

# MĚŘENÍ TVRDOSTI KOVŮ

Kristina Eliášová

---

Bakalářská práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kristina ELIÁŠOVÁ**  
Osobní číslo: **T08213**  
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Měření tvrdosti kovů**

Zásady pro vypracování:

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

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího BP**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. David Maňas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**14. února 2011**

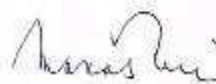
Termín odevzdání bakalářské práce:

**3. června 2011**

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



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



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

Příjmení a jméno: KRISTINA ELIÁŠOVÁ

Obor: PE, technologie zařízení

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby<sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhajení práce.

Ve Zlíně ...BAT... 2011...



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

<sup>2)</sup> Vysoká škola nevykademálně zveřejňuje diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledků obhajoby prostřednictvím datové kvalifikačních prací. Merou správně, způsobem zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Dílelační, ojčimové, bakalářské a inženýrské práce odezvané umazečem k obhajobě musí být lež neměné při pracovním dle před konáním obhajoby zveřejněny k natižení veřejnosti v místě určeném vnitřím předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě uračoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpis, opisy nebo rozmnoženiny.

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

4. zákon č. 127/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvazících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3;

(3) Do práva autorského také nevazuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, zájez nikoli za účelem přiměru nebo nepřiměru hospodářského nebo náhodného prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dle vyvozené školem nebo studiem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (škola dle).

5. zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvazících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 66 školní dle;

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy a užít školního dle (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového dle udělit svolení bez vádného důvodu, mohou se tyto osoby domádat nahrazení nabytějšího projevu jeho vůle u soudu, ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního dle z výdělku jin rozděleného v souvislosti s užítím dle či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vyváření dle vynaložil, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíží k výši výdělku rozděleného školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užítí školního dle podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Cílem bakalářské práce je porovnat standartní metody měření tvrdosti kovů u vybraných typů kovových materiálů, které jsou tepelně, chemicko-tepelně zpracovány. Teoretická část je zaměřena na problematiku měření tvrdosti kovů, určení kladů i záporů té či oné metody.

V praktické části porovnááme naměřené výsledky jednotlivých vzorků.

Klíčová slova: tvrdost, indentor, tepelné zpracování

## **ABSTRACT**

The goal of my Bachelor work is to compare standard methods of metal hardness measurement for chosen metal material types, that are treated by heat or chemically-heat operation. The first theoretic part deals with metal hardness measurement questions and accomplishments and negatives determination of both methods. In the operative part there are compared measured results of individual samples.

Keywords: hardness, indenter, heat treatment

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

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 VLASTNOSTI KOVŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	12
<b>2 TVRDOST</b> .....	<b>13</b>
<b>3 STATICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI</b> .....	<b>14</b>
3.1 VNIKACÍ ZKOUŠKY .....	14
3.1.1 Brinell.....	15
3.1.2 Ludwikova zkouška.....	17
3.1.3 Vickers .....	18
3.1.4 Knoop.....	21
3.1.5 Rockwell .....	21
3.2 VRYPOVÉ ZKOUŠKY .....	24
3.2.1 Mohsova stupnice.....	24
3.2.2 Martens.....	25
3.2.3 Buchholzova metoda.....	25
<b>4 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY</b> .....	<b>26</b>
4.1 Kladívko Poldi .....	26
4.2 Baumannovo kladívko.....	27
4.3 Shoreho skleroskop .....	27
4.4 Durosokop .....	28
4.5 Leebeho tvrdoměr.....	29
4.6 Ultrazvuková metoda (UCI).....	29
4.7 Moderní dynamické tvrdoměry .....	29
<b>5 TEPELNÉ A CHEMICKO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ</b> .....	<b>31</b>
5.1 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	31
5.1.1 Kalení a popouštění.....	31
5.2 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	32
5.2.1 Cementování .....	32
5.2.2 Karbonitridování .....	33
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>34</b>
<b>6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>35</b>



6.1	CÍL PRÁCE .....	35
6.2	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ.....	35
6.3	POSTUP MĚŘENÍ.....	36
6.4	ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA .....	38
<b>7</b>	<b>ZÁKLADNÍ MATERIÁL.....</b>	<b>39</b>
7.1	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ ZÁKLADNÍHO ZKUŠEBNÍHO VZORKU – OCELI 12 060.....	39
<b>8</b>	<b>OCEL 11 353 CEMENTOVÁNA .....</b>	<b>41</b>
8.1	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ CEMENTOVANÉHO ZKUŠEBNÍHO VZORKU, OCELI 11 353.....	41
<b>9</b>	<b>OCEL 12 060 KALENÁ.....</b>	<b>43</b>
9.1	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ KALENÉHO ZKUŠEBNÍHO VZORKU, OCELI 12 060.....	43
<b>10</b>	<b>OCEL 11 353 KARBONITRIDOVÁNA .....</b>	<b>44</b>
10.1	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ KARBONITRIDOVANÉHO ZKUŠEBNÍHO VZORKU, OCELI 11 353.....	44
<b>11</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>46</b>
11.1	POROVNÁNÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HRA .....	46
11.2	POROVNÁNÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HRC .....	47
11.3	POROVNÁNÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HR15N .....	47
11.4	POROVNÁNÍ TVRDOSTI MĚŘENÉ METODOU HR30N .....	48
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>50</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>51</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>55</b>

## ÚVOD

Začátkem 19. století se začíná rozvíjet technika, zavádí se nové stroje a technologie do výroby. Objevují se dokonce nové materiály (litá ocel). Rozvoj zaznamenává také stavba železnic, parních kotlů, dochází k rozvoji obrábění. Spolu s tím se začínají objevovat i první negativní signály ohledně životnosti, vlivu únavy, dynamického namáhání těchto materiálů. Dochází k výbuchu parních kotlů lokomotiv (např.: r. 1871 na železnici v Bohumíně). Kolejnice se po čase lámou, korodují. Abychom se tedy ubezpečili v tom, že daný materiál má všechny předpoklady pro dané použití, do technické praxe se zavádějí mechanické zkoušky a mezi nimi i měření tvrdosti.

Měření tvrdosti můžeme provádět dvěma způsoby. U přímé metody zkoušíme hotové součástky. Výsledek nám sice zaručí nejlepší obraz o průběhu namáhání ale metoda je velmi zdlouhavá, nákladná a výsledky nejsou porovnatelné s jinými zkouškami. Metoda nepřímá naopak dává porovnatelné hodnoty s jinými zkouškami stejného druhu, je rychlá, spolehlivá. Zkouší se na normalizovaných vzorcích zkoušeného materiálu. Jedná se o tvrdoměrné kalibrované destičky kdy se naměřené údaje mají shodovat s certifikovanou hodnotou v mezích 0,5%.



*Obr. 1 . Výbuch parního kotle*

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 VLASTNOSTI KOVŮ

Zkoušení materiálů je v praxi nezbytnou součástí kontroly jakosti pro dodavatele i odběratele. Na každý materiál používaný v praxi působí vnější síly, namáhání. Aby tomuto namáhání mohl materiál odolávat, musí mít určité vlastnosti. Určujeme je především z hlediska chemického složení a struktury. Vlastnosti materiálu jsou dány již v prvovýrobě metalurgie a dělíme je na:

- fyzikální (teplotní roztažnost, měrné teplo, magnetismus),
- fyzikálně-chemické (elektrochemické, optické, korozní, třecí),
- technologické (tvárnost, obrobitelnost, svařitelnost).
- mechanické (pružnost, pevnost, houževnatost, tvárnost, tvrdost).

### 1.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Vlastnosti určují obecné požadavky na kvalitu materiálu, ukazují schopnost materiálu odolávat mechanickému namáhání. Působením vnějšího zatížení se pevné látky deformují. Jestliže namáhání vzroste nad určitou mez, dochází k jejich porušení.

Pružnost, neboli také elasticitu, vykazuje hmota která se napětím deformuje a po odstranění napětí se vrací do původního stavu.

Pevnost definujeme jako odolnost vůči vnějším silám. Podle způsobu namáhání můžeme mít pevnost v tlaku, tahu, ohybu, stříhu, krutu.

Houževnatost je protikladem křehkosti. Vyjadřujeme jí jako velikost práce potřebné k rozdělení hmoty.

Tvárnost je míra schopnosti měnit tvar působením vnější síly bez porušení soudržnosti. Je typickou vlastností většiny kovů [1].

## 2 TVRDOST

Tvrdot je odolnost materiálu vůči deformaci kterou způsobuje těleso určitého tvaru (kulička, jehlan, hranol) neboli odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Tvrdot v technické praxi není veličina fyzikální, protože není jednoznačně definovatelná. Je výslednicí vlastností hmoty, zejména elasticity, křehkosti a plasticity, fyzikálně chemickými vlastnostmi povrchu i chemických vlastností [1]. Výsledky naměřené na zařízeních o různých principech lze tedy porovnávat jen obecně, bez možnosti vzájemného převodu.

Zkoušky tvrdosti lze rozdělit dle způsobu zatěžující síly na statické a dynamické. Podle účelu měření to jsou zkoušky mikrotvrdosti a makrotvrdosti.

Mikrotvrdostí rozumíme tvrdost určenou použitým malých zatížení (Vickers při zatížení do 2N) a proto naměříme i menší velikost vtisků. Měření mikrotvrdosti je vhodné pro tenké vrstvy. Měří se samotné vrstvy bez vlivu materiálu na kterém je vrstva nanášena. Jsou vhodné k určení rozdílů vnitřků a hranic zrn nebo je nimi lepší určovat vrstvy po chemicko-tepelném zpracování, galvanické povlaky, laky atd.

Zkouškami makrotvrdosti pak rozumíme zatěžující síly vyšší než mikrotvrdostní – tj. od 2N výše.

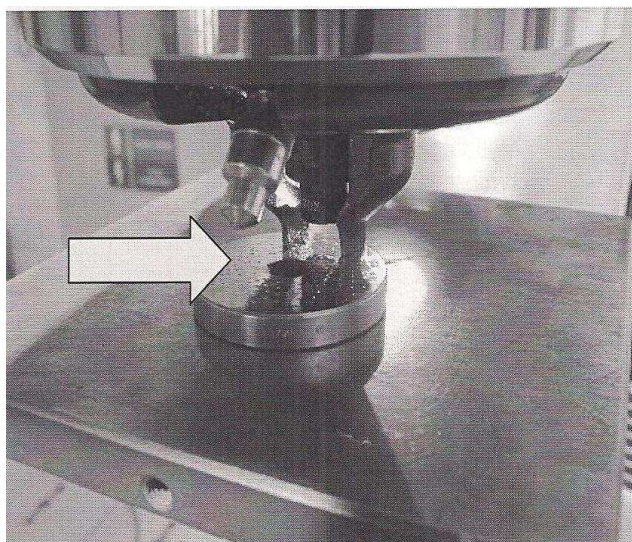
### 3 STATICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI

U statických zkoušek tvrdosti se síla která působí na zkoušený objekt zvyšuje rovnoměrně, bez rázů. K měření používáme přístroje, tzv. tvrdoměry. Ty jsou často konstruovány na měření dvěma metodami. Dochází k porušení povrchu zkoušeného materiálu. Vznikne vtisk, vryp, který změříme mikroskopem. Vnikací těleso musí mít co největší tvrdost. Tyto se dělí na:

- vnikací (Brinell, Rockwell, Vickers),
- vrypové (Martens).

#### 3.1 VNIKACÍ ZKOUŠKY

Jsou založeny na principu vtlačování zkušebního tělíska (kuličky, kuželíku, jehlanu) z oceli či tvrdokovu – slinutý materiál, silou (nejčastěji 3 tuny) po stanovenou dobu (10-15s). Následně je měřen vtisk zanechaný v povrchu, který je převeden na hodnotu tvrdosti. Zkušebnímu tělísku se nazývá obecně indentor.



*Obr. 2. Měření indentorem*

### 3.1.1 Brinell

Vynalezl, vznik: Švéd Johan August Brinell (1848-1925), Paříž r. 1900

Teplota okolí: 10°C -35°C.

Vnikací těleso: Nejčastěji kulička z oceli nebo tvrdokovu.

Zkušební těleso: Alespoň 8 krát silnější ku hloubce vtisku.

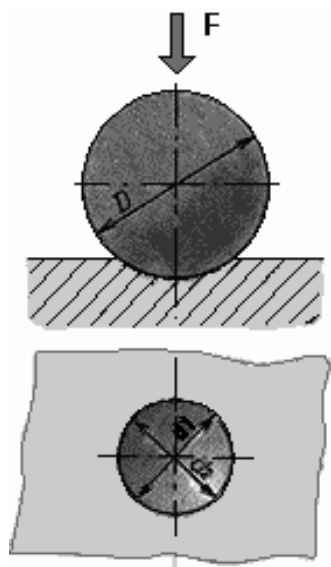
Princip zkoušky:

Zkušební těleso umístíme na tuhou podložku, která musí být čistá, zbavená olejů, nečistot apod. Podložka zabraňuje jakémukoliv posunutí zkušebního tělesa. Kuličku, nejčastěji o průměru 10mm, přivedeme do styku se zkoušeným povrchem až do dosažení předepsané hodnoty zkušebního zatížení. Doba od počátku do konce zatěžování musí být v rozmezí 2-8 s. Výdrž na zkušebním tělese je 10-15 s. Vtisk zachová tvar koule.

Výsledek: Závisí na zkušebních podmínkách, průměru ocelové kuličky, velikosti zatěžující síly a rychlosti zatěžování a na době, po kterou na kuličku síla působí. Výsledek definujeme jako poměr zatěžující síly  $F$  k velikosti plochy vtisku, měří se v Brinellových stupních (HB). Velikostí plochy vtisku se rozumí rozměr dvou průměrů na sebe kolmých ( $d_1$ ,  $d_2$ ) a z nichž vypočtený aritmetický průměr. Oba vtisky určí buď z tabulek, nebo výpočtem tvrdost nebo pevnost zkoušeného materiálu.

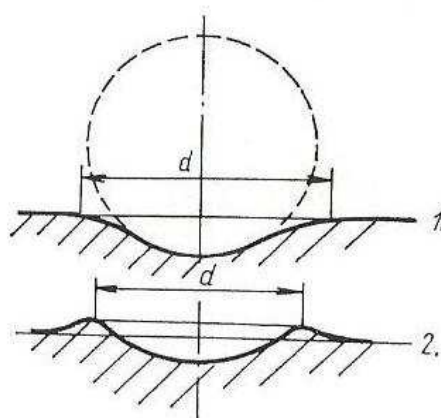
Tab. 1. Značení a symboly [9]

Značka/Zkrácený termín	Význam	Jednotka
$D$	Průměr kuličky	mm
$F$	Zkušební zatížení	N
$d$	Střední průměr vtisku $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$	mm
$d_1, d_2$	Průměry vtisku měřené ve dvou navzájem kolmých směrech	mm
$h$	Hloubka vtisku $h = \frac{D}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - d^2/D^2} \right)$	mm
HBW	Tvrdost podle Brinella = Konstanta $\times \frac{\text{Zkušební zatížení}}{\text{Plocha povrchu vtisku}}$ $\text{HBW} = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D^2 \left( 1 - \sqrt{1 - d^2/D^2} \right)}$	
$0,102 \times F/D^2$	poměr zatížení k průměru	N/mm <sup>2</sup>
POZNÁMKA Konstanta = $0,102 \approx \frac{1}{9,80665}$ , kde 9,806 65 je převodní faktor z kgf na N.		



Obr. 3. Zkouška Brinell

Nevýhody: Měření jen nízkých a středních tvrdostí, zdlouhavém vyčíslování výsledků (Brinellova lupa – zvětšení 6-10x, ruční mikroskop Meopta – zvětšení 50x, pravítkem na matici tvrdoměru – zvětšení až 140x). Další důležitou nevýhodou je nezřetelnost okraje vtisku. Zejména vtažení okraje vtisku u nezpevněného materiálu a vytlačení „valů“ u materiálu zpevněného (viz. obr.). [2]



Obr. 4. - 1. nezpevněný materiál

2. zpevněný materiál



Výhody: Možnost zkoušení heterogenních materiálů (šedá litina).

Použití: Brinellovou metodou se dají zkoušet různé výkovky, odlitky, výlisky nebo polotovary po tepelném zpracování.

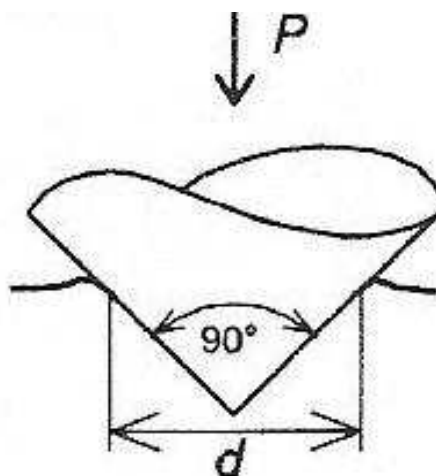
### 3.1.2 Ludwikova zkouška

Vynalezl: Ludwik, r. 1907

Princip zkoušky:

Jelikož tvrdost Brinella je závislá na velikosti zatížení nahradil Ludwik kuličku indentorem ve tvaru kužele s vrcholovým úhlem  $120^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $60^\circ$  z praktických důvodů se zaoblenými vrcholy s poloměrem na 0,2mm. Hodnota tvrdosti je nezávislá na zatížení, protože při všech zatíženích zůstává poměr tangenciálního a normálového napětí.[3]

Zajímavost: Williams zkoušel na mědi zpevnění materiálu v okolí vtisku v souvislosti s vrcholovým úhlem. Zjistil, že při vrcholovém úhlu  $120^\circ$  je nejvíce zpevněno dno vtisku a ke kraji tvrdost rovnoměrně ubývá. Při  $90^\circ$  je tvrdost rozdělena rovnoměrněji s tím, že ve dně je podstatně menší a okraj naopak více zpevněn než v prvním případě. Při  $60^\circ$  toto pokračuje, dno je zpevněno minimálně zatímco deformace v okolí vtisku jsou do značné vzdálenosti výrazné. Tato metoda se však i přes své nesporné výhody neujala, užívá se dnes jen ve speciálních případech [4].



Obr. 5. Ludwikova zkouška

### 3.1.3 Vickers

Vynalezl: R. L. Smith a G. E. Sanland. Název Vickers dostala zkouška od tvrdoměru anglické firmy.

Teplota okolí: 10°C – 35°C.

Vnikací těleso: Diamantový vyleštěný pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136°.

Zkušební těleso: Alespoň 1,5násobek délky úhlopříčky vtisku.

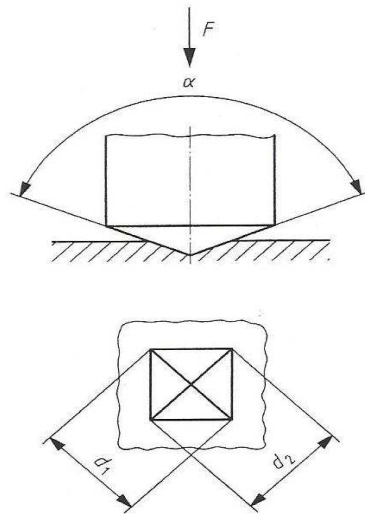
Princip zkoušky:

Opět se musí zkouška provádět na hladkém, rovném povrchu. Bez nečistot, cizích látek, mazadel. Zkušební těleso se musí umístit na tuhou podpěru pevně. Vnikací těleso se přivede ke zkoušenému povrchu silou. Doba od začátku do konce zatěžování je 2 – 8 s. U zkoušek mikrotvrdomosti pak max. 10s. Výdrž na zkušebním tělese je 10-15s

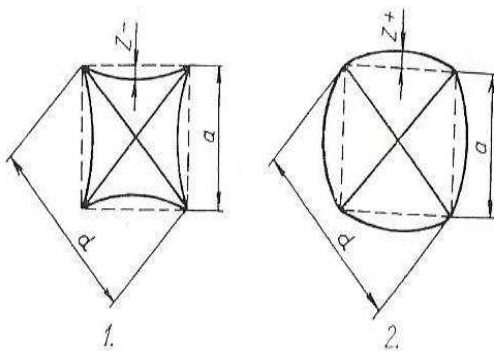
Výsledek: Stejně jako u Brinella se tvrdost měří poměrem zatěžující síly  $F$  (N) k povrchu vtisku  $A$  (mm<sup>2</sup>). Povrchem vtisku opět rozumíme změření dvou rozměrů – úhlopříček na sebe kolmých. Zhruba do 400 HB je možnost převodu tvrdosti HB na HV. Vyšší výsledky se však již rozcházejí.

Tab. 2. Značení a symboly [10]

Značka/ Zkrácený termín	Význam
$\alpha$	Vrcholový úhel protilehlých stran vnikacího tělesa o tvaru jehlanu (136°)
$F$	Zkušební zatížení v newtonech (N)
$d$	Aritmetický průměr délek, v milimetrech, dvou úhlopříček $d_1$ a $d_2$ (viz obrázek 1)
HV	Tvrdost podle Vickerse = Konstanta $\times \frac{\text{Zkušební zatížení}}{\text{Povrch plochy vtisku}} = 0,102 \frac{2F \times \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2}$
POZNÁMKA	Konstanta = 0,102 $\approx 1/9,80665$ , kde 9,80665 je převodní faktor z kgf na N.



Obr. 6. Zkouška Vickers



Obr. 7. - 1. nepevněný mat.

2. zpevněný mat.



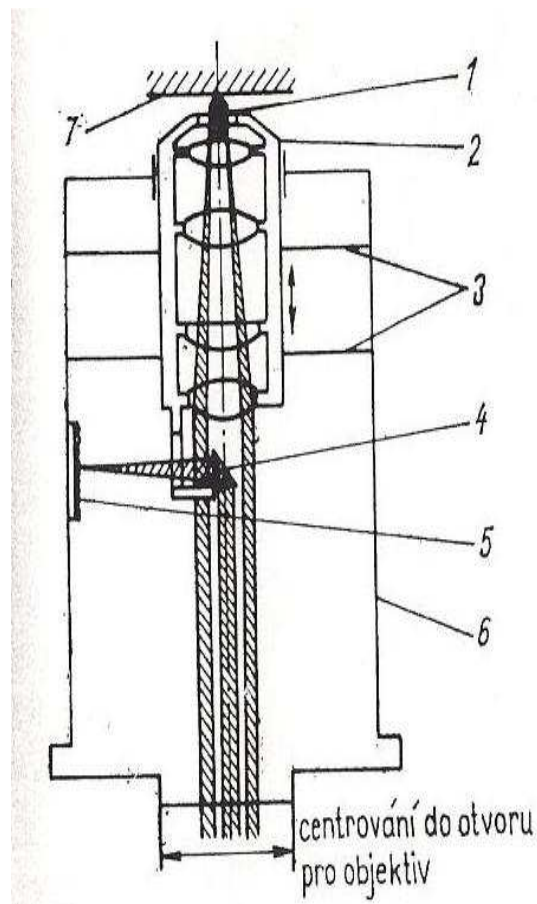
Obr. 8. Tvrdoměr Vickers

Nevýhody: Přesnost výsledků závisí na hladkosti měřeného povrchu (nejlépe jemně broušený, vyleštěný povrch) a na homogenitě zkoušeného materiálu. Nehodí se tedy pro měření tvrdosti hrubé a heterogenní struktury, protože Vickersův mikroskopický vtisk změní jen jednotlivé fáze slitiny, ne celkovou tvrdost slitiny.

Výhody: Výsledky měření tvrdosti teoreticky nezávisí na velikosti zatížení, protože si jsou různě velké vtisky geometricky podobné. Poměr hodnot tvrdosti odpovídá skutečným poměrům tvrdosti, např. kov s tvrdostí 200HV má dvakrát větší tvrdost nežli kov s tvrdostí 100HV. Další výhodou je, že vtisky jsou poměrně malé a mělké, takže se funkční plocha výrobku příliš nepoškozuje. [1] K výhodám patří také možnost měření tenkých a tvrdých vrstev při nepatrné stopě v tisku a to dokonce i v zakřivených stopách.

Použití: Ve velkých závodech se využívá tzv. diatestrů. Čtvercový vtisk je promítán ve zvětšeném měřítku na matnici. Je proto snadné určit délku úhlopříčky.

Zajímavost: Při měření mikrotvrdomosti jsou vtisky úhlopříček velmi malé (cca  $10^{-2}$  mm). Vtisk je nutno umístit do zvoleného místa metalografického výbrusu pomocí objektivu. Jednou z nejpřesnějších konstrukcí je Hanemannův mikrotvrdoměr. Mikrotvrdoměr se skládá z 1. Vickersova indentoru, 2. nosiče objektivu, 3. závěsné talířové pružiny, 4. optického hranolu, 5. stupnice, 6. krytu, 7. zkoušeného výbrusu.



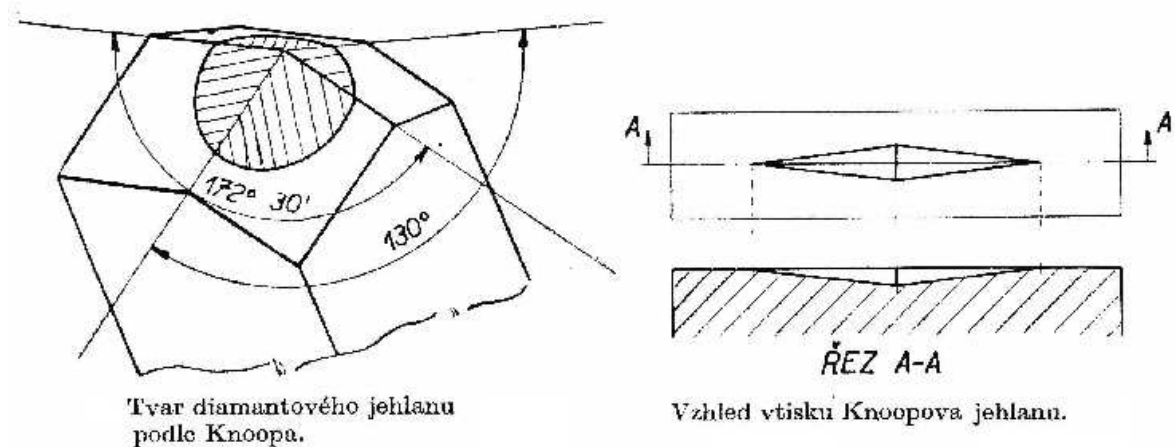
Obr. 9. Hanemannův tvrdoměr

### 3.1.4 Knoop

Vynalezl: Knoop r. 1939

Princip zkoušky:

Podobně jako u Vickerse je i tato metoda založena na vtláčování diamantového vnikacího tělesa ve tvaru čtyřbokého jehlanu. Jeho vrcholové úhly jsou  $130^\circ$  a  $172,5^\circ$ . Metoda je určena pro měření mikrotvrdosti. Vtisk má tvar protáhlého kosočtverce – měří se pouze delší úhlopříčka. Metoda je vhodná pro měření velmi tenkých vrstev. Mezi nevýhody patří mělkost vtisku a z toho vyplývající problémy při odečítání velikosti otisku. Kladou se vysoké nároky na úpravu povrchu zkoušeného materiálu a ostrost hran vnikacího tělíska.



Obr. 10. Zkouška dle Knoopa

### 3.1.5 Rockwell

Vynalezl, vznik: bratři Albert a Edward Rockwellovi, USA, 1914, patent však uznán až o pět let později

Teplota okolí:  $10^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}$ .

Vnikací těleso: Diamantový kužel o vrcholovém úhlu  $120^\circ$  při měření tvrdého materiálu (HRC, HRA) nebo kalené ocelové kuličky (HRB) při měření měkkého materiálu.

Zkušební těleso: Nejméně 10-ti násobek hodnoty trvalé hloubky vtisku.

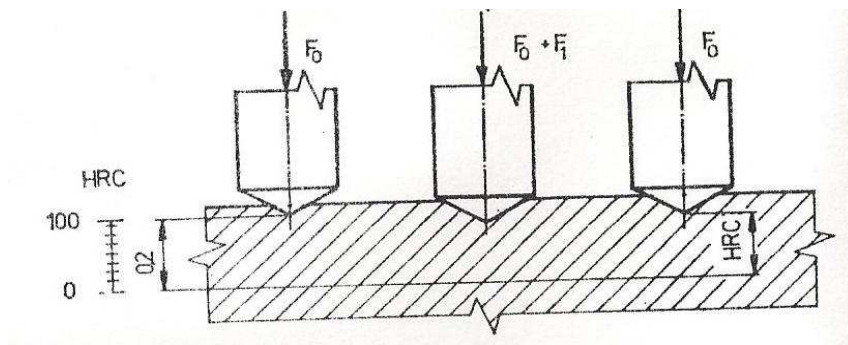
Princip zkoušky:

Zkušební těleso se umístí na tuhou podpěru aby se zkušební plocha nacházela v kolmé rovině k ose vnikacího tělesa. Vnikací těleso se přivede ke zkoušenému povrchu a to bez rázů, chvění na předběžné zkušební zatížení  $F_0$ . Doba výdrže na zkušebním zatížení nesmí překročit 3s. Toto zatížení zvyšujeme na zatížení  $F$  a to v čase 1 do 8s.  $F$  nazýváme celkové zkušební zatížení a doba jeho výdrže musí být  $4s + 2s$ . Vznikne vtisk. Přídavné zatížení se odlehčí na  $F_0$  a konečný údaj odečteme.

Výsledek: Zatímco u předešlých dvou metod byla výsledkem velikost povrchu vtisku u Rockwellovi metody je to hloubka vtisku.

Tab. 3. Symboly a značení [11]

Symbol/ Zkrácený termín	Význam	Jednotka
$F_0$	Předběžné zkušební zatížení	N
$F_1$	Přídavné zkušební zatížení	N
$F$	Celkové zkušební zatížení	N
$S$	Jednotka stupnice charakterizující stupnici	mm
$N$	Číslo charakterizující stupnici	
$h$	Trvalá hloubka vtisku při předběžném zkušebním zatížení po odlehčení přídavného zkušebního zatížení (trvalá hloubka vtisku)	mm
HRA HRC HRD	Tvrdost podle Rockwella = $100 - \frac{h}{0,002}$	
HRB HRE HRF HRG HRH HRK	Tvrdost podle Rockwella = $130 - \frac{h}{0,002}$	
HRN HRT	Tvrdost podle Rockwella = $100 - \frac{h}{0,001}$	



Obr. 11. Zkouška dle Rockwella

Výhody: Zkouška je rychlá, snadná, vtisky malé (max.hloubka 0,2mm).

Využití: Běžná kontrol velkých serií výrobků, např.: v kalírnách.

Abychom nemuseli každou metodu zkoušet na jiném tvrdoměru existují tvrdoměry univerzální. Např.společně pro metodu Brinell, Vickers, Rockwell, Knopp. Na moderních přístrojích vyhodnocujeme vtisky pomocí systému videokamery.



Obr. 12. Starobylý a nový typ tvrdoměrů Rockwell

## 3.2 VRYPOVÉ ZKOUŠKY

### 3.2.1 Mohsova stupnice

Vznik: Friedrich Mohs, 1822

Vnikací těleso: Diamantový kužel o  $120^\circ$  s poloměrem zaoblením vrcholu 0,02mm

Princip zkoušky:

Jedná se o stupnici tvrdosti materiálu o deseti základních úrovních běžných materiálů. Materiálem s vyšším číslem lze udělat vryp do materiálu s číslem nižším.

1. mastek
2. sůl kamenná
3. kalcit (vápenec)
4. fluorit (kazivec)
5. apatit
6. živec
7. křemen
8. topaz
9. korund
10. diamant

Dle této stupnice by například cín měl tvrdost 1,8, hliník 2,9, měď tvrdost 3, ocel 5-8,5, železo 4,5.

Výsledek: Určujeme kritické zatížení  $L_c$ , které mělo za následek adhezní odtržení vrstvy. Vryp změříme pomocí mikroskopu.

Nevýhody: Technicky je tato stupnice nevhodná především kvůli velkému rozpětí mezi stupni.

Výhody: Zjištění tvrdosti tenkých vrstev [5].



### 3.2.2 Martens

Princip zkoušky:

Po vyhlazené ploše zkoušeného materiálu přitlačováním přejíždí diamantový kužele s vrcholovým úhlem  $90^\circ$ , který je zatížený měnitelnou silou. Výsledkem nám pak je zatížení, které vytvoří vryp široký 0,01mm anebo také šířka vrypu provedená vždy stejným zatížením.

### 3.2.3 Buchholzova metoda

Využívá se na jednovrstvém nebo vícevrstvěm nátěru, velmi tvrdé vrstvě.

Vzniklá délka vrypu udává zbytkovou deformaci nátěru.



*Obr. 13. Vrypová zkouška*

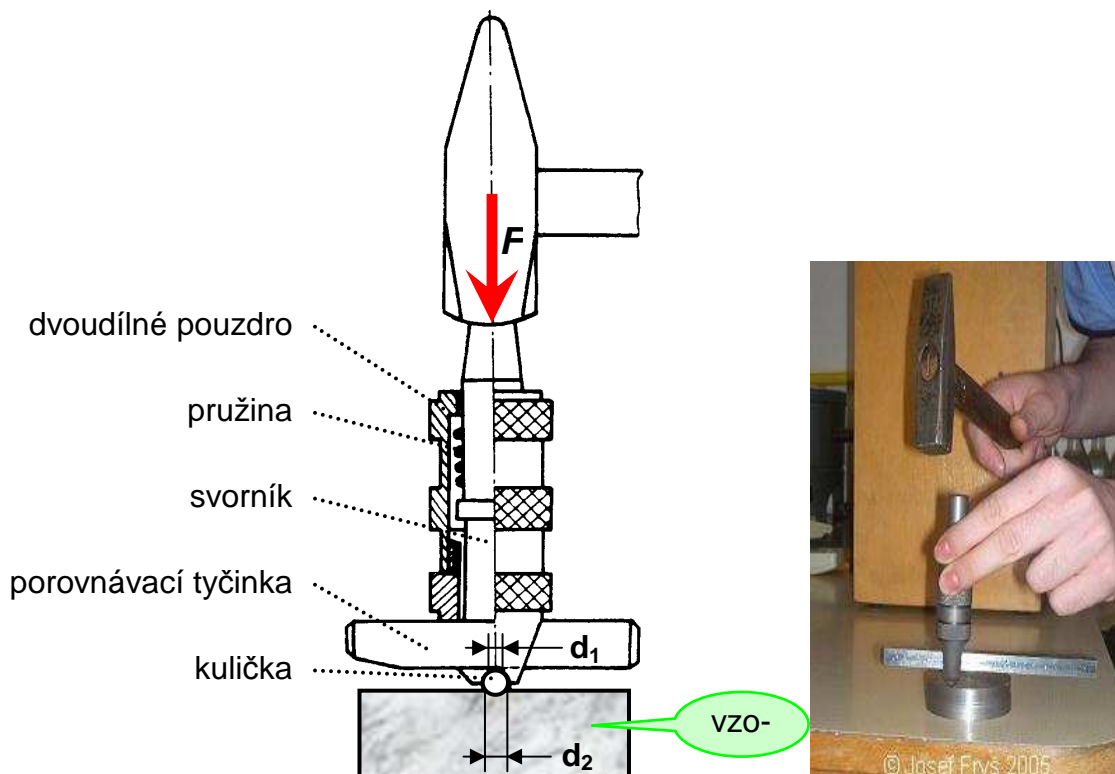
Vrypové zkoušky se dnes používají už jen pro tvrdé a křehké materiály (porcelán).

## 4 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY

Tyto metody jsou jednodušší, modernější. Nemají tolik omezení jako metody statické. Obecně se jedná o metody, kdy se pomocná kulička vystřeluje oproti zkoušenému materiálu. Zkušební tělísko vniká tedy do materiálu rázem, který vyvozuje kladívko, pružina atd. Vyhodnocuje se jeho odražená energie.

### 4.1 Kladívko Poldi

Jde o malý, přenosný přístroj o hmotnosti 0,5 kg, který určuje tvrdost ve stupních Brinella. Tvrdoměr s porovnávací tyčinkou (uložena v pouzdře) se postaví na zkoušený předmět, umístěný na podložce. Úderem kladiva na úderník se vtiskne ocelová kulička, umístěná na porovnávací tyčince do zkoušeného materiálu i do tyčinky. Oba vtisky určí buď z tabulek, nebo výpočtem tvrdost nebo pevnost zkoušeného materiálu.

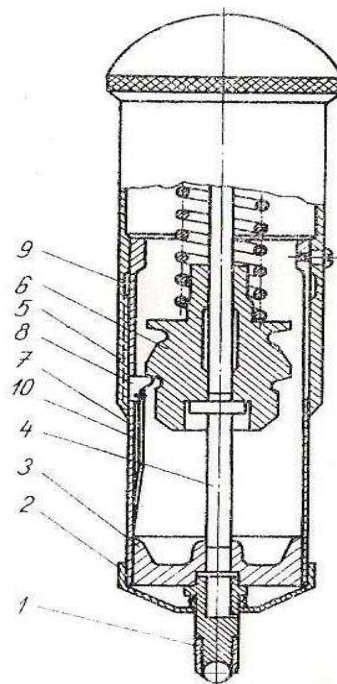


Obr. 14. Zkoušky prováděné na Poldi kladívku

## 4.2 Baumannovo kladívko

Ruční tvrdoměr, opět měřící ve stupních Brinella. Dynamický ráz potřebný k vtlačení kuličky do zkoušeného materiálu je stále stejný – vyvozuje deformaci pružiny.

Kulička se opře o plochu zkoušeného materiálu. Osa přístroje je kolmá k měřenému předmětu. Plášť (5) se ručně stlačí, vybráním (9) se vychýlí západka (8) na pružině (10), kladívko (6) se vymrští a úderník (4) přeneseme ráz na nástavec s kuličkou [6]. Hotový vtisk se měří Brinellovou lupou s měřítkem. Opět z tabulek určíme tvrdost.

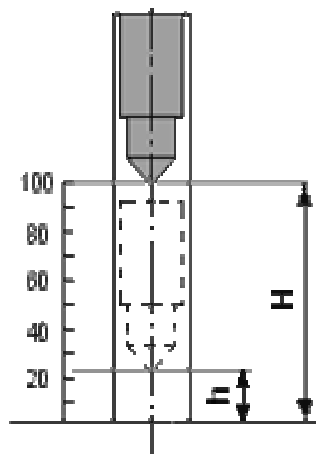


Obr. 15. Baumannovo

kladívko

## 4.3 Shoreho skleroskop

Ocelové tělísko dole opatřené diamantem nebo slinutým karbidem normalizovaného tvaru se pustí z výšky volným pádem na plochu zkoušeného materiálu. Tvrdost změříme podle výšky odskoku. Při dopadu se část pohybové energie spotřebuje na vytvoření důlku, zbytek energie způsobí odraz tělíska do výšky, která se změří. Čím je zkušební materiál tvrdší, tím je důlek menší a odraz větší.

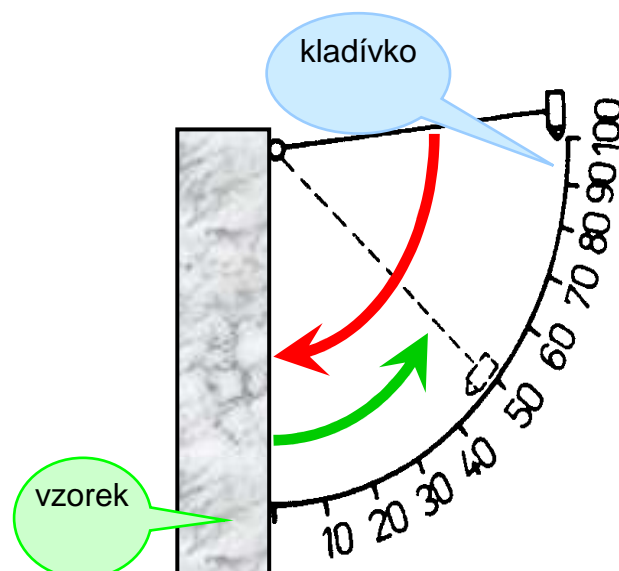


Obr. 16. Princip zkoušky

dle Shoreho

#### 4.4 Duroskop

Na rozdíl od Shore skleroskopu kdy jsme měřili v horizontálním směru, duroskop slouží k měření svislých ploch. Měří se odskok kývajícího kladívka. Tvrdost udáváme ve stupních dle Shoreho [7].



Obr. 17. Princip durokopu

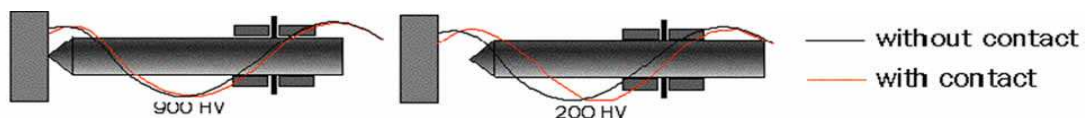
#### 4.5 Leebeho tvrdoměr

Opět kapesní tvrdoměr jehož výhodou je, že jej lze nastavit ve směru horizontálním, stoupajícím, klesajícím. Je vhodný pro velké obrobky z oceli a litin.

#### 4.6 Ultrazvuková metoda (UCI)

Využívá axiálně kmitající tyčinku s Vickerovým diamantovým hrotem. Po zatížení na měřeném materiálu se změní frekvence kmitu, která je závislá na ploše vpichu (určuje tvrdost materiálu) a na modulu pružnosti měřeného materiálu.

Metoda je přesná, vhodná i na malé díly, doporučena i do těžko přístupných míst. Povrch měřeného materiálu je minimálně porušen, proto se dají měřit opracované plochy po konečných úpravách (lopatky turbín, kompresorů, svarové spoje, písty).



Obr. 18. Metoda UCI

#### 4.7 Moderní dynamické tvrdoměry

Mají většinou konverzní tabulky uloženy přímo v paměti přístroje a na displeji se ukazuje konvertovaná hodnota. Tvrdoměry mají předvolené směry měření, které je před samotným měřením potřeba zadat. Tvrdoměry jsou buď ze zabudovanou nebo externí sondou a paměť a možností dalšího zpracování naměřených hodnot.

Princip dynamické odrazové metody. Např. tvrdoměry HARTIP.



*Obr. 19. Moderní dynamické tvrdoměry*

Výhodou dynamických moderních přístrojů jsou především: dobře čitelný displej, který ukazuje aktuální výsledek měření tvrdosti, průměrnou tvrdost, maximální tvrdost.



*Obr. 20. Typ dynamického tvrdoměru*

## 5 TEPELNÉ A CHEMICKO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

V následující praktické části bakalářské práce se budu zabývat tvrdostí kovů po zušlechťování. Rozumíme tím tepelné zpracování a chemicko-tepelné zpracování.

### 5.1 Tepelné zpracování

Tepelným zpracováním rozumíme postupy, při nichž materiál záměrně ohříváme a ochlazujeme tak, aby získal požadované vlastnosti. Ovlivňujeme ním především – pevnost, houževnatost, tvářitelnost, obrobitelnost a dokonce i elektrický odpor. Dosažení rovnovážného stavu při změnách je určována difúzí. Její velikost je ovlivněna teplotou a dobou výdrže na teplotě. Žíhání difúzi podporuje anebo jí brzdí málo, tedy zvyšují stabilitu struktury. Tepelné zpracování které difúzi naopak brzdí nebo jí zamezuje je kalení.

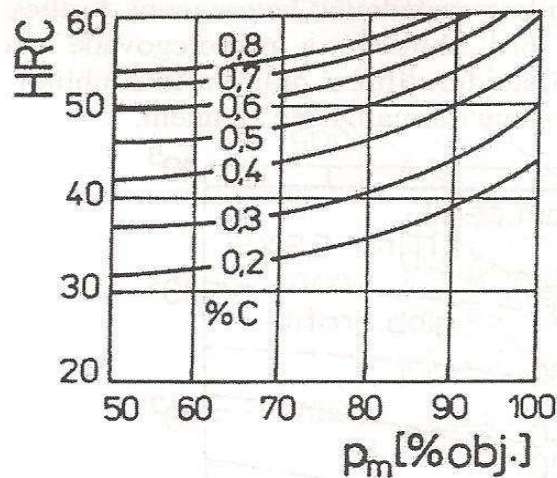
#### 5.1.1 Kalení a popouštění

Účelem kalení je zvýšení tvrdosti ocelí. Kalení dosáhneme tak, že součást ohřejeme na kalící teplotu (větší než 727°C). Následuje výdrž na této teplotě a ochlazování kritickou rychlostí, čímž se potlačí vznik feritu a perlitu a nestabilního austenitu a přemění se v bainit nebo martenzit. Kalením tedy dosáhneme stavu vysoce nerovnovážného.

Obvykle se požaduje, aby v jádře výrobku vzniklo zakalením alespoň 50% obj. martenzitu [8]. Po kalení se provádí popouštění. Za následek má snížení pnutí a křehkosti. Je to ohřev na určitou teplotu (pod 727°C). Po té následuje ochlazení na klidném vzduchu (20°C).

Kalení může probíhat ve vodě. Zde však ochlazování neprobíhá plynule. Dále můžeme kalit v prostředí oleje, v solných lázních nebo na vzduchu.

Kalí se břity obráběcích nástrojů, čepy, ozubená kola atd.



Obr. 21. Závislost tvrdosti na podílu

*martenzitu a na obsahu ulíku*

## 5.2 Chemicko-tepelné zpracování

Chemicko-tepelné zpracování je sycení povrchu ocelí různými prvky za účelem dosažení požadovaných vlastností čímž jsou především žáruvzdornost, korozivzdornost a odolnost proti opotřebení. Mezi chemicko-tepelné zpracování patří cementování, nitridování, nitro-cementování a také karbonitridování.

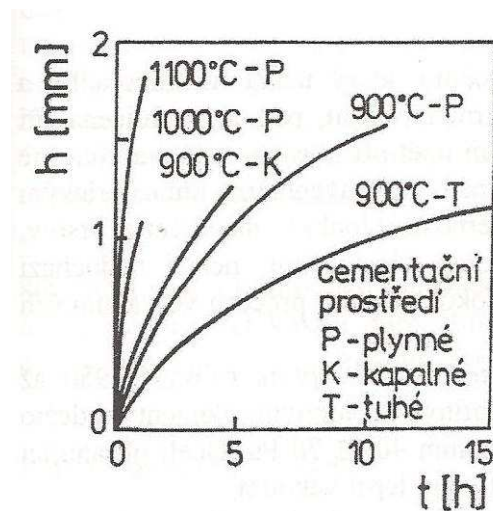
### 5.2.1 Cementování

Cementováním nazýváme sycení povrchu uhlíkem za účelem získání tvrdého povrchu odolného proti opotřebení. Povrch předmětu z měkké oceli (s obsahem C do 0,2%) nasycujeme uhlíkem v pevném, kapalném, plyném prostředí při teplotách nad teplotu  $A_{c3}$  (850-930°C) na obsah C=(0,7-0,9)% do hloubky  $h=(0,5-1,5)$ mm. Cementace v plyném prostředí je z cementačního prášku nebo pecích ze směsi uhlovodíku a vzduchu. Kapalně obsahují kyanid sodný. Pokud vyžadujeme tvrdou vrstvu jen na části povrchu například tak, aby se zbytek součásti mohly dále obrábět, chráníme takovou část povrchu proti cementová-



ní. Jako ochrana se používá různých past, nátěrů. Účinnější je však ochrana galvanickým poměděním.

Použití: oceli tř. 12010, 14220, 16420



Obr. 22. Časová a teplotní

závislost na různém prostředí

### 5.2.2 Karbonitridování

Karbonitridováním rozumíme sycení uhlíkem a dusíkem současně. Karbonitridace se provádí v plynném nebo kapalném prostředí při teplotách 570-620°C po dobu několika hodin, za kterou se vytvoří vrstva do hloubky asi 50 $\mu$ m. Vrstva je odolná proti zadírání a opotřebení. Karbonitridované výrobky se už nekalí.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 6.1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo měření tvrdosti u vybraných kovových materiálů po tepelném, chemicko-tepelném zpracování čtyřmi typy zkoušek tvrdosti. Pro zkušební vzorky byly vybrány oceli 11353 (cementace, carbonitridace) a 12060 (nezpracovaný, kalený). Měření tvrdosti bylo prováděno na stroji Easydur Italiana podle stanovených norem, v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství FT UTB, Zlín.

### 6.2 Zkušební zařízení

Z důvodu aplikace chemicko-tepelného zpracování u zvolených kovových materiálů bylo nutné zvolit takový druh zkoušky, který přesně stanoví hodnotu tvrdosti u vybraných zkušebních vzorků. Při aplikaci chemicko-tepelného zpracování došlo k ovlivnění pouze velmi tenké povrchové vrstvy, bylo rozhodnuto o použití zkoušky dle Rockwella. U tohoto typu zkoušky není nutná úprava povrchu zkušební vzorku a tím ovlivnění struktury a vlastností modifikované vrstvy. Bylo použito čtyřech různých metod měření tvrdosti dle Rockwella, které zahrnují měření standardních a velmi tenkých vrstev. Vybrané metody měření tvrdosti dle Rockwella splnily požadavky na tento typ měření tvrdosti. Měření bylo prováděno na stroji Easydur Italiana podle stanovených norem. Pro srovnání jednotlivých naměřených hodnot, byly hodnoty převedeny na hodnotu HRC.

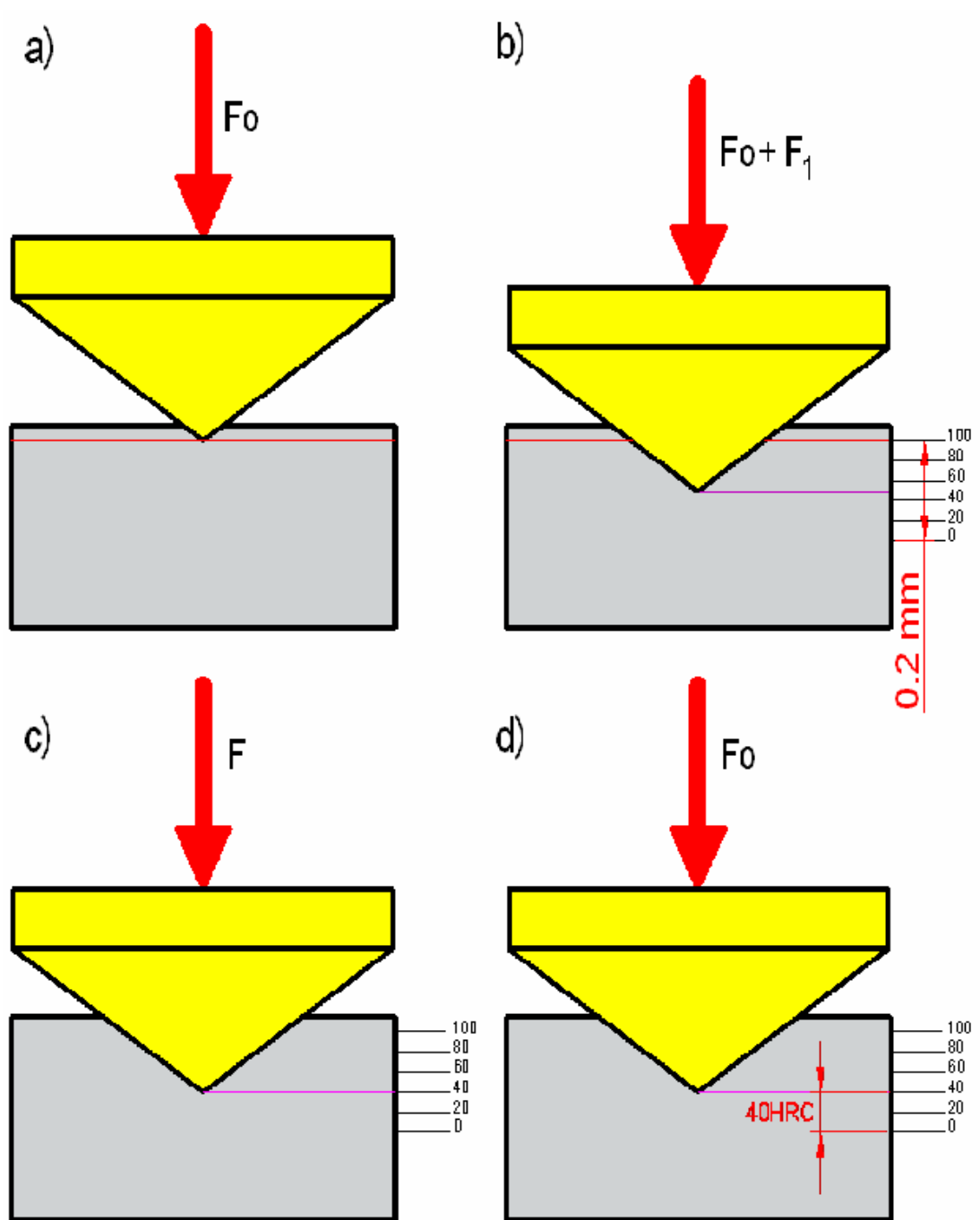
Tab. 4. Použité normy při měření

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

4	Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Zkušební metoda 30N	ČSN EN ISO 6508-1
---	---	-------------------

### 6.3 Postup měření

Pro všechny zadané metody podle Rockwella se jako indentor používal diamantový kužel s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a s poloměrem zaoblení špičky  $r = 2\text{mm}$ . Na stroji se nastavila stupnice dané metody a na podložku pod indentor se umístil zkušební vzorek. Na vzorek nejprve působila předzatěžující síla  $F_0$ , která se měnila podle zadaná stupnice tvrdosti. Předzatěžující síla má odstranit nerovnosti a rozdílné jakosti na povrchu vzorku. Po určité době se síla zvýší na sílu zatěžující  $F$ . Velikost zatěžující síly závisí na typu metody. Tvrdost daného vzorku získáme tak, že od hloubky indentoru při předzatěžující síle vyneseme stupnici se 100 dílky do hloubky 0,2mm. Výsledná tvrdost se stanovuje z trvalé hloubky, která je způsobená zatěžující silou. Tvrdost je rozdíl hloubky předzatěžující síly před působením přídavného zatížení a po ukončení působení přídavného zatížení.



Obr. 23. Schéma metody

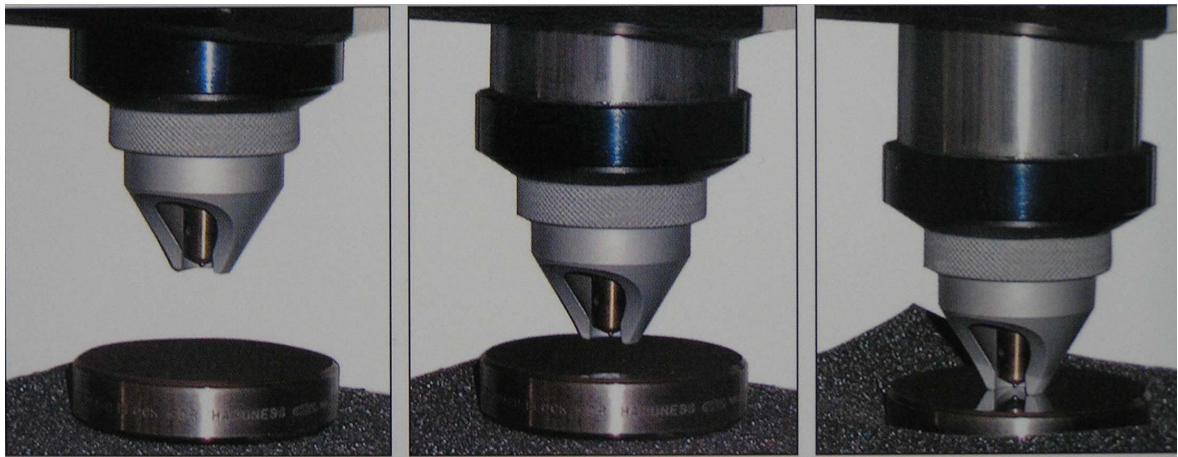
$F_0$  – předzatěžující síla

$F_1$  – přídatné zatížení

$F$  – zatěžující síla

Tab. 5. Vnikací těla a zkušební síly pro zadané metody podle Rockwella

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Vnikací tělaso	$F_0$ [N]	$F_1$ [N]	$F$ [N]	Rozsah měření
C	HRC	diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 – 70
A	HRA	diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 – 88
30 N	HR30N	diamantový kužel	29,42	264,8	294,2	42 – 86
15 N	HR15N	diamantový kužel	29,42	117,7	147,1	70 – 94



Obr. 24. Měřící hlava

#### 6.4 Zkušební tělíska

Vybrány byly čtyři typy zkušebních těles. Základním vzorkem byla konstrukční ocel 12 060, nezpracovaná. Dalším byl vzorek 11353 po cementaci. Jako třetí prošel zkouškami kalený vzorek 12060 a posledním zkoušeným vzorkem byla 11353 carbonitridovaná.

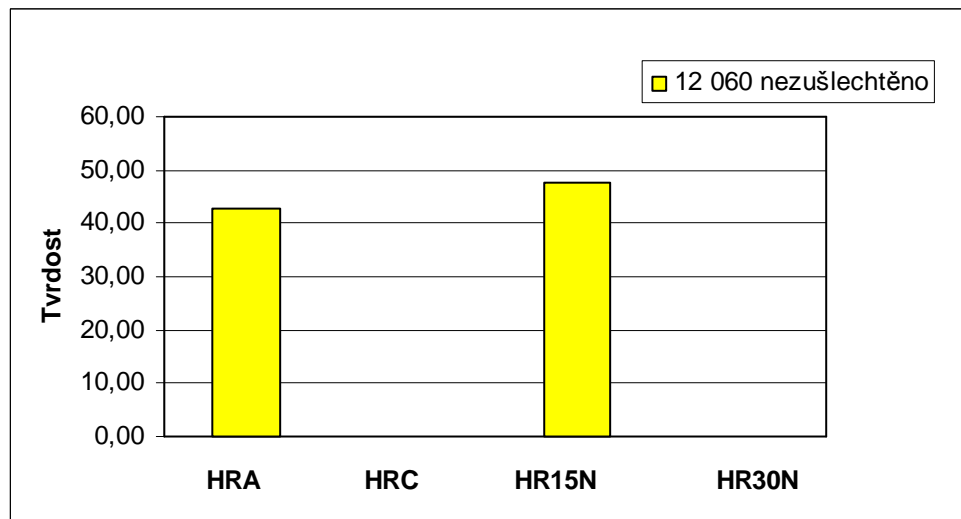
## 7 ZÁKLADNÍ MATERIÁL

Jako základní materiál byla vybraná nezpracovaná ocel 12060. Tato konstrukční ocel, jejíž složení je udáváno normou ČSN 412060, obsahuje prvky uhlíku ( $C = 0,52-0,6\%$ ), manganu ( $Mn = 0,5-0,8\%$ ), křemíku ( $Si = 0,15-0,40\%$ ), chromu ( $Cr = \text{max. } 0,25\%$ ), niklu ( $Ni = \text{max. } 0,3\%$ ), mědi ( $Cu = 0,3\%$ ) a malé procento fosforu a síry ( $P, S = \text{max. } 0,04\%$ ). Ocel je doporučena k zušlechťování a je vhodná na výrobu hřídelů turbokompresorů, ozubených kol, lamel, spojek, různých spojovacích součástí, západek, na součástí strojů, které mají vzdorovat opotřebení a také na méně namáhané hřídele silničních vozidel. V technické praxi je velmi používaná.

### 7.1 Měření a vyhodnocení základního zkušební vzorku – oceli 12 060

Tab. 6. Naměřené hodnoty nezpracovaného základního zkušební vzorku, oceli 12060

Poř.čís.	Tvrdość HRA	Tvrdość HRC	Tvrdość HR15N	Tvrdość HR30N
1.	41,88	nezměřeno	48,30	nezměřeno
2.	42,03	nezměřeno	46,21	nezměřeno
3.	44,40	nezměřeno	48,56	nezměřeno
4.	44,63	nezměřeno	47,18	nezměřeno
5.	41,69	nezměřeno	46,73	nezměřeno
6.	43,80	nezměřeno	48,44	nezměřeno
7.	43,67	nezměřeno	48,73	nezměřeno
8.	41,70	nezměřeno	48,00	nezměřeno
9.	42,61	nezměřeno	48,99	nezměřeno
10.	42,01	nezměřeno	45,69	nezměřeno
<b>Aritmet. průměr</b>	<b>42,84</b>	<b>0,00</b>	<b>47,68</b>	<b>0,00</b>
<b>Směr. odchylka</b>	<b>1,16</b>	<b>0,00</b>	<b>1,15</b>	<b>0,00</b>



*Obr. 25. Porovnání hodnot tvrdosti nezpracovaného materiálu 12 060*

Nejvyšší naměřená tvrdost pro základní nezpracovaný zkušební vzorek 12 060 je HR15N která činí 47,68. Tvrdosti HRC a HR30N byly neměřitelné (Tab. 6., Obr. 25.).



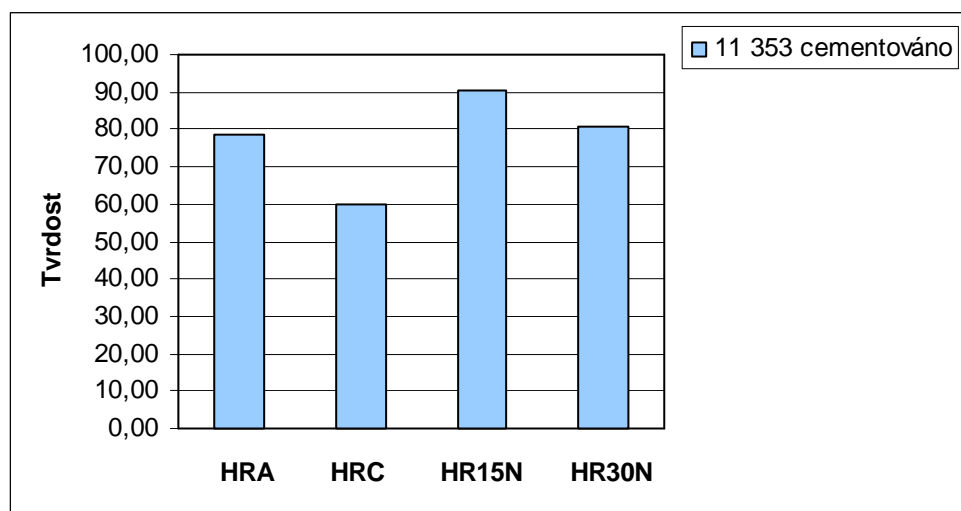
## 8 OCEL 11 353 CEMENTOVÁNA

Ocel 11 353 je jednoúčelová ocel, konstruční. Dle normy ČSN 41 1353 obsahuje tyto prvky – uhlík (C = max. 0,18%), forfor (P = max. 0,05%) a taktěž síru S do 0,05%. Součet fosfory a síry není vyšší než 0,09%. Tato ocel se využívá zejména k výrobě bezešvých trubek, trubkové konstrukce staticky namáhaných součástí, potrubí pro vedení oleje, vodní páry, nafty, plynu, na spojovací součásti tohoto potrubí.

### 8.1 Měření a vyhodnocení cementovaného zkušebního vzorku, oceli 11 353

Tab. 7. Naměřené hodnoty cementovaného vzorku oceli 11 353

Poř.čís.	Tvrđost HRA	Tvrđost HRC	Tvrđost HR15N	Tvrđost HR30N
1.	76,75	57,62	89,88	81,43
2.	77,24	61,33	90,76	79,67
3.	78,04	58,84	86,02	84,03
4.	78,18	58,35	88,10	83,10
5.	81,68	60,69	91,13	81,43
6.	78,21	59,99	89,95	80,82
7.	80,31	56,73	92,19	80,39
8.	81,86	60,34	90,33	76,55
9.	76,87	61,84	92,02	81,00
10.	79,49	60,59	91,19	79,71
<b>Aritmet. průměr</b>	<b>78,86</b>	<b>59,63</b>	<b>90,16</b>	<b>80,81</b>
<b>Směr. odchylka</b>	<b>1,89</b>	<b>1,67</b>	<b>1,77</b>	<b>1,93</b>



Obr.26. Porovnání hodnot tvrđosti cementovaného vzorku, ocel 11 353

Z výsledků vyplývá, že nejvyšší naměřená tvrdost cementovaného vzorku mat. 11 353 je 90,16 HR15N, zatímco nejmenší tvrdost jsme zjistili při použití HRC a to 59,63 (Tab. 7., Obr.26.).

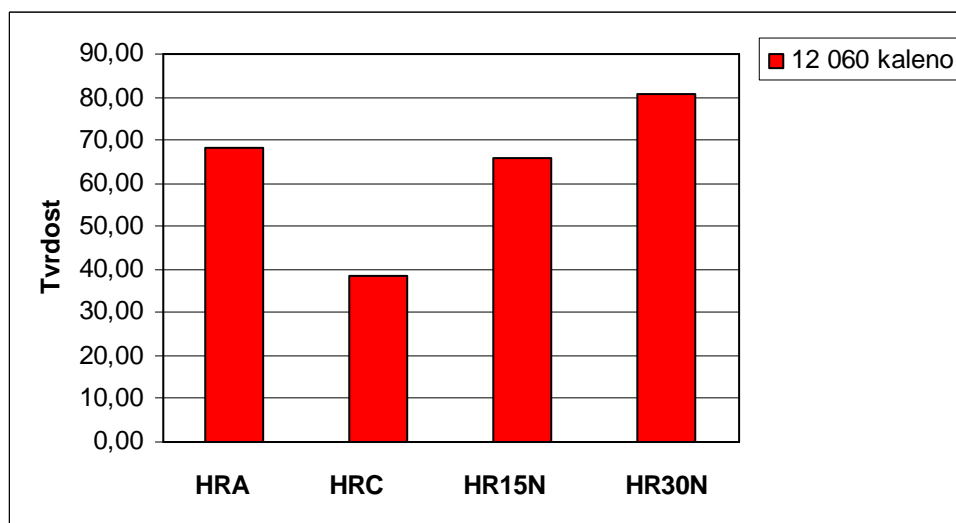
## 9 OCEL 12 060 KALENÁ

K naměření hodnot tvrdosti jsme použili kalený zkušební vzorek, ocel tř. 12 060. Zakalením získáme zmenšení vnitřního pnutí, snížení křehkosti a tvrdosti a zvýšení pevnosti a houževnatosti.

### 9.1 Měření a vyhodnocení kaleného zkušební vzorku, oceli 12 060

Tab. 8. Naměřené hodnoty kaleného zkušební vzorku, oceli 12 060

Poř.čís.	Tvrdost HRA	Tvrdost HRC	Tvrdost HR15N	Tvrdost HR30N
1.	67,21	39,04	67,77	81,43
2.	71,05	41,48	69,92	79,67
3.	69,37	36,67	68,01	84,03
4.	68,09	37,00	63,80	79,99
5.	66,17	38,06	64,74	80,45
6.	68,92	40,17	65,17	79,78
7.	67,84	37,91	66,74	80,16
8.	69,13	38,59	65,15	79,83
9.	66,01	38,27	63,51	81,16
10.	70,26	38,97	64,74	80,97
<b>Aritmet. průměr</b>	<b>68,41</b>	<b>38,62</b>	<b>65,96</b>	<b>80,75</b>
<b>Směr. odchylka</b>	<b>1,57</b>	<b>1,42</b>	<b>2,07</b>	<b>1,31</b>



Obr. 27. Porovnání hodnot tvrdosti kaleného zkušební vzorku 12 060

Nejvyšší hodnota tvrdosti pro kalenou ocel 12 060 je HR30N zatímco nejmenší tvrdostí je HRC (Tab. 8., Obr. 27.).

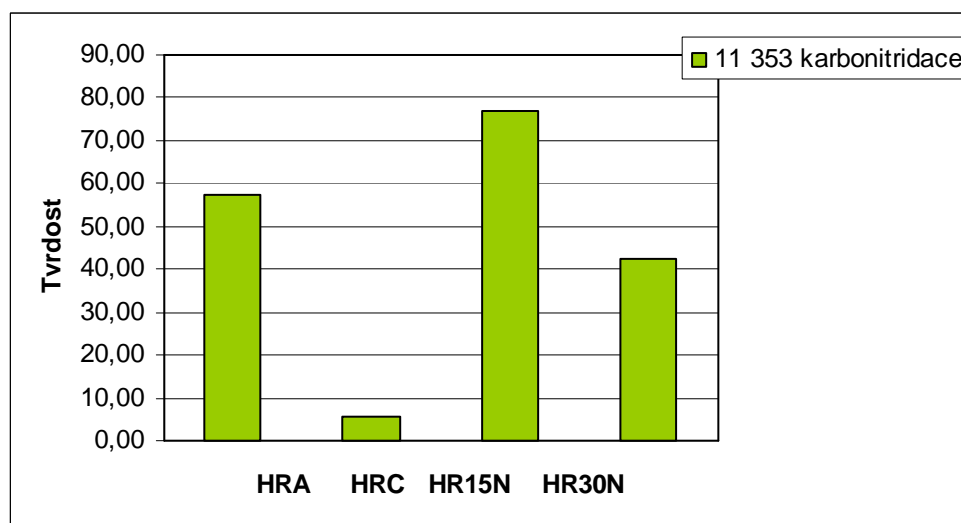
## 10 OCEL 11 353 KARBONITRIDOVÁNA

Ocel 11 353 je jednoúčelová ocel konstruční. Nitridováním dosáhneme u součástí zvýšení otěruvzdornosti, zvášením tvrdosti povrchových vrstev. Karbonitridováním, což je sycení dusíkem a uhlíkem společně dosáhneme navíc vrstvy proti zadírání, opotřebení.

### 10.1 Měření a vyhodnocení karbonitridovaného zkušební vzorku, oceli 11 353

Tab. 9. Naměřené hodnoty karbonitridovaného vzorku oceli 11 353

Poř.čís.	Tvrdost HRA	Tvrdost HRC	Tvrdost HR15N	Tvrdost HR30N
1.	60,05	5,82	75,93	43,75
2.	55,08	4,50	77,35	39,63
3.	56,29	5,48	76,01	45,73
4.	57,02	5,15	75,41	41,06
5.	54,70	5,79	75,55	44,14
6.	57,44	5,34	77,20	41,47
7.	56,88	5,99	78,44	42,88
8.	59,27	5,57	78,65	41,77
9.	60,09	5,65	76,69	43,05
10.	55,80	5,61	77,50	42,61
<b>Aritmet. průměr</b>	<b>57,26</b>	<b>5,49</b>	<b>76,87</b>	<b>42,61</b>
<b>Směr. odchylka</b>	<b>1,86</b>	<b>0,42</b>	<b>1,15</b>	<b>1,73</b>



Obr. 28. Porovnání hodnot tvrdosti karbonitridovaného vzorku 11 353

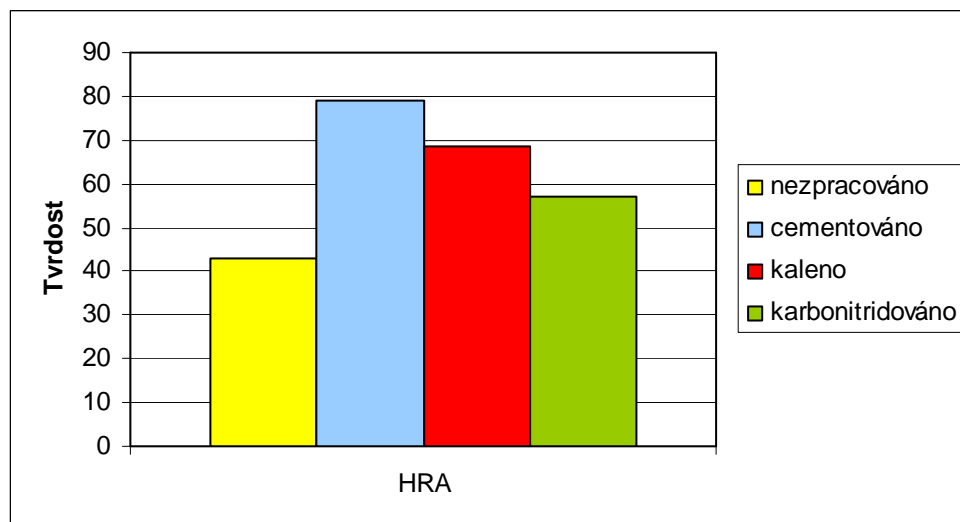
Z porovnání výsledků tvrdosti karbonitridovaného zkušebního vzorku materiálu 12060 je patrné, že nejvyšší tvrdostí je 76,87 HR15N oproti tomu stojí značně rozdílná nejmenší tvrdost 5,49 HRC (Tab. 9., Obr. 28.).

## 11 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Bakalářská práce se zabývá měřením tvrdosti u vybraných typů materiálu po tepelném, chemicko-tepelném zpracování. Měření bylo prováděno v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství na tvrdoměru stroji Easydur Italiana. Pro měření byly zvoleny čtyři zkoušky tvrdosti a to HRA, HRC, HR15N, HR30N. Měření bylo prováděno vždy 10x každou metodou na každém vzorku. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány a vyhodnoceny.

### 11.1 Porovnání tvrdosti měřené metodou HRA

Porovnávání hodnot tvrdosti u základního vzorku, vzorku cementovaného, kaleného a karbonitridovaného metodou HRA.

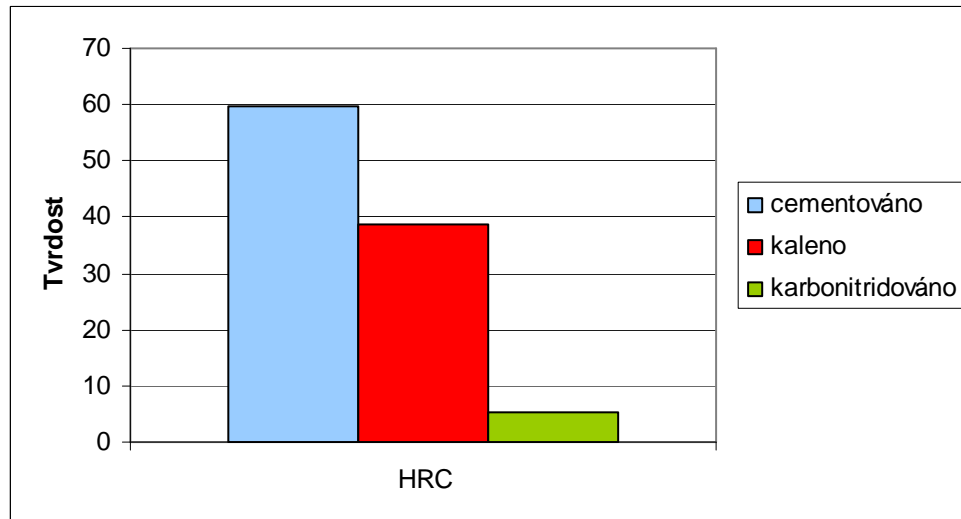


Obr. 29. Porovnání tvrdosti HRA všech zkušebních vzorků

Při měření tvrdosti metodou HRA bylo zjištěno, že nejvyšších hodnoty byly naměřeny u zkušebních vzorků, které byly chemicko - tepelně zpracovány (cementováním). Druhá nejvyšší hodnota byla naměřena u kaleného zkušebního vzorku následovaným nitridovaným zkušebním vzorkem. Nejmenší hodnota tvrdosti měřená metodou HRA byla zjištěna u tepelně nezpracovaného zkušebního vzorku. Pořadí tvrdosti je určena právě metodou HRA. Ta se používá převážně pro měření tenkých vrstev, proto zjištěné hodnoty jsou opodstatněné. Nejvyšších hodnot by však měla dosáhnout nitridovaná vrstva, která však byla příliš vysokým zatížením prolomena (tloušťka vrstvy v setinách milimetru) a tím byly naměřené hodnoty tvrdosti menší v porovnání s cementovanou vrstvou (Obr. 29).

## 11.2 Porovnání tvrdosti měřené metodou HRC

Porovnávání hodnot tvrdosti u základního vzorku, vzorku cementovaného, kaleného a karbonitridovaného metodou HRC.

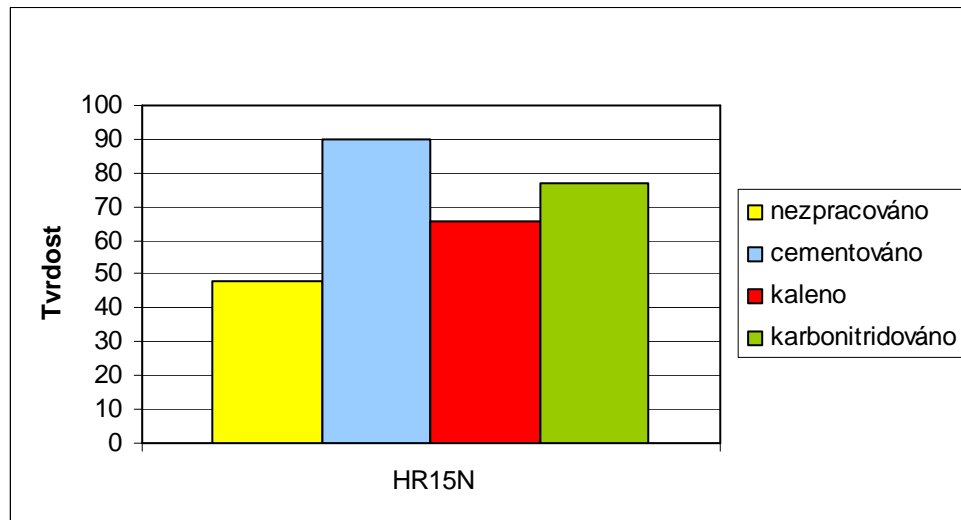


Obr. 30. Porovnání tvrdosti HRC všech zkušebních vzorků

Při měření tvrdosti metodou HRC bylo zjištěno, že nejvyšších hodnoty byly naměřeny u zkušebních vzorků, které byly chemicko - tepelně zpracovány (cementováním). Druhá nejvyšší hodnota byla naměřena u kaleného zkušebního vzorku následovaným nitridovaným zkušebním vzorkem. Hodnota tvrdosti měřená metodou HRC u tepelně nezpracovaného zkušebního vzorku nebyla naměřena. Pořadí tvrdosti je určena právě metodou HRC. Zmíněná metoda měření tvrdosti se používá převážně pro měření nejtvrdějších povrchů, proto zjištěné hodnoty jsou opodstatněné. Nejvyšších hodnot by však měla dosáhnout nitridovaná vrstva, která však byla příliš vysokým zatížením prolomena (tloušťka vrstvy v setinách milimetru) a tím byly naměřené hodnoty tvrdosti menší v porovnání s cementovanou vrstvou (Obr. 30).

## 11.3 Porovnání tvrdosti měřené metodou HR15N

Porovnávání hodnot tvrdosti u základního vzorku, vzorku cementovaného, kaleného a karbonitridovaného metodou HR15N.



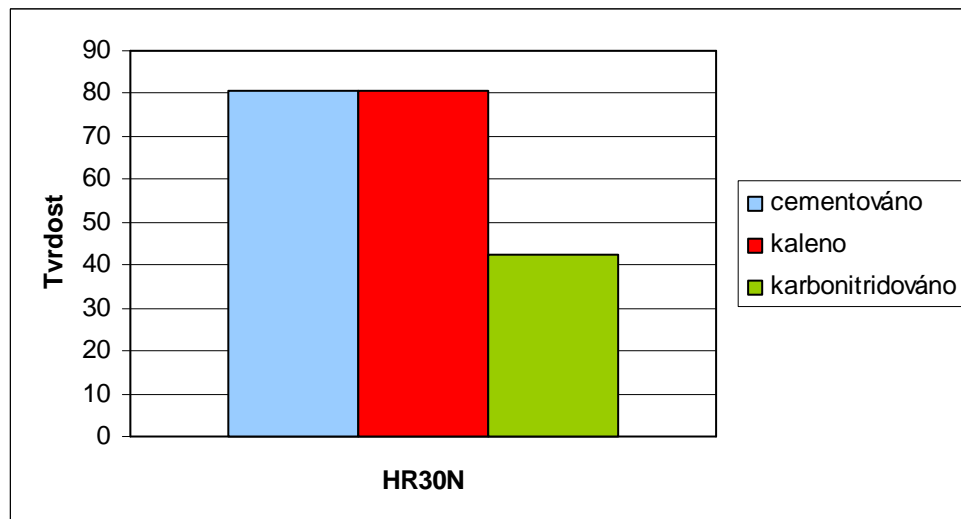
Obr. 31. Porovnání tvrdosti HR15N všech zkušebních vzorků

Měřením tvrdosti metodou HR15N byla naměřena nejvyšší hodnota tvrdosti u zkušebního vzorku, který byl chemicko – tepelně zpracován (cementace). Druhá nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u nitridovaného zkušebního vzorku, po němž následoval zakalený zkušební vzorek. Nejmenší hodnota tvrdosti byla zjištěna u nezpracovaného zkušebního vzorku. Pořadí zkušebních vzorků modifikovaných tepelně a chemicko – tepelně má své opodstatnění. Zatěžující síla je při této zkoušce (HR velmi malá, a proto se dostala tvrdost N) nitridované vrstvy na druhé místo (Obr. 31).

#### 11.4 Porovnání tvrdosti měřené metodou HR30N

Porovnávání hodnot tvrdosti u základního vzorku, vzorku cementovaného, kaleného a karbonitridovaného metodou HR30N.





Obr.32. Porovnání tvrdosti HR30N všech zkušebních vzorků

Při měření tvrdosti metodou HR30N bylo zjištěno, že nejvyšších hodnoty byly naměřeny u zkušebních vzorků, které byly chemicko - tepelně zpracovány (cementováním) a u zakaleného zkušebního vzorku. Druhá nejvyšší hodnota byla naměřena u nitridovaného zkušebního vzorku. Hodnota tvrdosti měřená metodou HR30N nebyla zjištěna u tepelně nezpracovaného zkušebního vzorku (Obr. 32). Pořadí tvrdosti je určena právě metodou HR30N. Ta se používá převážně pro měření tenkých vrstev, proto zjištěné hodnoty jsou opodstatněné. Nejvyšších hodnot by však měla dosáhnout nitridovaná vrstva, která však byla příliš vysokým zatížením prolomena (tloušťka vrstvy v setinách milimetru) a tím byly naměřené hodnoty tvrdosti menší v porovnání s cementovanou vrstvou.

## ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývá měřením tvrdosti u vybraných kovových materiálů po tepelném, chemicko-tepelném zpracování čtyřmi typy zkoušek tvrdosti. Pro zkušební vzorky byly vybrány oceli 11353 (cementace, karbonitridace) a 12060 (nezpracovaný, kalený). Měření tvrdosti bylo prováděno na stroji Easydur Italiana podle stanovených norem, v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství FT UTB, Zlín. Naměřené výsledky byly graficky zpracovány a vyhodnoceny.

V teoretické části jsou popsány metody měření tvrdosti kovových materiálů. Seznamuje Vás jak vyhodnocením tvrdosti z obrazu vtisku, tak i z hloubky vtisku. Následuje popis tepelného a chemicko - tepelného zpracování.

Z naměřených výsledků vyplývá, že nejvyšší tvrdost byla naměřena u cementované vrstvy. Na druhém místě se umístil zakalený zkušební vzorek následovaný zkušební vzorkem nitridovaným. Nejmenší tvrdosti bylo dosaženo u zkušební vzorku, který nebyl tepelně ani chemicko – tepelně zpracován.

Při použití metod, které jsou reprezentovány vysokou zatěžující silou (HRC a HRA) bylo zjištěno, že zkušební vzorky na které byla nanášena velmi tenká vrstva, byly působením vysoké zatěžující síly proraženy a tím byla naměřena nižší hodnota tvrdosti. Naopak při aplikaci nižších zatížení se i u tenkých vrstev podařilo naměřit vysoké hodnoty tvrdosti.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Základní zkoušky kovových materiálů, Jana skálová, Rudolf Kovařík, Vladimír Benedikt, Plzeň 2005
- [2] Technologická strojnická měření, Ing. Jan Šulc a kolektiv, SNTL, PRAHA 1980
- [3] Nauka o materiálu II, Degradační procesy a design konstrukčních materiálů, Ost-rava, 2008
- [4] [http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)
- [5] <http://www.converter.cz/tabulky/tvrdest-mohs.htm>
- [6] Laboratorní cvičení technologická a strojní, J. Šulc – Z. Vysloužil, SNTL, Praha 1970
- [7] <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/duroskop.doc>
- [8] Tepelné zpracování kovových materiálů, Prof. Ing. Karel Macek, DrSc, Prof. Ing. Petr Zuna, CSc., D.Eng.h.c., Doc. Ing. Jíří Janovec, CSc., 2008
- [9] ČSN EN ISO 6506-1
- [10] ČSN EN ISO 6507-1
- [11] ČSN EN ISO 6508-1

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

HB	Tvrđost Brinell
HV	Tvrđost Vickers
HRC	Tvrđost Rockwell
HRA	Tvrđost Rockwell
HRB	Tvrđost Rockwell
HR15N	Tvrđost Rockwell
HR30N	Tvrđost Rockwell
F	Síla [N]
$F_0$	Předzátěžová síla [N]
$F_1$	Přídavné zatížení [N]
ČSN	České technické normy

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1 . Výbuch parního kotle</i> .....	10
<i>Obr. 2. Měření indentorem</i> .....	14
<i>Obr. 3. Zkouška Brinell</i> .....	16
<i>Obr. 4. - 1. nezpevněný materiál, 2. zpevněný materiál</i> .....	16
<i>Obr. 5. Ludwikova zkouška</i> .....	17
<i>Obr. 6. Zkouška Vickers</i> .....	19
<i>Obr. 7. - 1. nezpevněný mat., 2. nezpevněný mat.</i> .....	19
<i>Obr. 8. Tvrdoměr Vickers</i> .....	19
<i>Obr. 9. Hanemannův tvrdoměr</i> .....	20
<i>Obr. 10. Zkouška dle Knoop</i> .....	21
<i>Obr. 11. Zkouška dle Rockwella</i> .....	23
<i>Obr. 12. Starobylý a nový typ tvrdoměrů Rockwell</i> .....	23
<i>Obr. 13. Vrypová zkouška</i> .....	25
<i>Obr. 14. Zkoušky prováděné na Poldi kladívku</i> .....	26
<i>Obr. 15. Baumannovo kladívko</i> .....	27
<i>Obr. 16. Princip zkoušky dle Shoreho</i> .....	28
<i>Obr. 17. Princip duroskopu</i> .....	28
<i>Obr. 18. Metoda UCI</i> .....	29
<i>Obr. 19. Moderní dynamické tvrdoměry</i> .....	30
<i>Obr. 20. Typ dynamického tvrdoměru</i> .....	30
<i>Obr. 21. Závislost tvrdosti na podílu martenzitu a na obsahu ulíku</i> .....	32
<i>Obr. 22. Časová a teplotní závislost na různém prostředí</i> .....	33
<i>Obr.23. Schéma metody</i> .....	37
<i>Obr. 24. Měřící hlava</i> .....	38

---

<i>Obr. 25. Porovnání hodnot tvrdosti nezpracovaného materiálu 12 060</i> .....	<i>40</i>
<i>Obr. 26. Porovnání hodnot tvrdosti cementovaného vzorku, ocel 11 353</i> .....	<i>41</i>
<i>Obr. 27. Porovnání hodnot tvrdosti kaleného zkušební vzorku 12 060</i> .....	<i>43</i>
<i>Obr. 28. Porovnání hodnot tvrdosti karbonitridovaného vzorku 11 353</i> .....	<i>44</i>
<i>Obr. 29. Porovnání tvrdosti HRA všech zkušebních vzorků</i> .....	<i>46</i>
<i>Obr. 30. Porovnání tvrdosti HRC všech zkušebních vzorků</i> .....	<i>47</i>
<i>Obr. 31. Porovnání tvrdosti HR15N všech zkušebních vzorků</i> .....	<i>48</i>
<i>Obr. 32. Porovnání tvrdosti HR30N všech zkušebních vzorků</i> .....	<i>49</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Značení a symboly [9]</i> .....	<i>15</i>
<i>Tab. 2. Značení a symboly [10]</i> .....	<i>18</i>
<i>Tab. 3. Symboly a značení [11]</i> .....	<i>22</i>
<i>Tab. 4. Použité normy při měření</i> .....	<i>35</i>
<i>Tab. 5. Vnikací těla a zkušební síly pro zadané metody podle Rockwella</i> .....	<i>38</i>
<i>Tab. 6. Naměřené hodnoty nezpracovaného základního zkušebního vzorku, oceli 12060</i> .....	<i>39</i>
<i>Tab. 7. Naměřené hodnoty cementovaného vzorku oceli 11 353</i> .....	<i>41</i>
<i>Tab. 8. Naměřené hodnoty kaleného zkušebního vzorku, oceli 12 060</i> .....	<i>43</i>
<i>Tab. 9. Naměřené hodnoty karbonitridovaného vzorku oceli 11 353</i> .....	<i>44</i>