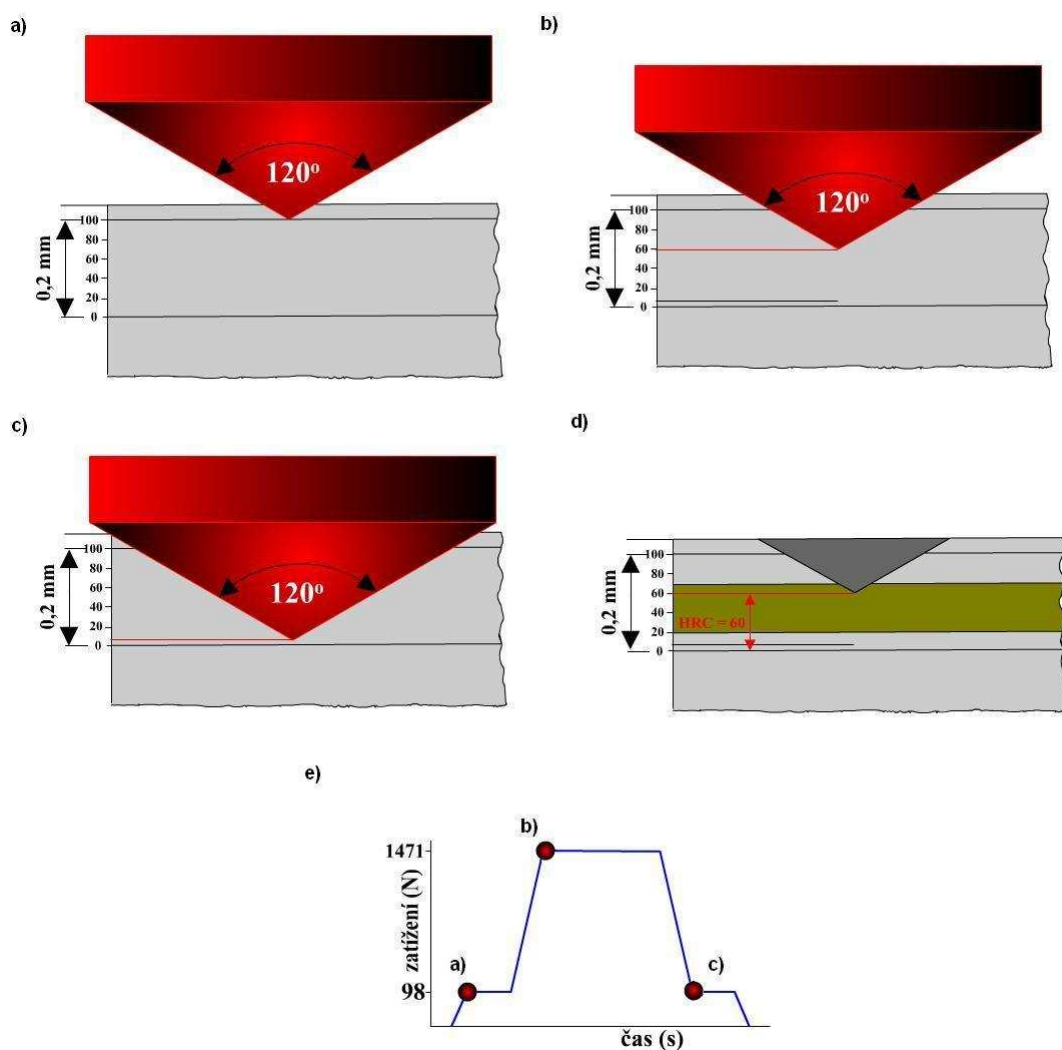
<b>pořadové číslo</b>	<b>zkušební metoda</b>	<b>norma</b>
<b>1</b>	stanovení tvrdosti dle Rockvella typu stupnice C	ČSN EN ISO 6508-1
<b>2</b>	stanovení tvrdosti dle Rockvella typu stupnice 45N	ČSN EN ISO 6508-1
<b>3</b>	stanovení tvrdosti dle Vickerse	ČSN EN ISO 6507-1



*Obr. 18. Měřící hlava*

## **4.2 Postup měření při zkoušce podle Rockwella HRC, HR45N**

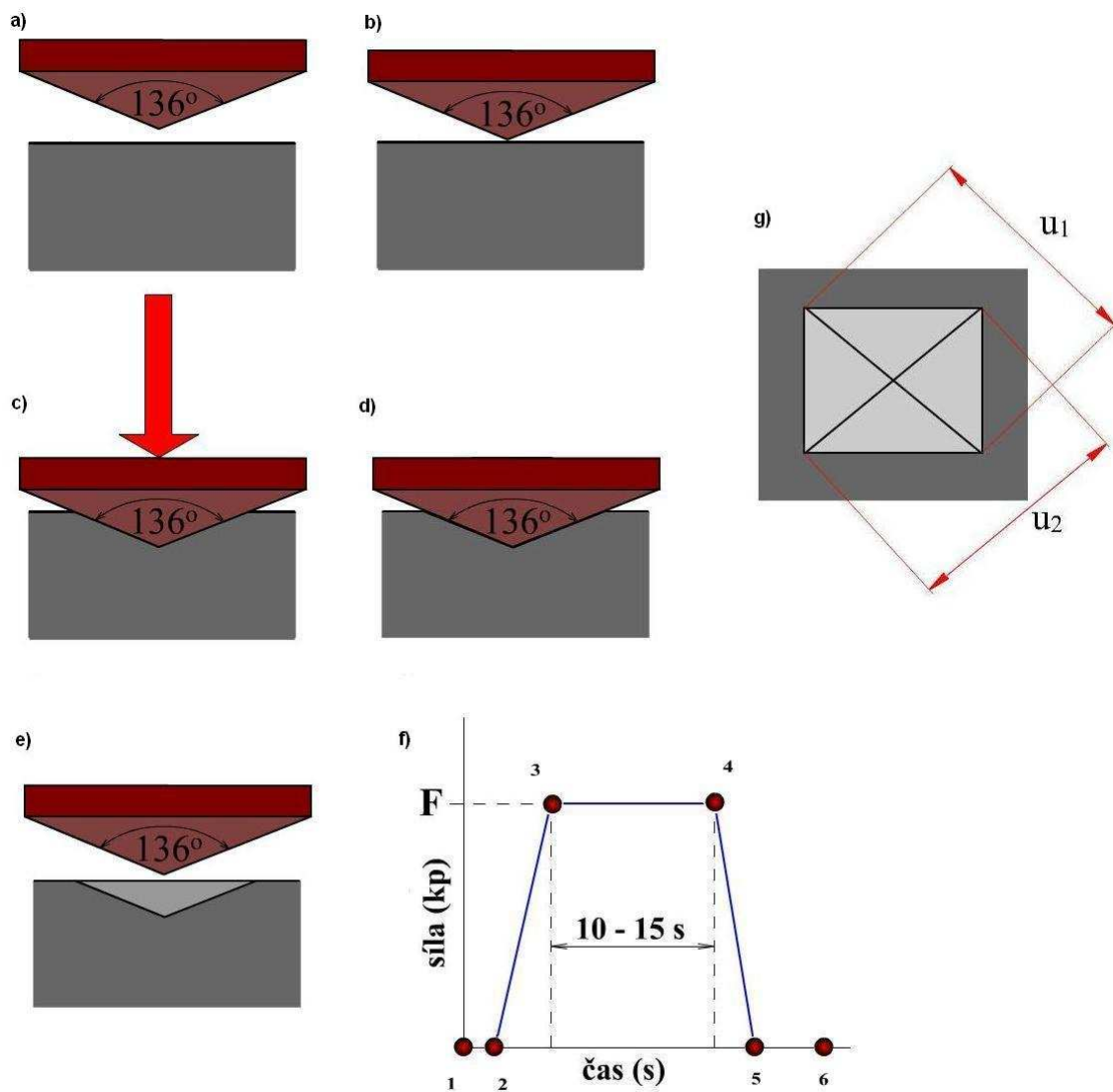
Při měření Rockwellovou metodou byl ocelový vzorek postaven na tuhou podložku tak, aby se nepohnul. Vnikací diamantové tělíčko kuželového tvaru s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a poloměrem zaoblení špičky  $r = 0,2\text{mm}$  se nastavil nad zkoušenou plochu. Velikost předzatěžující síly při stupnici tvrdosti C  $F_1$  činila  $98,04\text{N}$ , celková síla  $F_2$  pak  $1471\text{N}$ . U stupnice tvrdosti 45N předzatěžující síla nabývala hodnot  $29,41\text{N}$  a celková síla  $441,3\text{N}$ . Při spuštění se indentor zatlačí do zkoušeného vzorku silou  $F_1$ , jehož pohyb zaznamenává indikátor (menší zátěž má odstranit nepřesnosti měření v důsledku rozdílných povrchových jakostí). Jakmile uplyne normou určená doba zátěže, zvětší se působící síla na  $F_2$ . Od hloubky, do které bylo tělíčko vtlačeno předzatěžující silou, vyneseme stupnici o 100 dílcích na velikosti  $0,2\text{mm}$  ve směru vnikání indentoru. Výsledná tvrdost se odečte na příslušné stupnici a je určena rozdílem hloubky vtisku při působení síly  $F_1$  před a po aplikaci hlavní síly  $F_2$  obr.19.d). Časový průběh zkoušky znázorňuje obr.19. e). Body na časové křivce jsou přiřazeny k jednotlivým částím obr. 19.



Obr. 19. Schematický postup Rockwellovy zkoušky

### 4.3 Postup měření při zkoušce podle Vickerse HV30

Při Vickersově zkoušce působí pouze jedna zatěžující síla  $F = 30 \text{ kp}$ . Jehlan se nastaví nad zkoušený ocelový vzorek a zatíží. Indentor zanechá na ploše vtisk s jasně patrným tvarem odpovídajícím jeho konstrukci. Následně je nad něj přesunuto optické zařízení, které ho v naší potřebě zvětší na 5ti násobnou velikost a následně vyobrazí na monitoru. Pomocí suportů se nastaví měřicí přímky úhlopříček, pomocí nich určujeme hodnotu tvrdosti. Postup je v zjednodušené formě ukázán na obr. 20. Vynesené body na křivce časového průběhu obr. 20 f) odpovídají postupně jednotlivým částím obr. 20



Obr. 20. Schématický postup Vickersovy zkoušky



## 5 ZÁKLADNÍ MATERIÁL OCEL 14 220

Zkušební vzorek je vyroben z nízkolegované konstrukční mangan chromové oceli (1,25 % Mn, 0,95% Cr) se součtem středních hodnot legovacích prvků 2% a 0,2% středního obsahu uhlíku. Používá se na strojní součásti s velmi tvrdou cementovanou vrstvou a velkou pevností v jádře po kalení (menší hřídele, ozubená kola, šneky, vačkové hřídele, vřetena obráběcích strojů, písní čepy, pera, zubové spojky, trny, upínací nářadí apod.). Ocel je vhodná k cementování, kyanování a objemovému tváření. Mezi další vlastnosti patří dobrá tvárnost za tepla a po žíhání i za studena, dobře obrobitelná, dobrá svařitelnost. Jsou však náchylné k hrubnutí zrna a k popouštění křehkosti. [3,5]

„NŽ: 880 až 920°C; ŽM: 680 až 720°C; C: 840 až 870°C; K: 850 až 880°C (olej, voda); P: 160°C/1 h.“ [5]



Obr. 21. Zkušební vzorek z oceli 14 220

### 5.1 Vyhodnocení tvrdosti základního materiálu ocel 14 220

#### 5.1.1 Měření podle Rockvella HRC, HR45N

Pro měření tvrdosti byl zvolen dva typy zkoušek tvrdosti (Rockwell). Vzorek byl měřen 10krát jak metodou HRC tak metodou HR45N. Výsledky byly vyhodnoceny a graficky znázorněny.

Tab. 8. Hodnoty měření podle HRC

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HRC	22,00	21,03	21,18	21,27	19,21	19,54	17,90	19,37	20,82	19,49
e [μm]	156,00	157,94	157,65	157,47	161,59	160,93	164,20	161,26	158,37	161,03

$\phi = 20,18 \text{ HRC}; 159,64 \text{ } \mu\text{m}$

$s = 0,40 \text{ HRC}; 0,80 \text{ } \mu\text{m}$

n – číslo měření

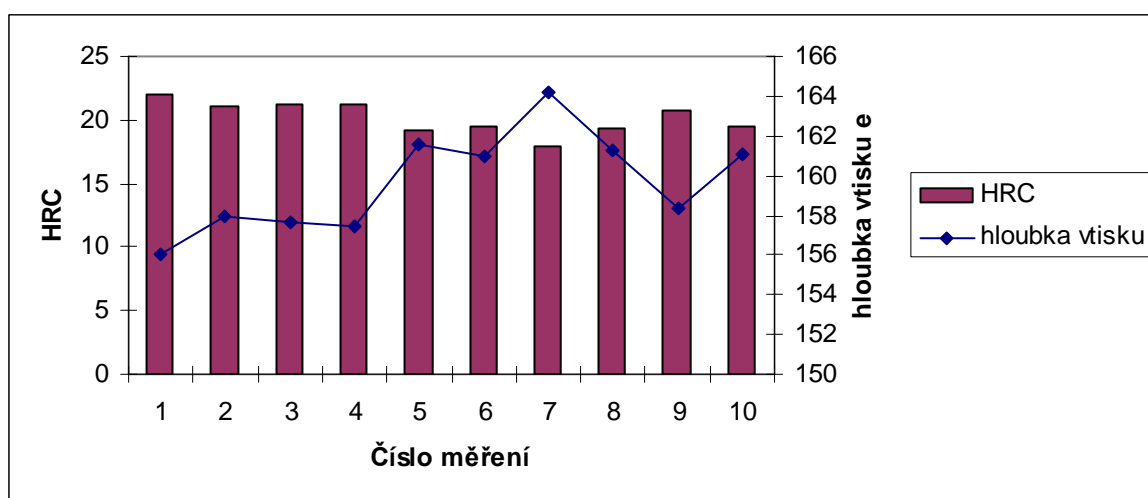
HRC – stupnice tvrdosti

e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka

Z naměřených hodnot (obr.22) vyplývá, že průměrná hodnota tvrdosti byla  $20,18 \pm 0,40$  HRC a hloubka vtisku vnikacího tělíška byla  $159,64 \pm 0,80$   $\mu\text{m}$ . Změřená tvrdost odpovídá tvrdosti tepelně a chemicko-tepelně nezpracovaného materiálu.



Obr. 22. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HRC

Měření tvrdosti metodou HR45N bylo prováděno za stejných podmínek jako HRC. Na zkušebním vzorku byl provedeno 10 měření, výsledky byly vyhodnoceny a graficky zpracovány (obr.23.). Naměřené výsledky ukazují průměrnou hodnotu tvrdosti  $9,50 \pm 0,43$  HR45N a hloubky vtisku vnikacího tělíška  $90,50 \pm 0,43$   $\mu\text{m}$ . To odpovídá hodnotě tvrdosti základního nezpracovaného materiálu 14 220.

Tab. 9. Hodnoty měření podle HR45N

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HR45N	7,35	8,92	7,69	11,38	10,54	10,53	9,96	9,30	8,59	10,72
e [μm]	92,65	91,08	92,31	88,62	89,46	89,47	90,04	90,70	91,41	89,28

$\varphi = 9,50$  HR45N;  $90,50$   $\mu\text{m}$

s =  $0,43$  HR45N;  $0,43$   $\mu\text{m}$

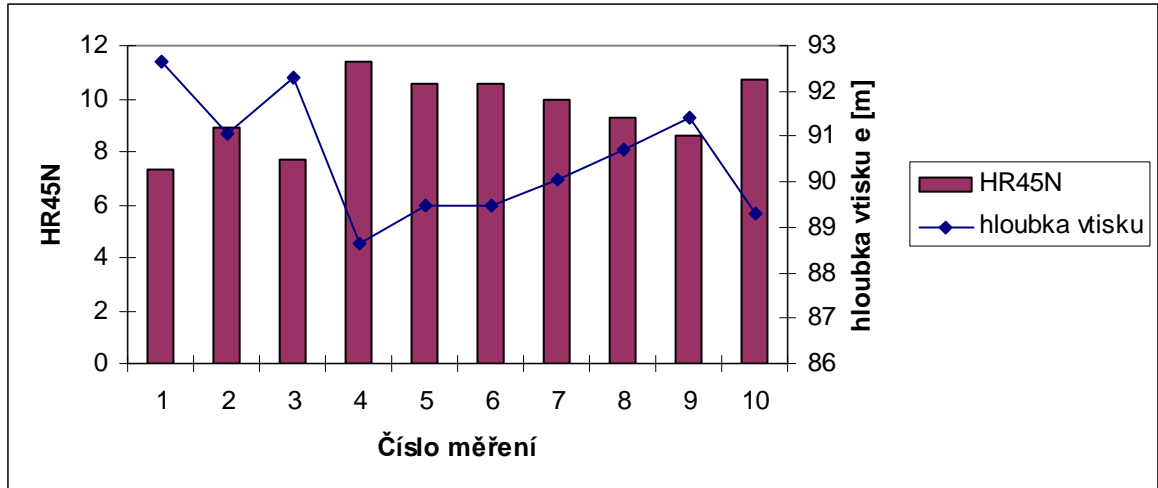
n – číslo měření

HR45N – stupnice tvrdosti

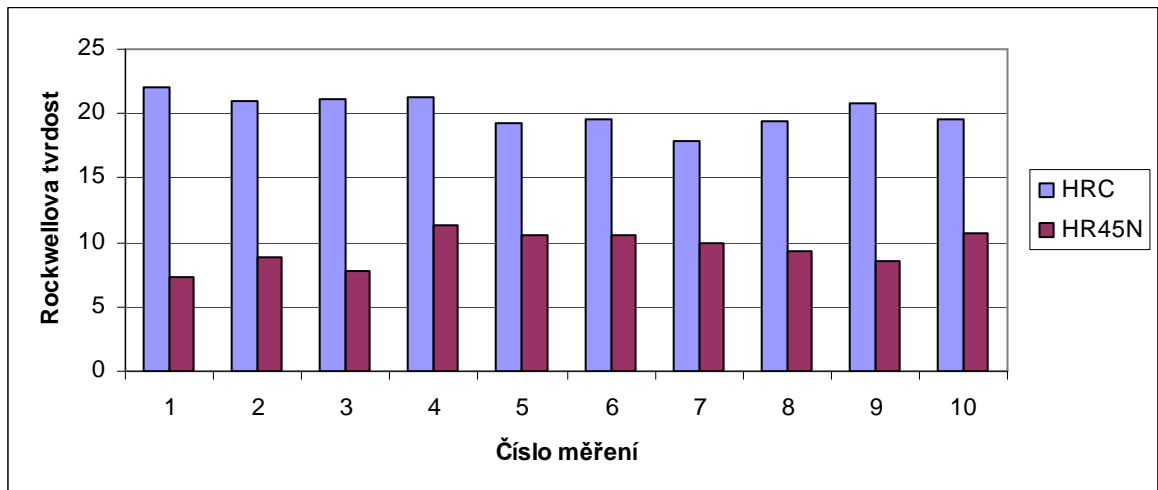
e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 23. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HR45N



Obr. 24. Rozdílná tvrdost mezi HRC a HR45N

### 5.1.2 Měření podle Vickerse HV30

Při měření tvrdosti podle Vickerse byla použita metoda HV 30 a zkušební vzorek byl měřen 10krát. Naměřené výsledky byly vyhodnoceny a graficky zpracovány (obr.25). Z naměřených výsledků vyplývá, že průměrná tvrdost je  $247,1 \pm 4,01$  HV30 s velikostí

úhlopříček  $d_1 = 0,4797 \pm 0,0047$  mm a  $d_2 = 0,4699 \pm 0,0057$  mm. Jelikož struktura oceli nebyla ovlivněna žádným tepelným zpracováním byly naměřeny velmi nízké hodnoty tvrdosti. Při porovnání s tabulkami norem měření tvrdosti jsme zjistily, že odpovídá základnímu typu materiálu 14 220 (udávaná hodnota v tahu je 785 MPa) To odpovídá výsledné hodnotě 21 HV která koreluje s naměřenou hodnotou.

Tab. 10. Hodnoty měření metodou HV30

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>HV30</b>	248,7	243,2	266,6	248,7	235,2	262,4	237,8	228,4	239,6	260,4
<b>d<sub>1</sub>[mm]</b>	0,4613	0,4685	0,4702	0,4953	0,4863	0,4738	0,4828	0,5024	0,4953	0,4613
<b>d<sub>2</sub>[mm]</b>	0,4845	0,4881	0,4434	0,4506	0,4863	0,447	0,4845	0,4845	0,4685	0,4613

$\varphi = 247,1$  HV30; 0,4797 mm; 0,4699 mm

$s = 4,01$  HRC; 0,0047 mm; 0,0057 mm

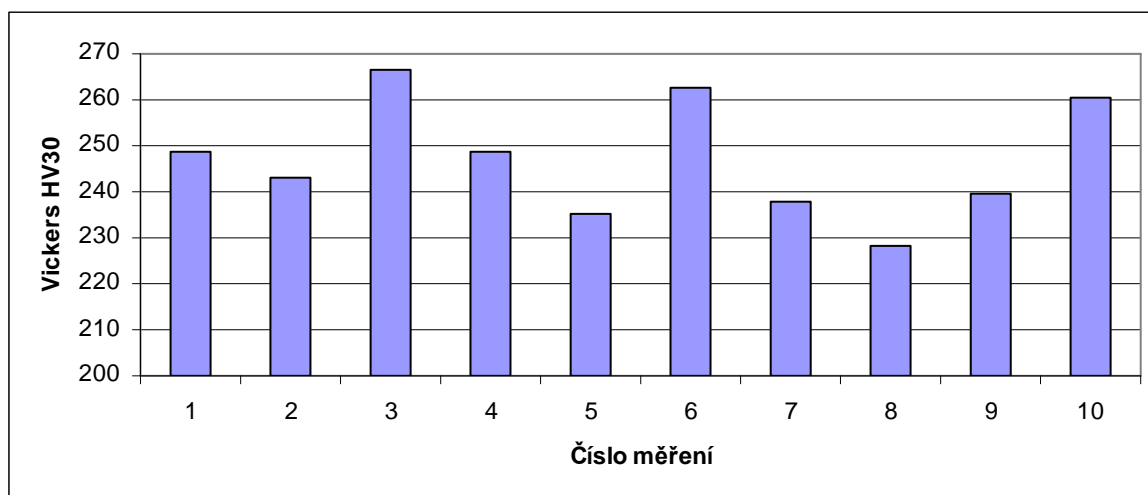
n – číslo měření

HV30 – stupnice tvrdosti

e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 25. Hodnoty Vickersovy zkoušky

## 6 TEPELNĚ ZPRACOVANÁ OCEL 14220 - ZUŠLECHTĚNA

Pro dosažení vhodné struktury a vlastností materiálu se nejčastěji využívá zušlechťování. Proces zušlechťování se skládá z kalení a popouštění. Kalení se provádí tak, že se ocel ohřeje na teplotu nad A3 (v našem případě to byla teplota 860°C), následuje výdrž na teplotě a rychlé ochlazení ve vodní lázni na pokojovou teplotu, po té následuje popouštění na teplotu 550°C. Z hlediska struktury je tento proces založen na vzniku a řízeném rozpadu austenitu. Po kalení následuje popouštění, tj. ohřev na teplotu pod A1, výdrž a ochlazení. První operací při zušlechťování je ohřev oceli nad teplotu A<sub>3</sub>, nad níž probíhá přeměna feriticko-perlitické struktury na austenit, austenitizace. Jednotlivá stádia austenitizace jsou: přeměna feritu na austenit, rozpouštění cementitu v austenitu a homogenizace austenitu. Následuje ochlazení z austenitizační teploty na pokojovou teplotu. Při ochlazování dochází k rozpadu austenitu. Podle rychlosti ochlazování mohou vznikat různé produkty, lišící se strukturou i vlastnostmi. Po zakalení se struktura oceli může skládat z různých produktů rozpadu austenitu podle toho, jaká ochlazovací rychlost byla dosažena v dané části předmětu.

Rozpad austenitu za různých podmínek ukazují transformační diagramy, ve kterých jsou uvedeny teploty a časy potřebné k dané přeměně podle složení a stavu výchozí oceli. Diagramy izotermického rozpadu austenitu (IRA) ukazují průběh přeměny austenitu za konstantní teploty, zatímco diagramy anizotermického rozpadu austenitu (ARA) znázorňují průběh přeměn austenitu při různých rychlostech ochlazování. [9]



*Obr. 26. Zkušební vzorek z ušlechtilé oceli*

## 6.1 Vyhodnocení tvrdosti zušlechtěného vzorku

### 6.1.1 Měření podle Rockwella HRC, HR45N

Pro měření tvrdosti byl zvoleny dva typy zkoušek tvrdosti (Rockwell). Vzorek byl měřen 10krát jak metodou HRC tak metodou HR45N. Výsledky byly vyhodnoceny a graficky znázorněny.

Tab. 11. Hodnoty měření podle HRC

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HRC	26,65	26,91	27,60	26,29	28,99	28,90	29,68	30,39	27,93	28,24
e [μm]	146,71	146,19	144,81	147,43	142,03	142,21	140,65	139,23	144,15	143,53

$\varphi = 28,16 \text{ HRC}; 143,69 \text{ μm}$

$s = 0,42 \text{ HRC}; 0,85 \text{ μm}$

n – číslo měření

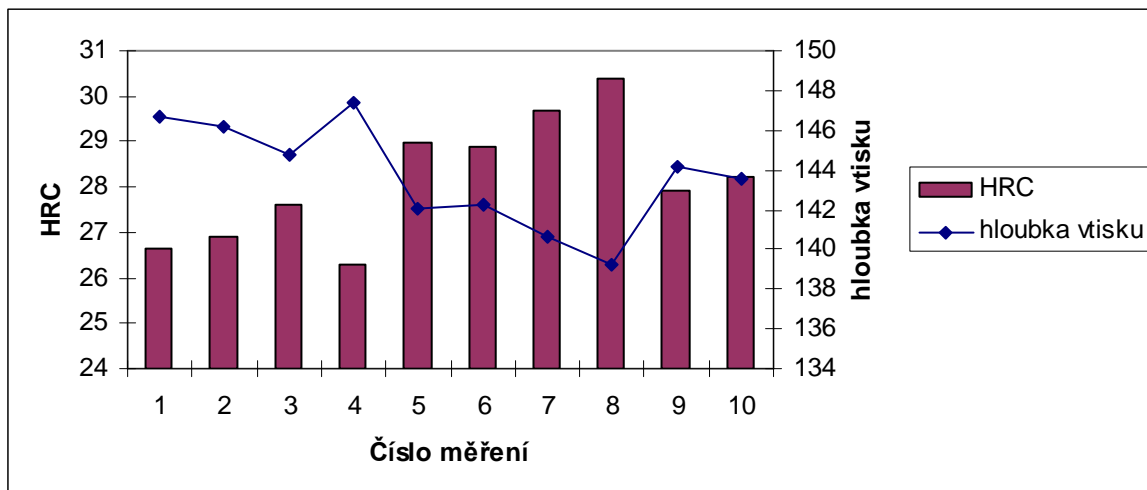
HRC – stupnice tvrdosti

e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka

Z naměřených hodnot (obr.27) vyplývá, že průměrná hodnota tvrdosti pro hodnotu HRC byla  $28,16 \pm 0,42 \text{ HRC}$  a hloubka vtisku vnikacího tělíška byla  $143,69 \pm 0,85 \text{ μm}$ . Změřená tvrdost odpovídá tvrdosti zušlechtěného materiálu.



Obr. 27. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HRC

Měření tvrdosti metodou HR45N bylo prováděno za stejných podmínek jako HRC. Na zkušební vzorku byl provedeno 10 měření, výsledky byly vyhodnoceny a graficky zpracovány (obr.28). Naměřené výsledky ukazují průměrnou hodnotu tvrdosti  $30,83 \pm 0,69$  HR45N a hloubky vtisku vnikacího tělíška  $69,17 \pm 0,69 \mu\text{m}$ . To odpovídá hodnotě tvrdosti materiálu 14 220 tepelně zpracovaného - zušlechťováním.

Tab. 12. Hodnoty měření podle HR45N

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HR45N	32,61	34,89	32,52	31,19	30,1	29,35	31,57	30,15	28,34	27,6
e [μm]	67,39	65,11	67,48	68,81	69,9	70,65	68,43	69,85	71,66	72,4

$\varphi = 30,83$  HR45N;  $69,17 \mu\text{m}$

$s = 0,69$  HR45N;  $0,69 \mu\text{m}$

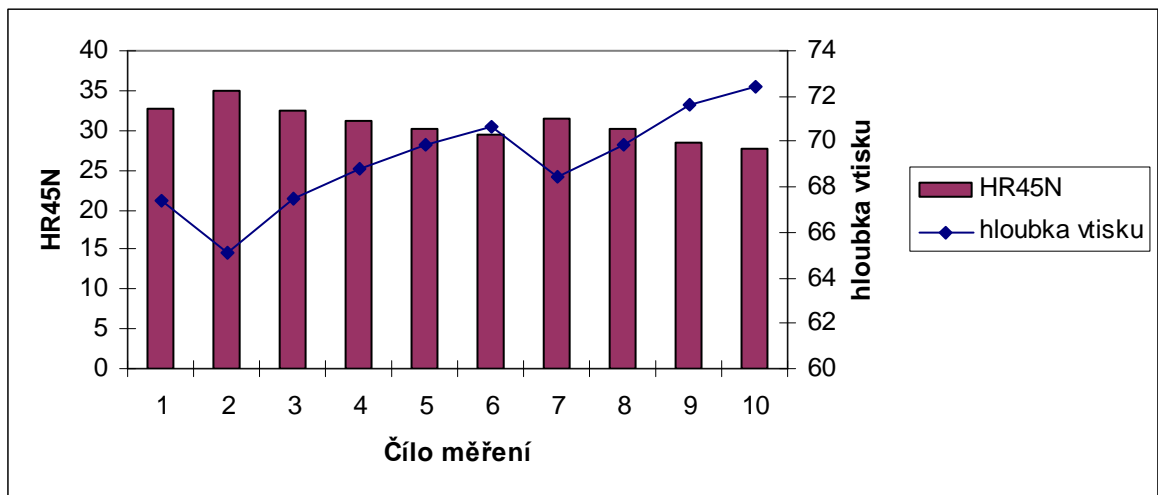
n – číslo měření

HR45N – stupnice tvrdosti

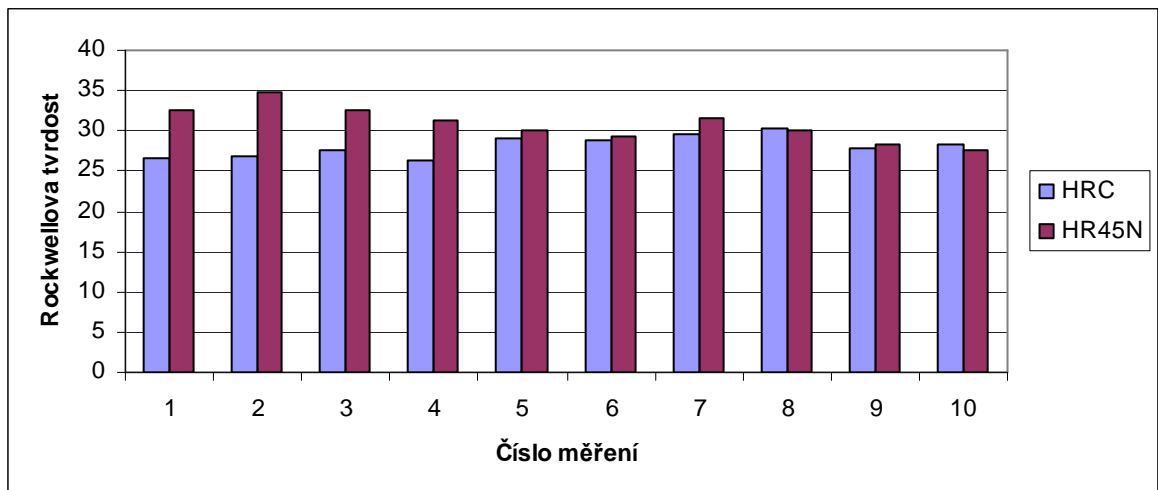
e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 28. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HR45N



Obr. 29. Rozdílná tvrdost mezi HRC a HR45N

### 6.1.2 Měření podle Vickerse HV30

Při měření tvrdosti podle Vickerse byla použita metoda HV 30 a zkušební vzorek byl měřen 10krát. Naměřené výsledky byly vyhodnoceny a graficky zpracovány (obr.30). Z naměřených výsledků vyplývá, že průměrná tvrdost je  $294,2 \pm 1,28$  HV30 s velikostí úhlopříček  $d_1 = 0,4352 \pm 0,0014$  mm a  $d_2 = 0,4336 \pm 0,0012$  mm, což odpovídá tvrdosti oceli 14220 po tepelném zpracování – zušlechťování.



Tab. 13. Hodnoty měření metodou HV30

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>HV30</b>	292,3	288,7	291,1	293,5	291,1	295,9	291,3	299,6	297,1	300,9
<b>d<sub>1</sub>[mm]</b>	0,4363	0,4434	0,4363	0,4345	0,4345	0,4309	0,4416	0,4309	0,4309	0,4327
<b>d<sub>2</sub>[mm]</b>	0,4363	0,4345	0,4291	0,4363	0,4398	0,4363	0,4309	0,4309	0,4345	0,4273

$\varphi = 294,2$  HV30; 0,4352 mm; 0,4336 mm

$s = 1,28$  HV30; 0,0014 mm; 0,0012 mm

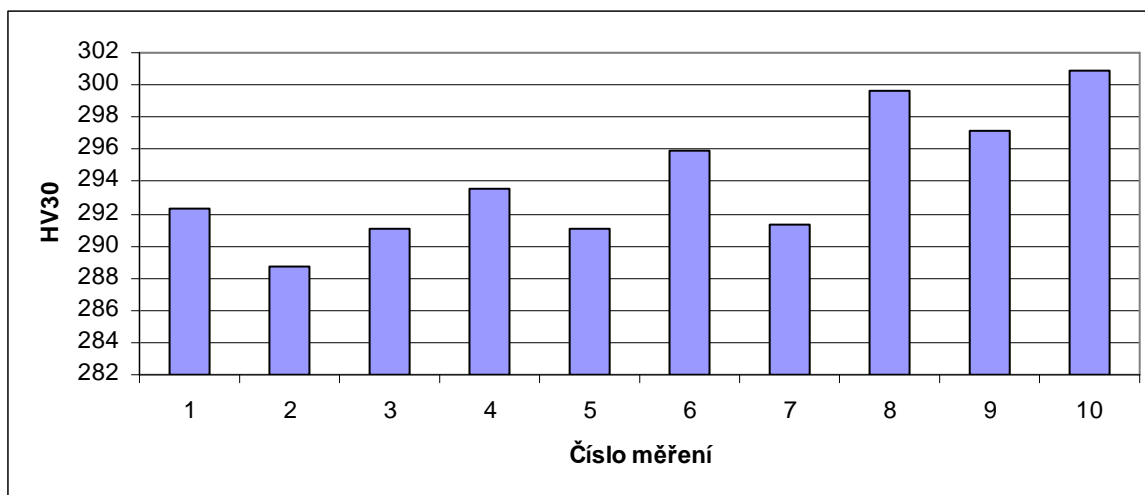
n – číslo měření

HV30 – stupnice tvrdosti

e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

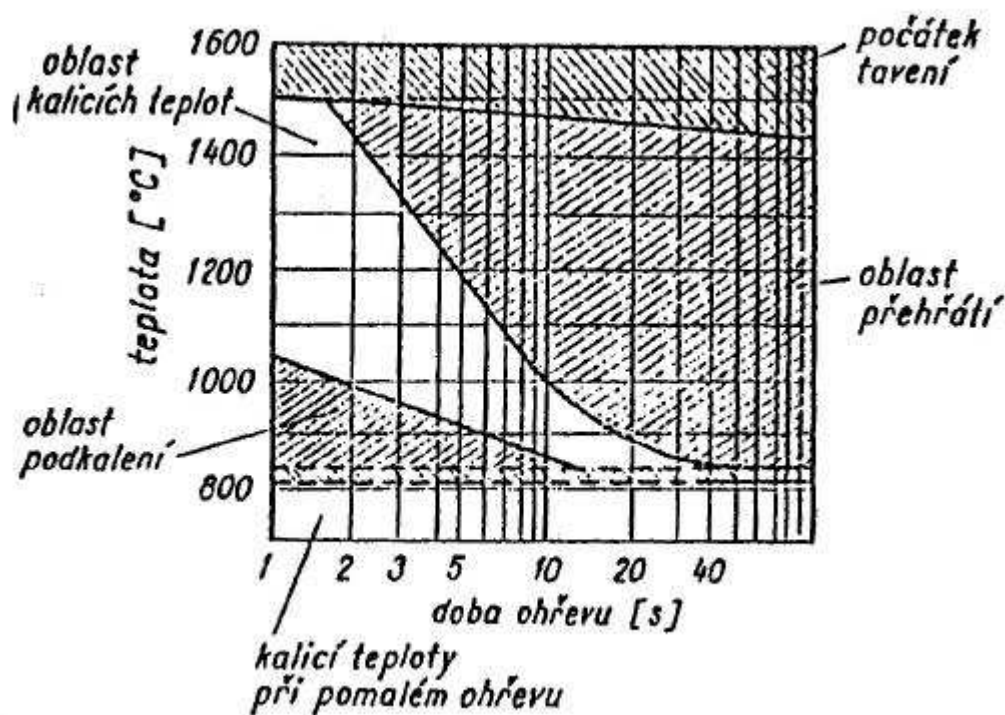
s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 30. Hodnoty Vickersovy zkoušky

## 7 POVRCHOVĚ KÁLENÁ OCEL

Cílem povrchového kalení je zvýšit tvrdost povrchu při zachování dostatečně houževnatého jádra kaleného předmětu. Rozlišných vlastností povrchu a jádra se dosahuje nečastěji rychlým ohřevem povrchové vrstvy na kalící teplotu a jejím zakalením. Struktura zakalené vrstvy je martenzitická, kdežto jádro, v němž nešlo k překrystalizaci, je tvořeno měkčí a houževnatější výchozí strukturou. Má-li se na kalící teplotu ohřát pouze povrchová vrstva, musí být ohřev dostatečně intenzivní, v našem případě na 930°C, rychlost ohřevu musí být vysoká a doba krátká (voda). Značný teplotní spád a strukturní nerovnoměrnost v průřezu vyvolávají v povrchově kaleném předmětu značná pnutí. K jejich snížení se obvykle používá popouštění za nízkých teplot ( $\approx 160^\circ\text{C}$ ). [3]



Obr. 31. Vliv rychlosti ohřevu na kalící teplotu při povrchovém kalení [3]



Obr. 32. Povrchově kalený zkušební vzorek

## 7.1 Vyhodnocení tvrdosti povrchově kaleného vzorku

### 7.1.1 Měření podle Rockwella HRC, HR45N

Pro měření tvrdosti byl zvoleny dva typy zkoušek tvrdosti (Rockwell). Vzorek byl měřen 10krát jak metodou HRC tak metodou HR45N. Výsledky byly vyhodnoceny a graficky znázorněny.

Tab. 14. Hodnoty měření podle HRC

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HRC	38,85	40,08	41,24	40,53	42,95	43,26	40,55	42,54	42,43	42,95
e [μm]	122,31	119,84	117,52	118,95	114,11	113,49	118,9	114,92	115,15	114,11

$\varphi = 41,54 \text{ HRC}; 116,93 \text{ } \mu\text{m}$

$s = 0,47 \text{ HRC}; 0,95 \text{ } \mu\text{m}$

n – číslo měření

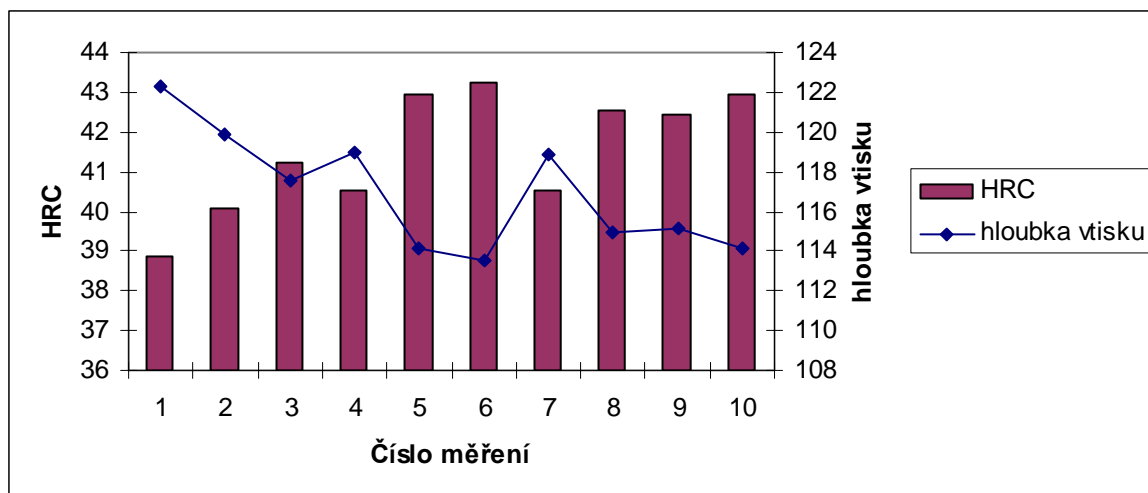
HRC – stupnice tvrdosti

e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka

Z naměřených hodnot (obr.33.) vyplývá, že průměrná hodnota tvrdosti pro hodnotu HRC byla  $41,54 \pm 0,47$  HRC a hloubka vtisku vnikacího tělíska byla  $116,93 \pm 0,95$   $\mu\text{m}$ . Změřená tvrdost odpovídá tvrdosti materiálu s povrchově kalenou vrstvou.



Obr. 33. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HRC

Měření tvrdosti metodou HR45N bylo prováděno za stejných podmínek jako HRC. Na zkušebním vzorku byl provedeno 10 měření, výsledky byly vyhodnoceny a graficky zpracovány (obr.34). Naměřené výsledky ukazují průměrnou hodnotu tvrdosti  $49,67 \pm 0,43$  HR45N a hloubky vtisku vnikacího tělíska  $50,34 \pm 0,43$   $\mu\text{m}$ . To odpovídá hodnotě tvrdosti materiálu 14 220 povrchově zakaleného

Tab. 15. Hodnoty měření podle HR45N

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HR45N	51,95	51,19	49,2	48,63	48,06	49,35	50,58	50,81	48,16	48,72
e [ $\mu\text{m}$ ]	48,05	48,81	50,8	51,37	51,94	50,65	49,42	49,19	51,84	51,28

$\phi = 49,67$  HR45N;  $50,34$   $\mu\text{m}$

$s = 0,43$  HR45N;  $0,43$   $\mu\text{m}$

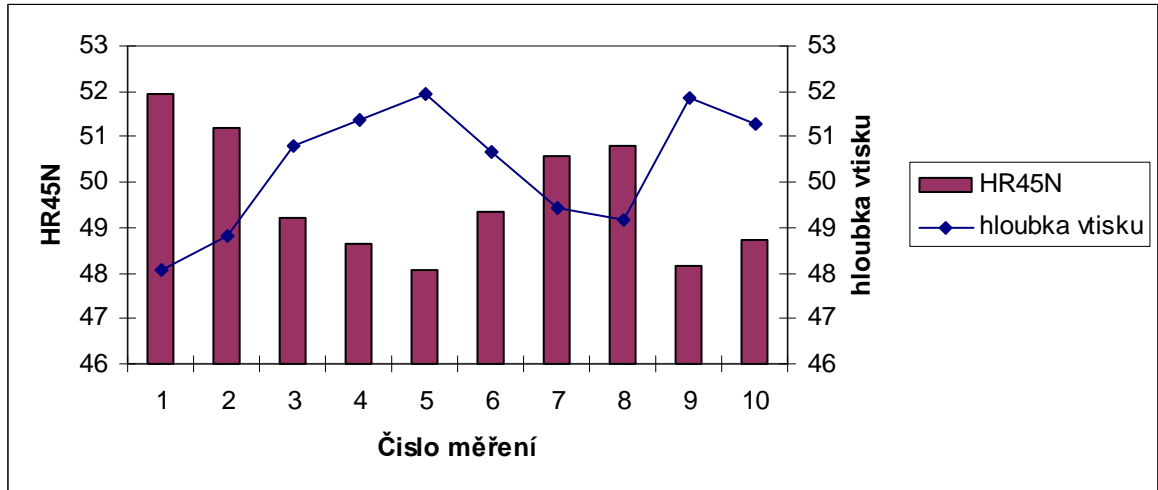
n – číslo měření

HR45N – stupnice tvrdosti

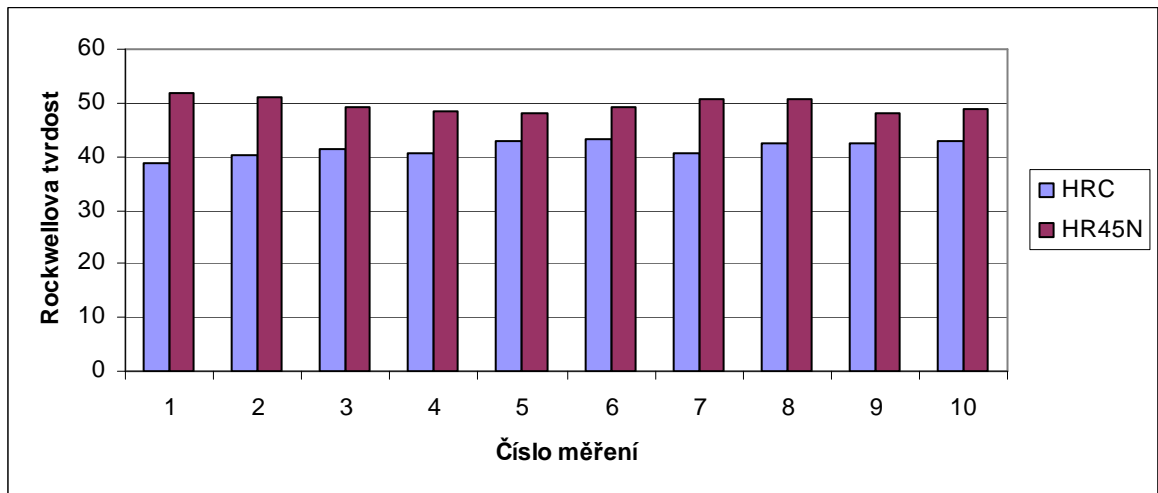
e – hloubka vtisku

$\phi$  – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 34. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HR45N



Obr. 35. Rozdílná tvrdost mezi HRC a HR45N

### 7.1.2 Měření podle Vickerse HV30

Při měření tvrdosti podle Vickerse byla použita metoda HV 30 a zkušební vzorek byl měřen 10krát. Naměřené výsledky byly vyhodnoceny a graficky zpracovány (obr.36). Z naměřených výsledků vyplývá, že průměrná tvrdost je  $460,3 \pm 4,71$  HV30 s velikostí úhlopříček  $d_1 = 0,3494 \pm 0,0021$  mm a  $d_2 = 0,3461 \pm 0,0023$  mm, což odpovídá tvrdosti oceli 14220 po tepelném zpracování – povrchovém kalení.

Tab. 16. Hodnoty měření metodou HV30

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV30	448,4	453	469,6	477	482	446,1	453	479,5	446,1	448,4
$d_1$ [mm]	0,3576	0,3504	0,3451	0,3397	0,3433	0,3594	0,3487	0,3469	0,3576	0,3451
$d_2$ [mm]	0,3469	0,3504	0,3433	0,3433	0,3361	0,3469	0,3522	0,3344	0,3487	0,3594

$\varphi = 460,3$  HV30; 0,3494 mm; 0,3461 mm

$s = 4,71$  HV30; 0,0021 mm; 0,0023 mm

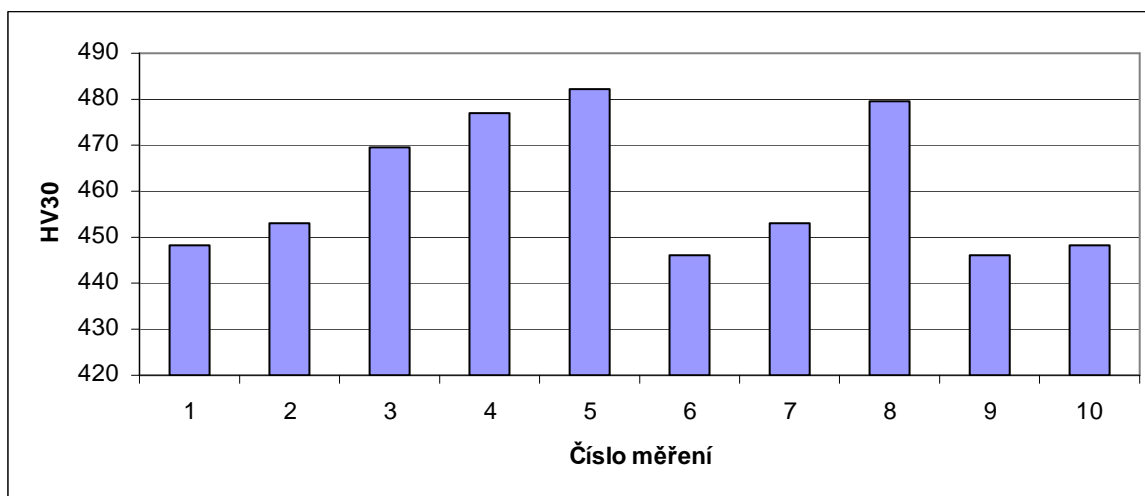
n – číslo měření

HV30 – stupnice tvrdosti

e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

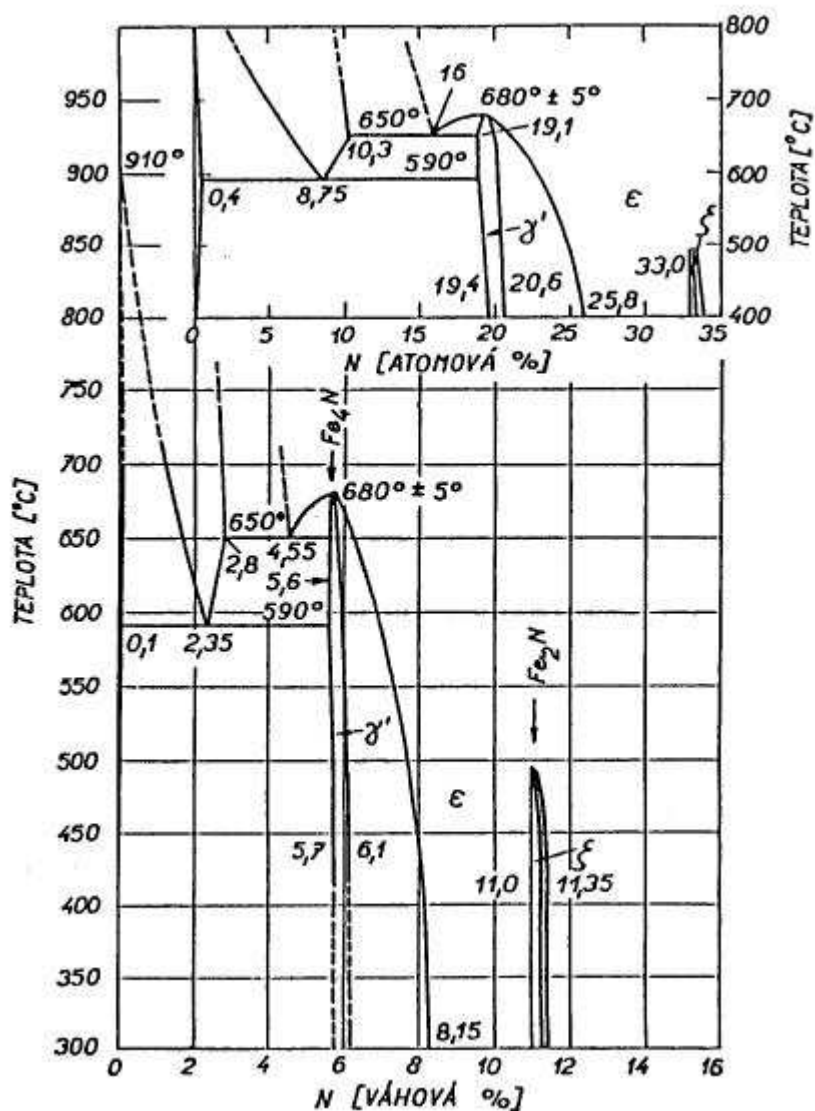
s – směrodatná odchylka



Obr. 36. Hodnoty Vickersovy zkoušky

## 8 NITRIDOVANÁ OCEL

Nitridování označuje chemicko-tepelné zpracování, při němž se tenká povrchová vrstva oceli nasycuje dusíkem. Jeho cílem je získat vysokou tvrdost povrchu a houževnaté jádro. Požadovaných vlastností povrchu se dosahuje již během vlastního sycení, tzn. bez následujícího tepelného zpracování, v důsledku vzniku jemných a velmi tvrdých intersticiálních chemických sloučenin dusíku se železem a s některými přísadovými kovy (zpravidla nitridy nebo karbonitridy).[4] V našem případě byla součást nejprve zušlechtěna, tzn. bylo provedeno kalení na teplotu 860°C a ochlazení ve vodní lázni. Následné popouštění bylo realizováno na teplotě 550°C. Vlastní nitridování proběhlo za teploty 510°C při době trvání 45 hodin.



Obr. 37. Rovnovážný diagram Fe-N [8]



Obr. 38. Vzorek  
s nitridovanou vrstvou

## 8.1 Vyhodnocení tvrdosti

### 8.1.1 Měření podle Rockwella HRC, HR45N

Pro měření tvrdosti byl zvoleny dva typy zkoušek tvrdosti (Rockwell). Vzorek byl měřen 10krát jak metodou HRC tak metodou HR45N. Výsledky byly vyhodnoceny a graficky znázorněny.

Tab. 17. Hodnoty měření podle HRC

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HRC	42,4	43,8	44,3	42,57	44,82	43,68	41,69	44,37	44,63	45,24
e [ $\mu\text{m}$ ]	115,2	112,4	111,4	114,86	110,37	112,64	116,62	111,26	110,74	109,52

$\varphi = 43,75 \text{ HRC}; 112,50 \mu\text{m}$

$s = 0,37 \text{ HRC}; 0,74 \mu\text{m}$

n – číslo měření

HRC – stupnice tvrdosti

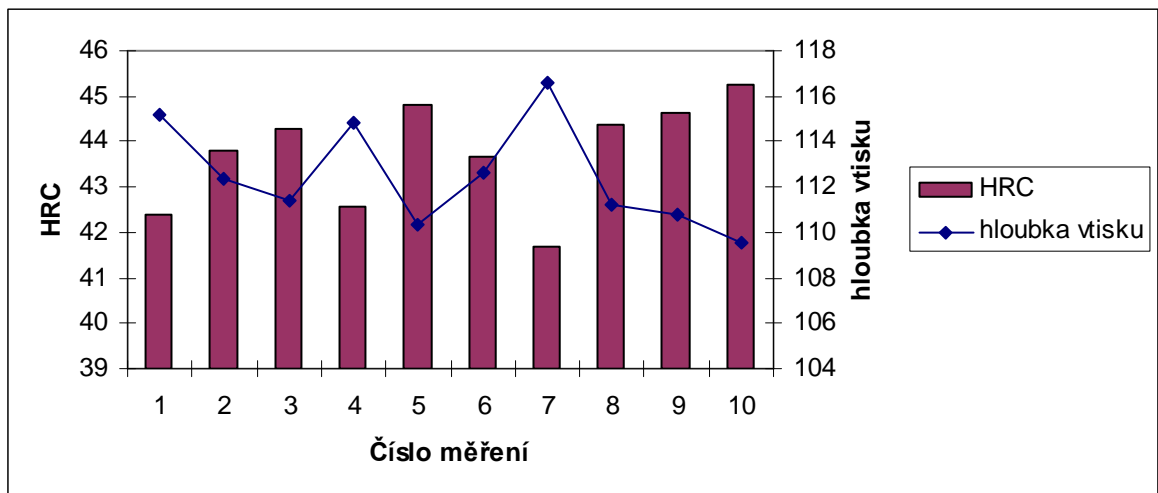
e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka

Z naměřených hodnot (obr.39.) vyplývá, že průměrná hodnota tvrdosti pro hodnotu HRC byla  $43,75 \pm 0,37 \text{ HRC}$  a hloubka vtisku vnikacího tělíška byla  $112,50 \pm 0,74 \mu\text{m}$ . Změřená tvrdost odpovídá tvrdosti materiálu s nitridovanou vrstvou.





Obr. 39. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HRC

Měření tvrdosti metodou HR45N bylo prováděno za stejných podmínek jako HRC. Na zkušebním vzorku byl provedeno 10 měření a výsledky byly vyhodnoceny a graficky zpracovány (obr.40). Naměřené výsledky ukazují průměrnou hodnotu tvrdosti  $65,07 \pm 0,35$  HR45N a hloubky vtisku vnikacího tělíška  $34,93 \pm 0,35 \mu\text{m}$ . To odpovídá hodnotě tvrdosti materiálu 14 220 s nitridovanou vrstvou.

Tab. 18. Hodnoty měření podle HR45N

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HR45N	63,7	65,5	64,27	65,17	63,13	64,74	66,74	65,93	65,6	65,88
e [ $\mu\text{m}$ ]	36,3	34,5	35,73	34,83	36,87	35,26	33,26	34,07	34,4	34,12

$\varphi = 65,07$  HR45N;  $34,93 \mu\text{m}$

$s = 0,35$  HR45N;  $0,35 \mu\text{m}$

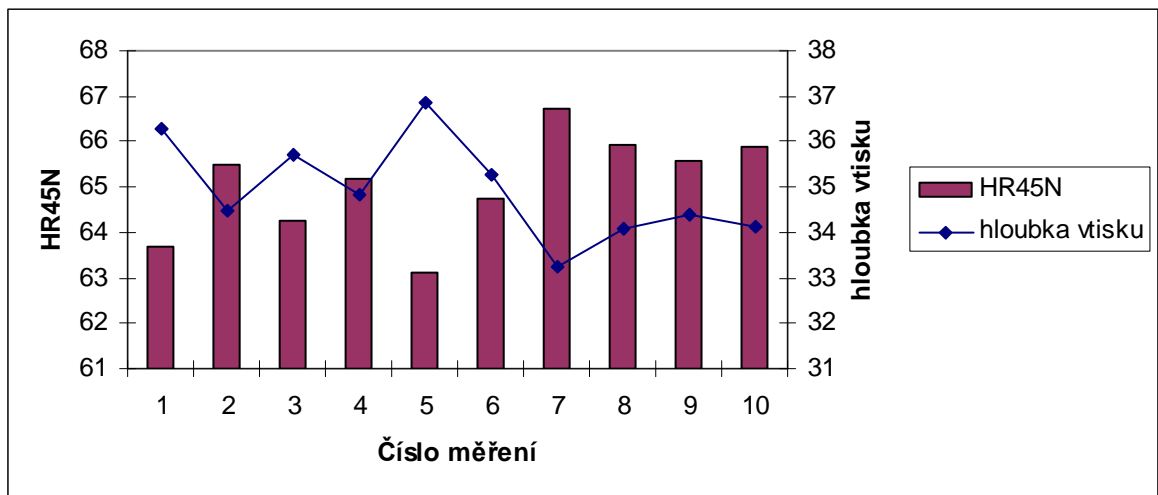
n – číslo měření

HR45N – stupnice tvrdosti

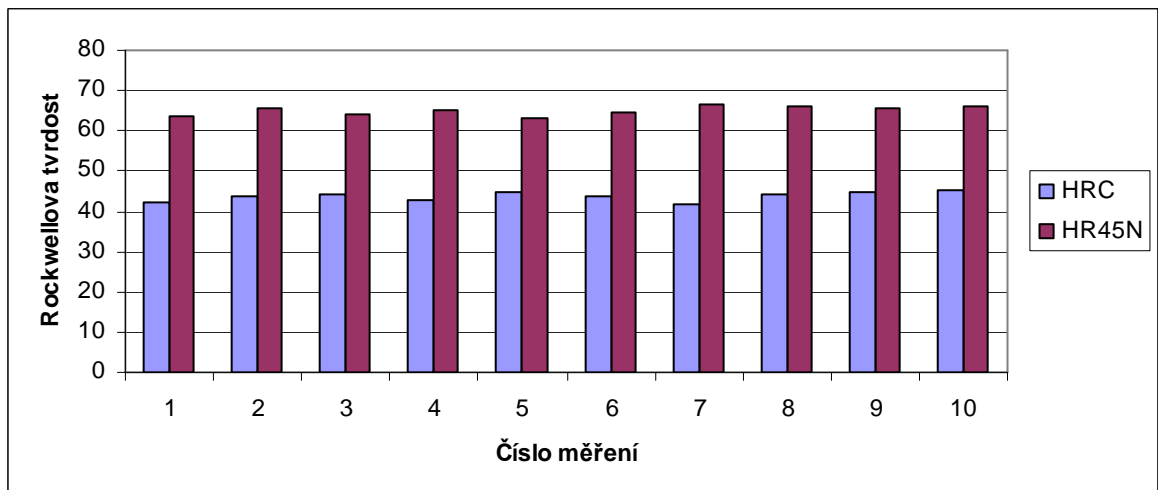
e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – směrodatná odchylka



Obr. 40. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HR45N



Obr. 41. Rozdílná tvrdost mezi HRC a HR45N

### 8.1.2 Měření podle Vickerse HV30

Při měření tvrdosti podle Vickerse byla použita metoda HV 30 a zkušební vzorek byl měřen 10krát. Naměřené výsledky byly vyhodnoceny a graficky zpracovány (obr.42). Z naměřených výsledků vyplývá, že průměrná tvrdost je  $747,61 \pm 5,88$  HV30 s velikostí úhlopříček  $d_1 = 0,2720 \pm 0,0013$  mm a  $d_2 = 0,2738 \pm 0,0014$  mm, což odpovídá tvrdosti oceli 14220 po tepelném zpracování – nitridování.

Tab. 19. Hodnoty měření metodou HV30

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>HV30</b>	773,4	743,4	738,6	743,4	743,4	729	738,6	789,1	738,6	738,6
<b>d<sub>1</sub>[mm]</b>	0,27	0,2718	0,2771	0,2718	0,2682	0,2771	0,2754	0,2646	0,27	0,2736
<b>d<sub>2</sub>[mm]</b>	0,2664	0,2754	0,2718	0,2754	0,2789	0,2754	0,2736	0,2664	0,2789	0,2754

$\varphi = 747,61$  HV30; 0,2720 mm; 0,2738 mm

$s = 5,88$  HV30; 0,0013 mm; 0,0014 mm

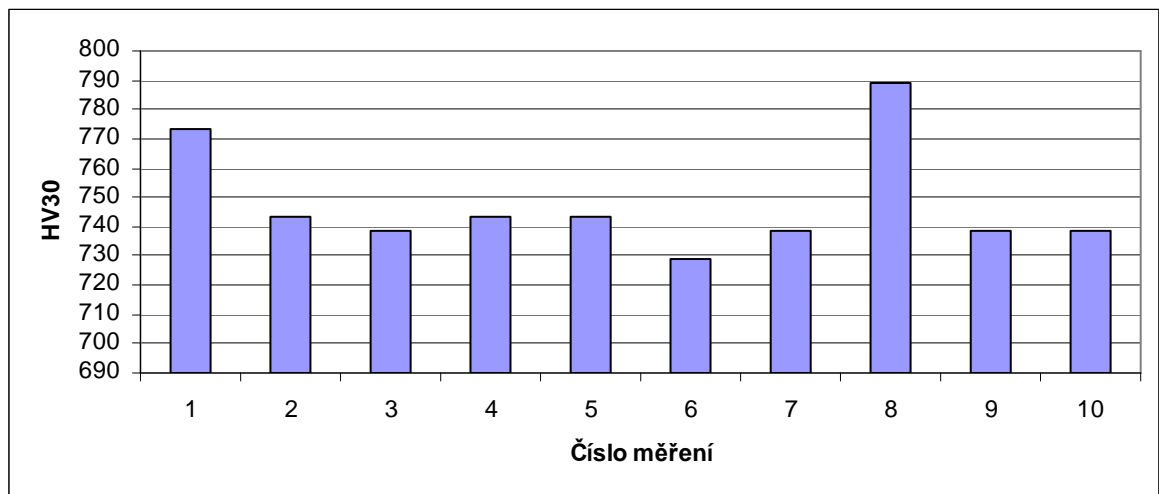
n – číslo měření

HV30 – stupnice tvrdosti

e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – směrodatná odchylka



Obr. 42. Hodnoty Vickersovy zkoušky

## 9 CEMENTOVANÁ A KALENÁ OCEL

Cementováním se označuje způsob chemicko-tepelného zpracování, při kterém se povrch oceli sytí uhlíkem na eutektoidní, popř. těsně nadeutektoidní koncentraci (obvykle 0,8 až 1,0 hm. % uhlíku). Vysoké povrchové tvrdosti cementovaných součástí (až 800 HV) se dosahuje jejich následným kalením a nízkoteplotním popouštěním, zatímco jádro zůstává relativně houževnaté. Sycení uhlíkem se provádí při teplotách nad  $A_{C3}$ , v našem případě byla teplota cementování  $930^{\circ}\text{C}$  při výdrži 4 hodiny, kdy je struktura cementační oceli austenitická, ve které je podstatně vyšší rozpustnost uhlíku než ve feritu. Optimální kalící teplota nauhličené vrstvy leží  $30 - 50^{\circ}\text{C}$  nad  $A_{C1}$  (u našeho dílu byly použity teploty  $830^{\circ}\text{C}$ ). Při této teplotě se však jádro kalí ze struktury feriticko-austenitické, což vede mj. k poklesu jeho houževnatosti. Bude-li kalící teplota odpovídat nominálnímu chemickému složení oceli ( $30 - 50^{\circ}\text{C}$  nad  $A_{C3}$ ), pak v cementované vrstvě bude hrubý martenzit a vysoký obsah zbytkového austenitu spolu s vysokou úrovní vnitřních pnutí. Závěrečnou operací tepelného zpracování cementovaných součástí je nízkoteplotní popouštění při teplotách  $150$  až  $200^{\circ}\text{C}$  (pro náš zkušební vzorek byla zvolena teplota  $180^{\circ}\text{C}$ ) po dobu 1 až 2 h, které vede ke snížení vnitřních pnutí a ke stabilizaci struktury. Tvrdost cementovaných vrstev dosahuje hodnot 60 až 62 HRC. [4]



*Obr. 43. Vzorek cementovaný a kalený*

## 9.1 Vyhodnocení tvrdosti

### 9.1.1 Měření podle Rockwella HRC, HR45N

Pro měření tvrdosti byl zvoleny dva typy zkoušek tvrdosti (Rockwell). Vzorek byl měřen 10krát jak metodou HRC tak metodou HR45N. Výsledky byly vyhodnoceny a graficky znázorněny.

Tab. 20. Hodnoty měření podle HRC

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HRC	62,9	62,57	62,38	62,33	63,02	62,63	62,83	62,52	64,08	63,23
e [μm]	74,2	74,84	75,25	75,34	73,97	74,74	74,35	74,97	71,84	73,55

$\varphi = 62,85 \text{ HRC}; 74,31 \text{ } \mu\text{m}$

$s = 0,16 \text{ HRC}; 0,33 \text{ } \mu\text{m}$

n – číslo měření

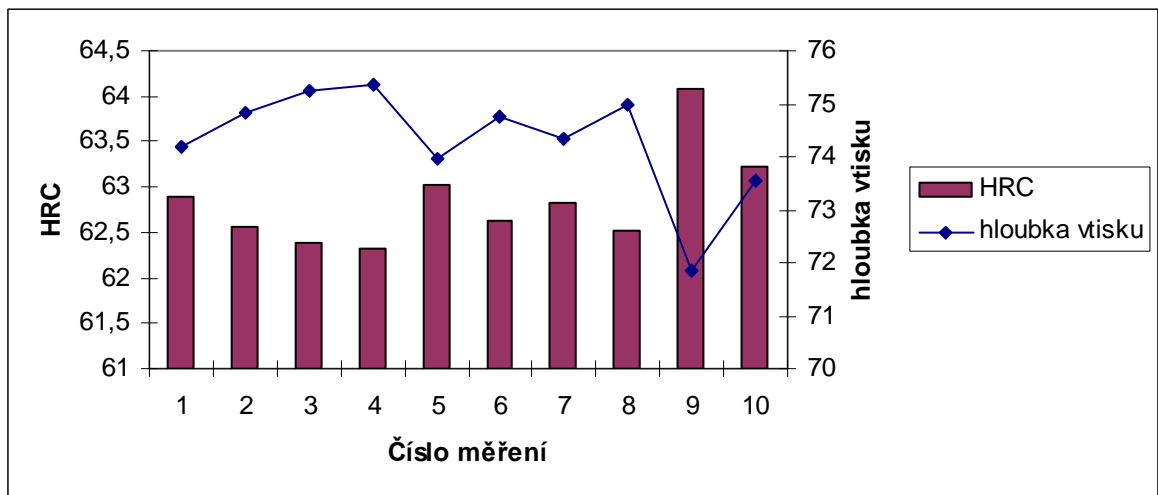
HRC – stupnice tvrdosti

e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka

Z naměřených hodnot (obr.44.) vyplývá, že průměrná hodnota tvrdosti pro hodnotu HRC byla  $62,85 \pm 0,16 \text{ HRC}$  a hloubka vtisku vnikacího tělíška byla  $74,31 \pm 0,33 \text{ } \mu\text{m}$ . Změřená tvrdost odpovídá tvrdosti cementovaného materiálu.



Obr. 44. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HRC

Měření tvrdosti metodou HR45N bylo prováděno za stejných podmínek jako HRC. Na zkušebním vzorku byl provedeno 10 měření a výsledky byly vyhodnoceny a graficky zpracovány (obr.45). Naměřené výsledky ukazují průměrnou hodnotu tvrdosti  $70,10 \pm 0,40$  HR45N a hloubky vtisku vnikacího tělíska  $29,90 \pm 0,40 \mu\text{m}$ . To odpovídá hodnotě tvrdosti materiálu 14 220 s cementovanou vrstvou.

Tab. 21. Hodnoty měření podle HR45N

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HR45N	71,23	72,51	70,24	71,47	69,86	69,06	69,15	68,87	69,86	68,77
e [ $\mu\text{m}$ ]	28,77	27,49	29,76	28,53	30,14	30,94	30,85	31,13	30,14	31,23

$\varphi = 70,10$  HR45N;  $29,90\mu\text{m}$

$s = 0,40$  HR45N;  $0,40 \mu\text{m}$

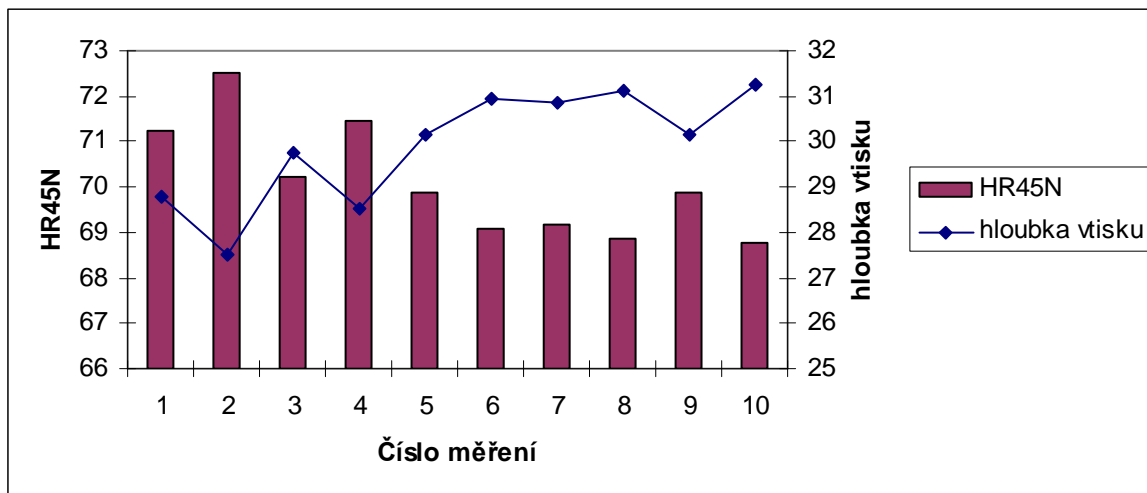
n – číslo měření

HR45N – stupnice tvrdosti

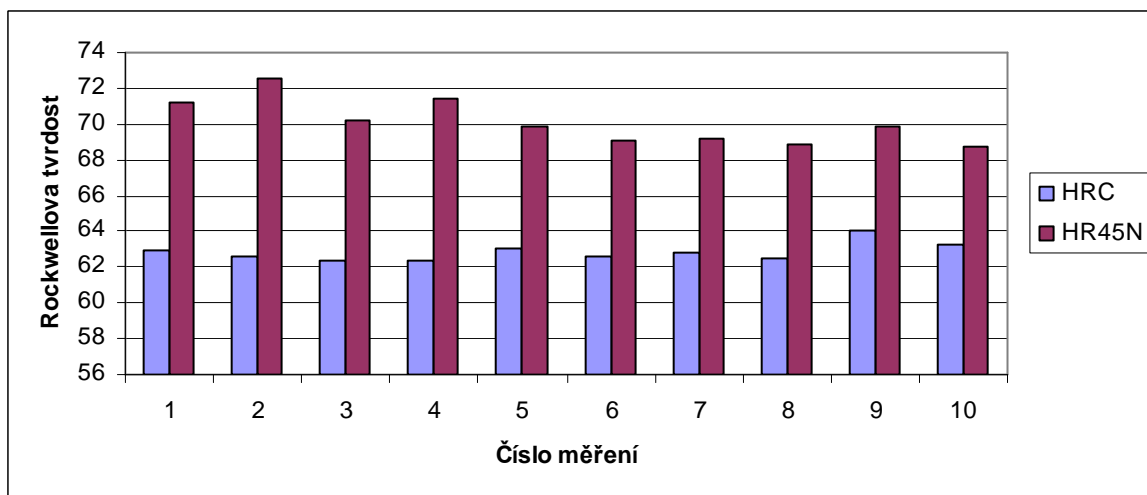
e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



Obr. 45. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HR45N



Obr. 46. Rozdílná tvrdost mezi HRC a HR45N

### 9.1.2 Měření podle Vickerse HV30

Při měření tvrdosti podle Vickerse byla použita metoda HV 30 a zkušební vzorek byl měřen 10krát. Naměřené výsledky byly vyhodnoceny a graficky zpracovány (obr.47). Z naměřených výsledků vyplývá, že průměrná tvrdost je  $796,71 \pm 3,42$  HV30 s velikostí úhlopříček  $d_1 = 0,2639 \pm 0,0012$  mm a  $d_2 = 0,2648 \pm 0,0012$  mm, což odpovídá tvrdosti oceli 14220 po tepelném zpracování – cementování.

Tab. 22. Hodnoty měření metodou HV30

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>HV30</b>	778,6	805,3	805,3	799,9	810,8	783,8	789,1	799,9	805,3	789,1
<b>d<sub>1</sub>[mm]</b>	0,2736	0,2593	0,261	0,2628	0,2646	0,2646	0,261	0,2646	0,2646	0,2628
<b>d<sub>2</sub>[mm]</b>	0,2610	0,2664	0,2646	0,2646	0,2593	0,2682	0,2700	0,2628	0,2593	0,2682

$\varphi = 796,71$  HV30; 0,2639 mm; 0,2648 mm

$s = 3,42$  HV30; 0,0012 mm; 0,0012 mm

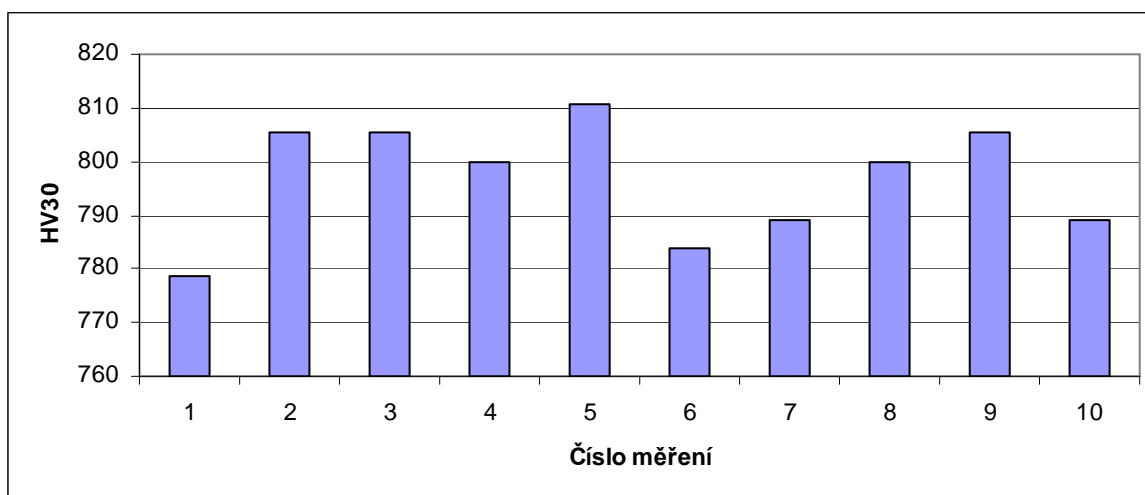
n – číslo měření

HV30 – stupnice tvrdosti

e – hloubka vtisku

$\varphi$  – aritmetický průměr

s – empirická směrodatná odchylka



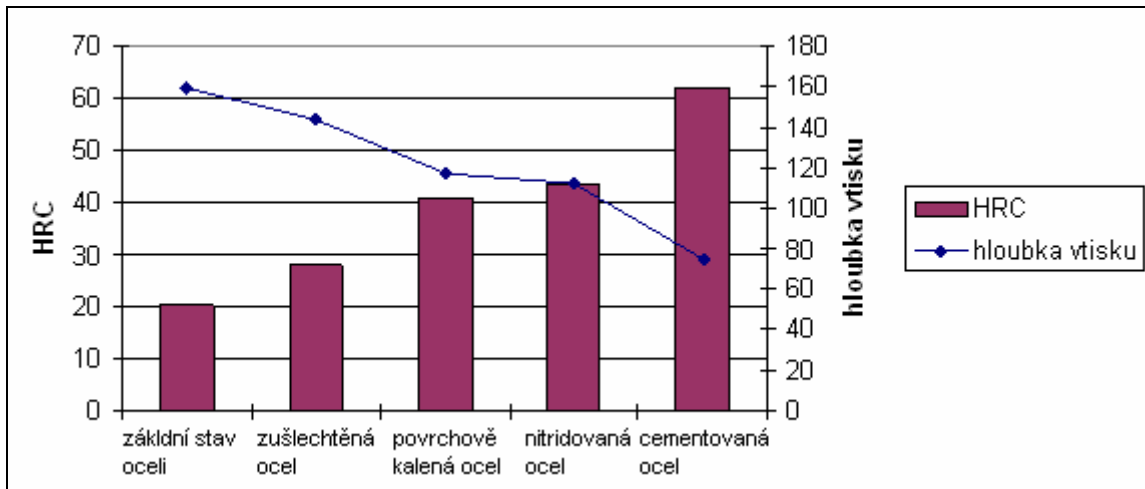
Obr. 47. Hodnoty Vickersovy zkoušky



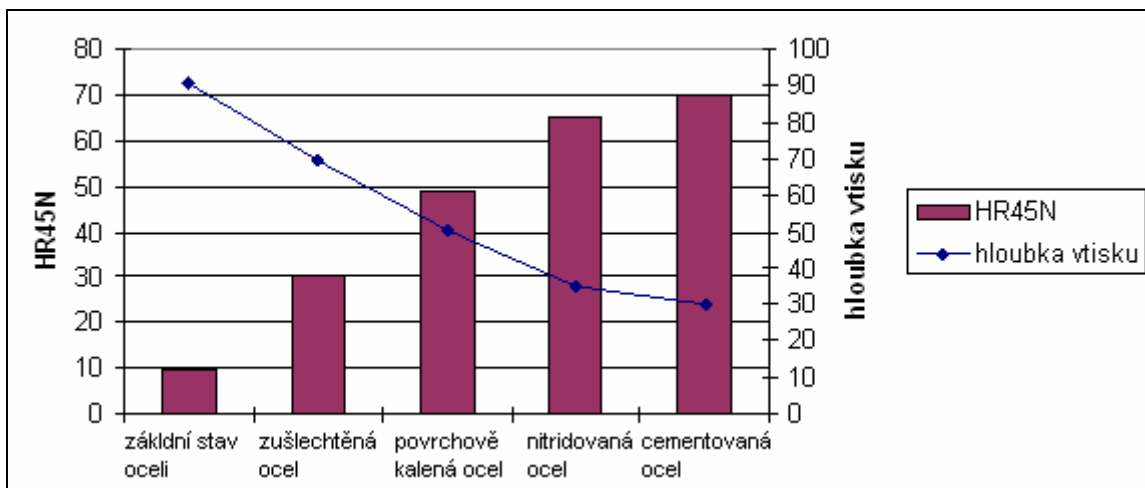
## 10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V experimentální části byly provedeny zkoušky tvrdosti tepelně a chemicko-tepelně zpracované oceli 14 220 a nezpracovaného materiálu 14 220. Měření tvrdosti bylo realizováno Rockwellovou a Vickersovou zkouškou. U Rockwellovy zkoušky bylo použito dvou typů zatížení a to HRC – větší zatížení a HR45N – menší zatížení pro určení tvrdosti velmi tenkých vrstev (nitridované, povrchově kalené). Pro zkoušky tvrdosti bylo vybráno 5 typů zkušebních vzorků z oceli 14220 kdy tento materiál byl tepelně nezpracován, nitridován, nacementován + zakalen, povrchově kalen a zušlechtěn. Na každém takto upraveném zkušebním vzorku bylo vždy provedeno 10 měření jednotlivým typem zkoušky tvrdosti (Rockwell, Vickers). Výsledky měření byly zpracovány a grafiky vyhodnoceny. Z naměřených výsledků vyplývá, že nejmenší tvrdost byla naměřena u tepelně nezpracovaného zkušebního vzorku oceli 14220. Jak výsledky zkoušek podle Rockwella tak hodnoty zkoušek podle Vickerse odpovídají struktuře základního materiálu 14220. U zušlechtěného vzorku byla naměřena tvrdost 28 HRC a stejná hodnota tvrdosti byla naměřena podle Vickerse. To ukazuje, že daný zkušební vzorek byl skutečně tepelně zpracován (zušlechtěn) a tím došlo ke změně jeho původní struktury. Výsledky tvrdosti u tohoto zkoušeného vzorku vykazují vyšší hodnoty, než byly naměřeny u základního materiálu. U vzorku, který byl povrchově zakalen, bylo naměřeno jak metodou podle Rockwella tak podle Vickerse hodnoty tvrdosti odpovídající zakalené vrstvě. U tohoto typu zkušebního vzorku byl naměřen určitý rozdíl mezi HRC a HR45N. To je způsobeno tím, že povrchově zakalená vrstva má velmi malou tloušťku a metodou HRC mohlo dojít k částečnému proniknutí zkušebního tělíska touto zakalenou vrstvou. Jelikož je zatížení u metody HR45N daleko menší, nedošlo k propíchnutí povrchové vrstvy a tudíž byla naměřena větší hodnota tvrdosti. Ta koresponduje s tvrdostí naměřenou metodou Vickers. U zkušebního vzorku, u kterého byla použita technologie nitridace, nebyla metodou HRC naměřena skutečná tvrdost povrchové vrstvy. To bylo způsobeno tím, že povrchová vrstva je velmi tenká (cca 0,01 mm) a při použití metody HRC došlo k jejímu proniknutí. Použitá metoda HR45N však již naměřila příslušnou hodnotu tvrdosti, protože zkušební tělísko proniklo do velmi malé hloubky - což bylo způsobeno malým zatížením.

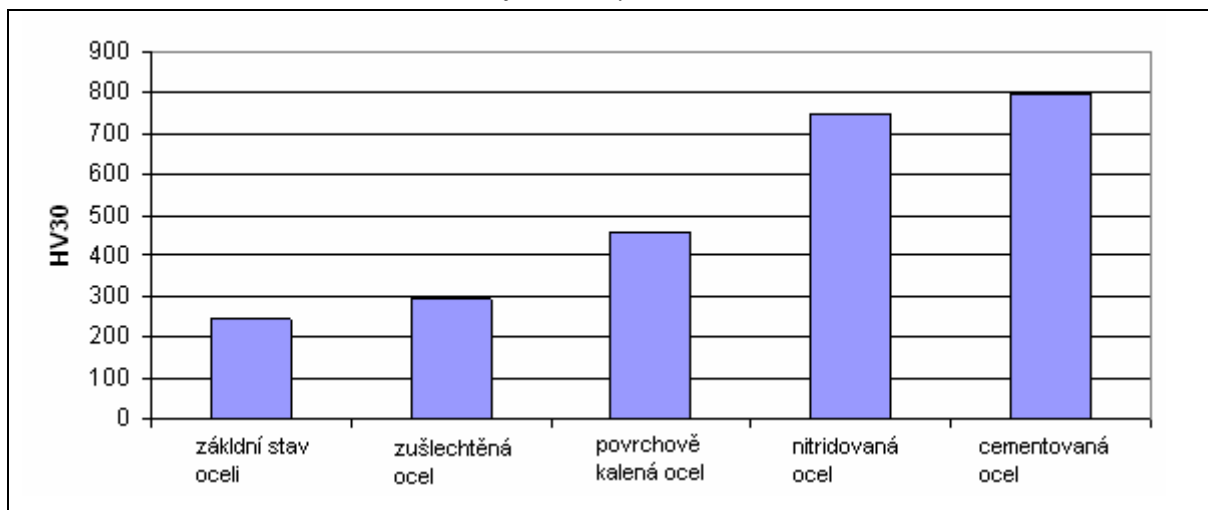
Nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo u zkušebního vzorku, který byl nacementován a posléze zakalen. U všech zkoušek tvrdosti byla naměřena největší hodnota, což bylo způsobeno větší nacementovanou tloušťkou a použitím vhodných metod měření tvrdosti.



Obr. 48. Srovnání jednotlivých tvrdostí HRC



Obr. 49. Srovnání jednotlivých tvrdostí HR45N



Obr. 50. Srovnání jednotlivých tvrdostí HV30

## ZÁVĚR

Bakalářská práce řeší problém měření tvrdosti kovů (ocel 14 220). Měření tvrdosti probíhalo u tepelně nezpracovaného materiálu, tepelně zpracovaného a chemicko-tepelně zpracovaného materiálu. Každý zkušební vzorek byl měřen vždy 10krát metodou Rockwella a Vickerse. U metody Rockwell bylo použito dvou typů zatížení (malé a vysoké).

Měřením tvrdosti bylo prokázáno, že nejměkčích hodnot bylo dosaženo u základního materiálu. Naopak nejvyšších hodnot bylo dosaženo u zkušební vzorku, který byl cementován a následně zakalen. U povrchového kalení a zušlechťování bylo naměřeno menších hodnot tvrdosti. Nitridovaná vrstva dosáhla druhých nejvyšších hodnot tvrdosti, ale je zde nutné použít správnou metodu měření metodu HR45N. Při použití metody HRC dochází k proražení tenké nitridované vrstvy.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Juniormat 97 (Sborník přednášek a posterů)*. 1. vyd. Ostrava: REPRONIS, 1997. 217 s. ISBN 80-86122-04-02
- [2] PÍŠEK F. *Nauka o materiálu II (1. svazek)*. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. 660 s. bez ISBN
- [3] PLUHAŘ J. a kol. *Nauka o materiálech*. vyd. Praha: SNTL, 1989. 552 s. bez ISBN
- [4] PTÁČEK L. a kol. *Nauka o materiálu II*. 2 vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 385 s. ISBN 80-7204-248-3
- [5] ŘASA J., ŠVERCL J. *Strojnické tabulky II*. 1 vyd. Praha: Nakladatelství SCIENTIA, spol. s.r.o, 2007. 586 s. ISBN 978-80-86960-20-3
- [6] *Zkoušky základních mechanických vlastností kovů*. vyd. Ostrava: Dům techniky ČSVTS, 1988. 293 s. bez ISBN
- [7] ATEAM, [online]. 2005 [cit. 2008-04-18]. Dostupné z : <[www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)>
- [8] CONVERTER, [online]. 2002 [cit. 2008.04-18]. Dostupné z : <[www.converter.cz](http://www.converter.cz)>
- [9] KMN, [online]. 2005 [cit. 2008-04-18] Dostupné z: <[www.kmn.zcu.cz](http://www.kmn.zcu.cz)>
- [10] METROTEST, s.r.o Kladno. [online]. 1994 [cit. 2008-04-18]. Dostupné z : <[www.metrotest.cz/hardness/zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.metrotest.cz/hardness/zkousky_tvrlosti.pdf)>
- [11] MM, *průmyslové spektrum*. [online]. 1997 [cit. 2008-04-18] Dostupné z: <[www.mmspektrum.com/clanek/mereni-tvrdsoti-odlitku-dynamickou-metodou](http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-tvrdsoti-odlitku-dynamickou-metodou)>
- [12] PROINEX INSTRUMENTS. s.r.o [online]. 2007 [cit. 2008-04-18] Dostupné z: <[www.proinenexinstruments.com/pristroje/tvrdomery-materialu-e3](http://www.proinenexinstruments.com/pristroje/tvrdomery-materialu-e3)>
- [12] QUIDO. [online]. 2003 [cit. 2008-04-18] Dostupné z: <<http://www.quido.cz/mereni/brinell.htm>>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A(h)	Plocha vtisku.
C	Cementování
D	Průměr kuličky.
d	Průměr vtisku.
$d_1$	Délka úhlopříčky.
$d_1$	Délka úhlopříčky.
$d_{1,2}$	Aritmetický průměr úhlopříček $d_1, d_2$ .
e	Hloubka vtisku.
F	Zkušební síla.
h	Hloubka vtisku.
K	Kalení
$K_1$	Korekční konstanta tvrdoměru
$K_2$	Korekční konstanta tvrdoměru
l	Délka úhlopříčky
n	Číslo měření
NŽ	Normalizační žíhání
s	Empirická směrodatná odchylka
u	Průměrná hodnota úhlopříčky
ŽM	Žíhání na měkko
$\alpha$	Úhel spuštění zkušebního tělíska
$\beta$	Úhel odrazu zkušebního tělíska
$\varphi$	Aritmetický průměr

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Zkouška dle Brinella [7]</i> .....	13
<i>Obr.2. Průběh zkušebního zatížení – metoda Brinell [10]</i> .....	14
<i>Obr. 3. Závislost tvrdosti HB na velikosti zátěžné síly [9]</i> .....	15
<i>Obr. 4. Minimální tloušťka vzorku u metody Brinell [10]</i> .....	18
<i>Obr. 5. Zkouška dle Rockwella [8]</i> .....	21
<i>Obr. 6. Průběh zkušebního zatížení – metoda Rockwell [10]</i> .....	22
<i>Obr. 7. Průběh zkušebního zatížení [10]</i> .....	26
<i>Obr. 8. Schéma zkoušky dle Vickerse - deformace vtisku [7]</i> .....	27
<i>Obr. 9. Inder dle Knoopa [2]</i> .....	30
<i>Obr. 10. Schéma Hanemannova mikrotvrdoměru [7]</i> .....	32
<i>Obr. 11. Indentační křivka [7]</i> .....	33
<i>Obr. 12. Zkouška tvrdosti Poldiho kladívkem [7]</i> .....	35
<i>Obr. 13. Poldino kladívko [8]</i> .....	36
<i>Obr. 14. Shoreho skleroskop[7]</i> .....	38
<i>Obr. 15. Duroskop [7]</i> .....	40
<i>Obr. 16. Schématické znázornění vrypové zkoušky [7]</i> .....	42
<i>Obr. 17. Easydur italiana</i> .....	45
<i>Obr. 18. Měřicí hlava</i> .....	46
<i>Obr. 19. Schematický postup Rockwellovy zkoušky</i> .....	47
<i>Obr. 20. Schématický postup Vickersovy zkoušky</i> .....	48
<i>Obr. 21. Zkušební vzorek z oceli 14 220</i> .....	49
<i>Obr. 22. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HRC</i> .....	50
<i>Obr. 23. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HR45N</i> .....	51
<i>Obr. 24. Rozdílná tvrdost mezi HRC a HR45N</i> .....	51
<i>Obr. 25. Hodnoty Vickersovy zkoušky</i> .....	52
<i>Obr. 26. Zkušební vzorek z ušlechtilé oceli</i> .....	53
<i>Obr. 27. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HRC</i> .....	55
<i>Obr. 28. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HR45N</i> .....	56
<i>Obr. 29. Rozdílná tvrdost mezi HRC a HR45N</i> .....	56
<i>Obr. 30. Hodnoty Vickersovy zkoušky</i> .....	57
<i>Obr. 31. Vliv rychlosti ohřevu na kalící teplotu při povrchovém kalení [3]</i> .....	58

<i>Obr. 32. Povrchově kalený zkušební vzorek .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 33. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HRC .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 34. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HR45N .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 35. Rozdílná tvrdost mezi HRC a HR45N .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 36. Hodnoty Vickersovy zkoušky .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 37. Rovnovážný diagram Fe-N [8] .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 38. Vzorek s nitridovanou vrstvou .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 39. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HRC .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 40. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HR45N .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 41. Rozdílná tvrdost mezi HRC a HR45N .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 42. Hodnoty Vickersovy zkoušky .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 43. Vzorek cementovaný a kalený.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 44. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HRC .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 45. Závislost tvrdosti na hloubce vtisku podle HR45N .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 46. Rozdílná tvrdost mezi HRC a HR45N .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 47. Hodnoty Vickersovy zkoušky .....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 48. Srovnání jednotlivých tvrdostí HRC .....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 49. Srovnání jednotlivých tvrdostí HR45N.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 50. Srovnání jednotlivých tvrdostí HV30 .....</i>	<i>74</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Vztah průměru kuličky a zatěžující síly u metody Brinell [10]</i> .....	16
<i>Tab. 2. Volba poloměru <math>0,102F/D^2</math> pro různé materiály [10]</i> .....	17
<i>Tab. 3. Vnikací těla a zkušební síly pro různé metody Rockwell [10]</i> .....	23
<i>Tab. 4. Členění metody Vickers [10]</i> .....	25
<i>Tab. 5. Zkušební zatížení pro zkoušku dle Vickerse [10]</i> .....	28
<i>Tab. 6. Srovnání Mohsovy mineralogické stupnice a materiálů ve strojírenství [2]</i> .....	41
<i>Tab. 7. Použité metody při měření materiálů</i> .....	45
<i>Tab. 8. Hodnoty měření podle HRC</i> .....	49
<i>Tab. 9. Hodnoty měření podle HR45N</i> .....	50
<i>Tab. 10. Hodnoty měření metodou HV30</i> .....	52
<i>Tab. 11. Hodnoty měření podle HRC</i> .....	54
<i>Tab. 12. Hodnoty měření podle HR45N</i> .....	55
<i>Tab. 13. Hodnoty měření metodou HV30</i> .....	57
<i>Tab. 14. Hodnoty měření podle HRC</i> .....	59
<i>Tab. 15. Hodnoty měření podle HR45N</i> .....	60
<i>Tab. 16. Hodnoty měření metodou HV30</i> .....	62
<i>Tab. 17. Hodnoty měření podle HRC</i> .....	64
<i>Tab. 18. Hodnoty měření podle HR45N</i> .....	65
<i>Tab. 19. Hodnoty měření metodou HV30</i> .....	67
<i>Tab. 20. Hodnoty měření podle HRC</i> .....	69
<i>Tab. 21. Hodnoty měření podle HR45N</i> .....	70
<i>Tab. 22. Hodnoty měření metodou HV30</i> .....	72