

# Měření tvrdosti funkčních částí materiálů forem

Martin Janošík

---

Bakalářská práce  
2015

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Janošík**  
Osobní číslo: **T13799**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření Tvrdosti Funkčních Částí Materiálů Forem**

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:

**doc. Ing. David Maňas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**30. ledna 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**22. května 2015**

Ve Zlíně dne 9. února 2015

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



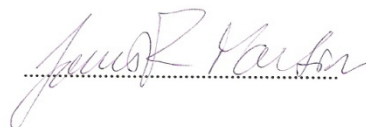
  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně ..... 19.5.2015



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

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

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

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

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>31</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce popisuje měření tvrdosti (nanotvrdosti) tenkých vrstev povlaků pro mechanické části forem, zejména pro tvarovou dutinu formy. Měření proběhlo na 5 vzorcích, z nichž byl 1 vzorek nepovlakovaný a vyrobený z nástrojové oceli 19 552 (1.2343). Zbylé 4 zkušební vzorky byly povlakovány, z nichž každý jiným druhem povlaku. Instrumentovaná zkouška tvrdosti (nanotvrdosti) byla provedena na nanotvrdoměru (NHT2) – Opx/Cpx od firmy CSM Instruments při aplikovaném zatížení 10mN. Výsledky měření nanosených povlaků ukázaly, že nedošlo ke zhoršení mechanických vlastností testovaných zkušebních vzorků.

Klíčová slova: Tvrdost materiálu, statické zkoušky tvrdosti, dynamické zkoušky tvrdosti, tepelné zpracování, chemicko-tepelné zpracování, povlakování

## **ABSTRACT**

Bachelor's thesis describes the measurement of hardness (nanohardness) thin film coatings for mechanical parts molds, especially for mold cavity shape. Measurement was carried out on 5 samples, one of which was uncoated and one sample made from tool steel 19552 (1.2343). The remaining four test samples were each coating of another type of coating. Instrumented hardness test (nanohardness) was performed on nanotvrdoměru (NHT2) - OPX / CPX from CSM Instruments at an applied load 10mn. The measurement results deposited coatings showed that there was no deterioration in the mechanical properties of the test specimens.

Keywords: Material hardness, the static hardness tests, the dynamic hardness tests, heat treatment, chemical-heat treatment, coating

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

Prohlašuji, že odevzdávám verze bakalářské práce a verze elektronická náhrada do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ZKOUŠKY TVRDOSTI</b> .....	<b>12</b>
1.1 ROZDĚLENÍ ZKOUŠEK TVRDOSTI.....	12
1.2 VRYPOVÁ ZKOUŠKA .....	14
1.3 ZKOUŠKA VNIKACÍ .....	15
1.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella .....	16
1.3.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwela .....	20
1.3.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse:.....	22
1.4 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	24
1.4.1 Zkouška tvrdosti Baumannovým kladívkem .....	24
1.5 ZKOUŠKY ODRAZOVÉ .....	24
1.5.1 Zkouška tvrdosti Shoreho skleroskopem .....	25
1.5.2 Měření pomocí Duroskopu .....	26
1.5.3 Tvrdoměr Equotip .....	27
<b>2 TEPelnÉ ZPRACOVÁNÍ</b> .....	<b>28</b>
2.1 TEPelnÉ ZPRACOVÁNÍ OCELI .....	28
2.1.1 Vliv rychlosti ochlazování na rozpad austenitu .....	29
2.1.2 Izotermický rozpad austenitu .....	30
2.1.3 Anizotermický rozpad austenitu .....	32
2.2 ŽÍHÁNÍ .....	34
2.3 KALENÍ .....	37
2.4 POPOUŠTĚNÍ .....	38
2.4.1 Zušlechťování.....	39
2.5 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ .....	39
2.5.1 Cementování .....	40
2.5.2 Nitridování .....	40
2.5.3 Nitrocementování .....	40
2.5.4 Karbonitridování .....	41
<b>3 MATERIÁLY FOREM</b> .....	<b>42</b>
3.1 NÁSTROJOVÁ OCEL .....	42
3.2 KONSTRUKČNÍ OCELI .....	43
<b>4 POVLAKOVÁNÍ</b> .....	<b>44</b>
4.1 METODA PVD (PHYSICAL VAPOUR DEPOSITION).....	44
4.2 METODA CVD (CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION) .....	45
4.3 METODA PACVD (PLASMA ASISTED CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION).....	45
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>46</b>
<b>5 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>47</b>



5.1	TYP ZKOUŠKY .....	48
5.2	ZKUŠEBNÍ VZORKY .....	48
5.3	POSTUP MĚŘENÍ.....	50
<b>6</b>	<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>51</b>
6.1	VYHODNOCENÍ VTISKOVÉ TVRDOSTI.....	52
6.2	VYHODNOCENÍ VTISKOVÉHO MODULU PRUŽNOSTI.....	53
6.3	VYHODNOCENÍ TVRDOSTI DLE VICKERSE.....	54
6.4	VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ ELASTICKÉ DEFORMAČNÍ PRÁCE, PLASTICKÉ DEFORMAČNÍ PRÁCE A KOEFICIENTU ZPĚTNÉ DEFORMACE. ....	55
	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>56</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>59</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>66</b>

## ÚVOD

Historie měření tvrdosti kovů se datuje do roku 1722, kdy jako první určil vtiskovou metodou tvrdosti René Antoine Ferchault de Réaumur, který vyjádřil tvrdost jako průnik hran dvojice trojbokých hranolů. O 100 let později byla představena stupnice desíti nerostů, z nich každý následující je schopen vyrýt vryp do všech předcházejících nerostů, tuto stupnici sestavil Friedrich Mohs roku 1822. Tato stupnice ovšem nebyla vhodná pro hodnocení kovů, proto roku 1892 byla vynalezena vrypová zkouška podle Martense. Na přelomu 19. a 20. století vznikají nové metody. K nejvýznamnějším patří zkouška tvrdosti podle Brinella, Rockwella a Vickerse. [1] [20]

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

Tvrdost definujeme jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Na této definici je založena většina přístrojů k měření tvrdosti. Hodnoty tvrdosti se uvádějí buď bez jednotek, nebo jsou-li odvozeny ze vztahu tlakovou silou a plochou vtisku, přisuzujeme jim jednotku MPa. Protože však tento způsob může vést k omylům (k záměně za pevnost), je lépe uvádět tvrdost jako číslo nepojmenované, pouze s udáním způsobu měření nebo stupnice. Pro tvrdost používáme značku H. Zkoušky tvrdosti se rozdělují na zkoušky vrypové, vnikací a odrazové. [1] [8]

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZKOUŠKY TVRDOSTI

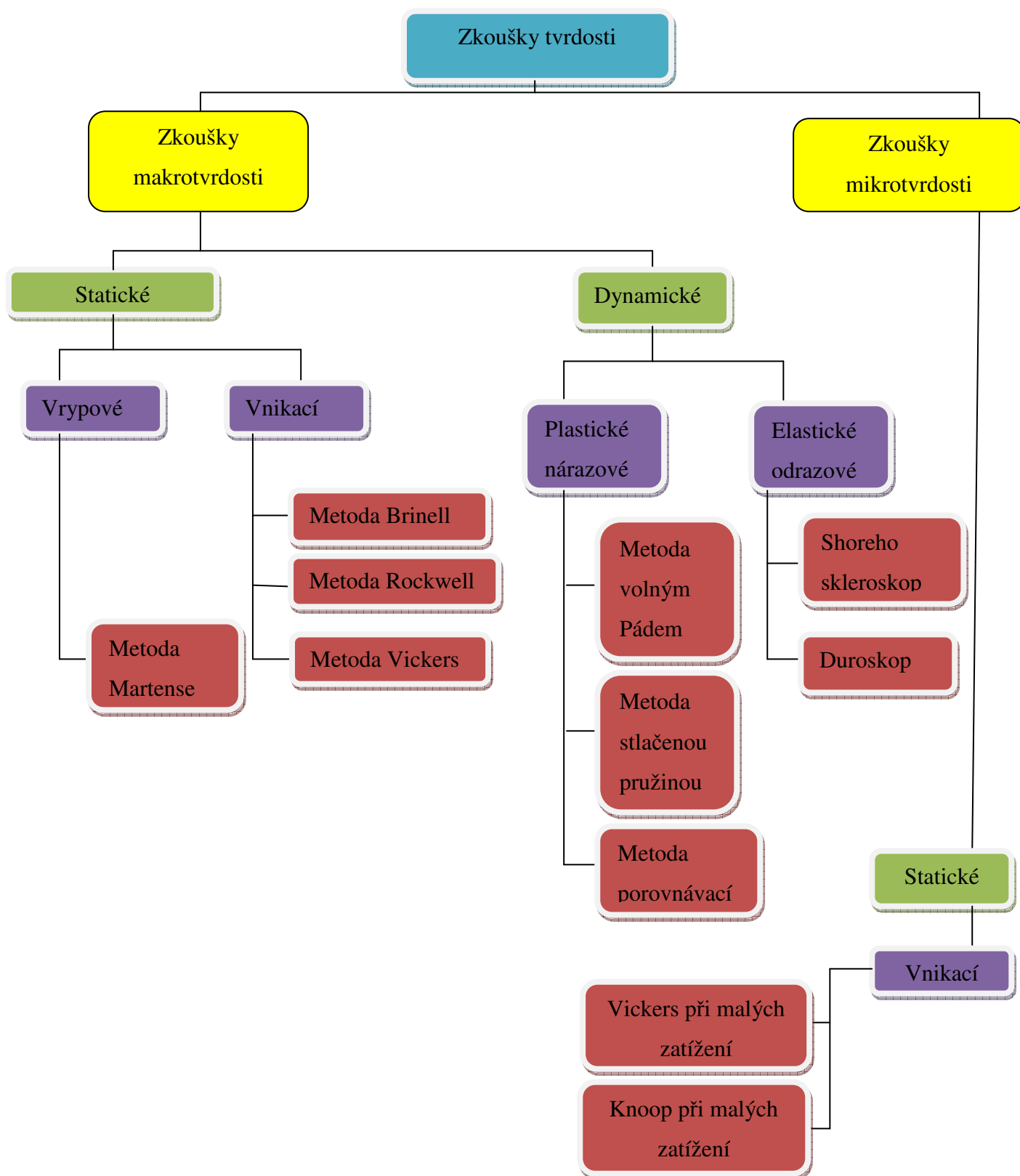
Tvrdot – odolnost povrchových oblastí materiálu proti místnímu porušení cizím tělesem. Tvrdot však není žádnou fyzikálně definovanou vlastností, nýbrž je výslednicí celé řady vlastností hmoty, a to zejména vlastností povrchu.

Podle způsobu porušení povrchu zkoušeného kovu se dělí zkoušky tvrdosti na:

- 1) Statické – Indentor 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 – indentor proniká do zkoumaného povrchu rázem vedeným kolmo tzv. „rázové zkoušky“ [1] [8]

### 1.1 Rozdělení zkoušek tvrdosti

1. Podle principu provedení zkoušky:
  - Zkoušky vrypové
  - Zkoušky vnikací
  - Zkoušky nárazové
  - Zkoušky odrazové
2. Rychlosti zatěžující síly
  - Statické
  - Dynamické
3. Účelu měření
  - Zkoušky makrotvrdoti
  - Zkoušky mikrotvrdoti [11]



Tab. 1. Rozdělení zkoušek tvrdosti [20]

## 1.2 Vrypová zkouška

Tento typ zkoušky patří mezi nejstarší, její princip byl převzat z mineralogie. Kde se ke klasifikaci tvrdosti používá tzv. Mohsova stupnice tvrdosti (Tab. 2). V této stupnici je seřazeno 10 nerostů, z nich každý následující je schopen vyrýt do všech předcházejících nerostů vryp.

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

Tab. 2. Mohsova stupnice tvrdosti a tvrdost materiálů používaných ve strojírenství podle Mohsovy stupnice [11]

Citlivost této stupnice je však velmi malá, proto se u kovů a jejich slitin určuje tvrdost na základě šířky vytvořeného vrypu.

Dnes je používána pouze pro tvrdé a křehké materiály (sklo, porcelán aj.). V technické praxi se používá zkouška podle Martenze. Po vyhlazené ploše zkoušeného kovu pojíždí diamantový kužel s vrcholovým úhlem 90°, který lze zatížit 19,8N. Vytvořený vryp se měří pomocí optického mikroskopu. Mírou tvrdosti je pak síla  $F$ , potřebná ke vzniku vrypu širokého 0,01mm. Druhou možností je, že se při stejném zatížení vytvoří vryp a porovná se jeho šířka. Způsob zjišťování tvrdosti vrypovou metodou je značně nepřesný, a proto se používá velmi málo. Jediné, současně praktické využití vrypové zkoušky je možno při

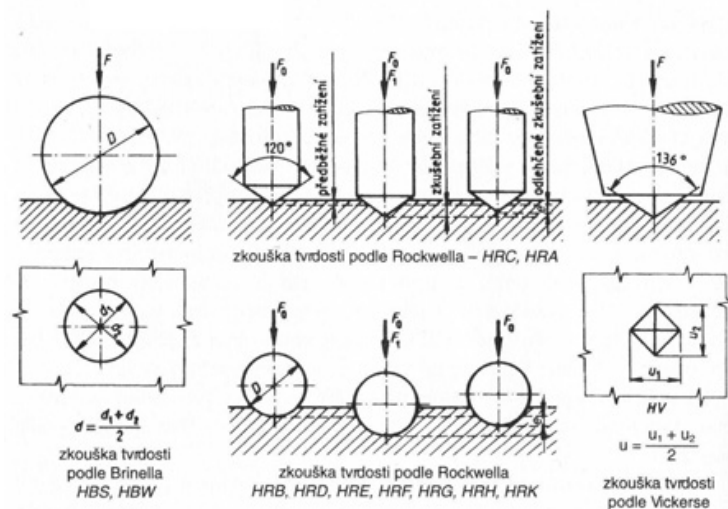
studiu velmi tvrdých povrchových několik mikrometrů tenkých vrstev nitridů popř. Karbidů kovů. V literatuře se tato zkouška nazývá scratch test. [8] [11] [20]

### 1.3 Zkouška vnikací

Zkouška vnikací je nejpoužívanější zkouškou při zjišťování tvrdosti materiálu. Při této zkoušce zatlačujeme do zkušebního materiálu velmi tvrdé těleso (kulička, kužel, jehlan) a měřítkem tvrdosti je velikost vzniklého vtisku (jeho průměr, hloubka nebo úhlopříčka, Obr. 1) Nejznámější jsou zkoušky tvrdosti podle Brinella, Rockwella, a Vickerse. Tvrdost neželezných kovů (Cu, Sn, Pb, Al a jejich slitin) zkoušíme nejčastěji podle Brinella, tvrdé a kalené materiály podle Rockwella. Zkouška tvrdosti podle Vickerse odstraňuje nevýhody obou předcházejících zkoušek a je nejpoužívanější.

Rozhodujícím činitelem jsou hlavně:

- a) Tvar krystalových elementů
  - b) Jemnost krystalizace – jemnozrná struktura má v objemu více krystalografických rozhraní, která více odolávají vnikání cizích těles, a z tohoto důvodu vykazuje jemnozrná struktura vyšší tvrdost
  - c) Teplota – čím větší teplota, tím se vlivem roztahování stávají vazby méně pevné a kov se 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 její tvrdost.
  - e) Vnitřní pnutí – tvrdost zvětšují různá pnutí, způsobená např. Tvářením za studena, tepelná pnutí od nestejného ochlazování, pnutí způsobená nestabilními fázemi atd.
- [1] [8] [11] [20]



Obr. 1 Zkoušky tvrdosti [1]

### 1.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Tato metoda nese název po švédském inženýrovi Johanu Augustu Brinellovi, který je poprvé na veřejnosti předvedl v roce 1900 na světové výstavě v Paříži. Dnes je to jedna z nejběžnějších zkoušek převážně pro kovové materiály. Zkouška je vhodná na zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů s heterogenní strukturou. Pro tuto zkoušku platí norma ČSN EN ISO 6506-1, 2, 3, 4 (42 0359) [11]

#### Princip zkoušky:

Zkoušku provádíme na povrchu zkušebního tělesa nebo přímo na povrchu dané součásti, která musí být hladká a rovná, bez okují a hlavně bez mazadel. Zkouška spočívá ve vtlačování vnikajícího (zkušebního) tělesa do povrchu zkoušeného tělesa a změření vtisku o průměru  $d$  (aritmetických průměrů dvou na sebe kolmých rozměrů  $d_1$  a  $d_2$ ), který zůstane na povrchu po odlehčení zkušebního zatížení  $F$  (obr. 1). Vnikajícím tělesem je kulička z tvrdokovu (pro tvrdost do 650HBW). Tloušťka zkušebního tělesa musí mít alespoň osminásobek hloubky vtisku  $h$  (obr. 1) Teplota měření musí být 10 – 35°C (obvykle 23±5 °C), doba počátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí být menší než 2s a delší než 8s. Doba plného zkušebního zatížení má být v rozmezí 10 až 15 s. Zkušební zatížení musí být vybráno tak, aby průměr vtisku byl v rozmezí 0,24D až 0,60D. Poměr zatížení k průměru kuličky  $\left(\frac{0,102 \cdot F}{D^2}\right)$  musí být vybrán s ohledem na zkoušený materiál a jeho



tvrdost. Tvrdost podle Brinella se určuje jako poměr zkušebního zatížení a povrchu vtisku a označuje se HBW. Hodnota tvrdosti se zjistí v normách nebo ST. [1] [20]

Vzorec pro výpočet tvrdosti byl upraven takto:

$$HBW = 1,02 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

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

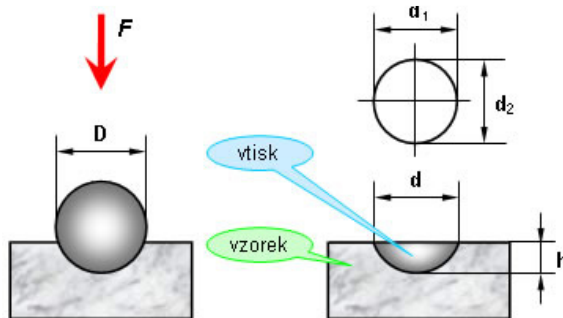
### Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Brinella

Hodnota tvrdosti	Symbol tvrdosti	Rozměr vnikacího tělesa	Velikost zkušebního zatížení	Doba působení zkušebního zatížení*)
$\frac{\quad}{X X X}$	$\frac{\quad}{H B W}$	$\frac{\quad}{X X /}$	$\frac{\quad}{X X X /}$	$\frac{\quad}{X X}$

\*) uvádí se jen, pokud se doba zatížení liší od stanovené doby (10 až 15 s).

Přesnost zkoušky závisí na správném poměrném vtisku. U zkoušky podle Brinella je to mnohdy obtížné, což je nevýhodou. Vtisk bývá někdy nezřetelný a nesouměrný. Příčinou další chyby je deformace kuličky z tvrdokovu. K měření vtisku se dnes stále více používá optické řešení měřícího zařízení (číselníkový úchylkoměr, optický světelný displej nebo digitální elektronické údaje). Hodnoty tvrdosti nelze obecně převést na jiné tvrdosti nebo pevnost v tahu. Takové přepočty lze používat, jen pokud jsou k dispozici spolehlivé podklady\*) [1]

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



Obr. 2 Princip tvrdosti podle Brinella [11]



Obr. 3 Stolní tvrdoměr Brinell série B-3000 [22]

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

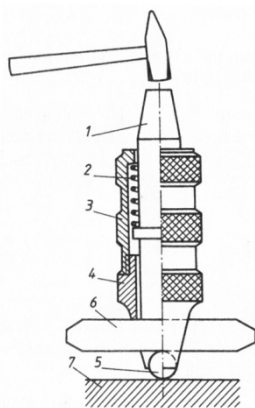
Tab. 3. Vztah průměrů a zatěžujících síly u metody Brinell [20]

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

Tab. 4 Volba poloměru  $0,102 F/D^2$  pro různé materiály [20]

#### Brinellovy tvrdoměry:

Mají různou velikost a provedení. Ve velkých továrnách a laboratořích, kde se zkoušky tvrdosti konají po celý pracovní den, mají velké stabilní přístroje. Pro malé dílny, sklady, montáže nebo pro zkušební účely na stavbách byly zkonstruovány malé přenosné stroje. Nejpoužívanější je ruční přenosný (kapesní) tvrdoměr Poldi (obr. 2). Principem je porovnání známé pevnosti materiálu porovnávací tyčinky s pevností zkoušeného materiálu. Pracuje se s ním tak, že tvrdoměr přiložíme na zkoušený předmět a kladivem udeříme na úderník. Ocelová kulička se úderem kladiva zatlačí do zkoušeného materiálu a vytvoří v něm otisk. Zároveň se kulička vtiskne i do porovnávací tyčinky. Lupou se změří průměry vtisku na zkoušeném materiálu i na porovnávací tyči. V tabulkách, které jsou ke každému tvrdoměru přiloženy, vyhledáme tvrdost podle velikosti vtisku. [8] [9] [10]



- 1- Úderník
- 2- Pružina
- 3- Těleso
- 4- Podstavec
- 5- Kulička
- 6- Porovnávací tyčka
- 7- Zkoušený materiál

Obr. 4 Ruční tvrdoměr Poldi

[8]

### 1.3.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwela

Tato zkouška byla vyvinuta v Americe S. P. Rockwellem a poprvé použita v roce 1922. Norma ČSN ISO 6508 (42 0373):1993 byla nahrazena novou normou ČSN EN 6508-1,2 (42 0360):2000. [1]

*Princip zkoušky:*

Zkouška spočívá v postupném (dvěma stupni zatížení – na dvakrát) vtlačování vnikacího tělesa do povrchu zkušebního tělesa a změření hloubky vtisku  $h$  (jednotka měření  $h=0,002\text{mm}$ ). Vnikajícím tělesem je diamantový kužel o vrcholovém úhlu  $120^\circ$  nebo kulička z tvrdokovu o průměru 1,585 nebo 3,175mm. Celkové zkušební zatížení  $F$  se skládá z předběžného zatížení ( $F_0=98,07\text{N}$ ) a přídatného ( $F_1$  je různé podle stupnice tvrdosti) (obr. 5);  $F=F_0+F_1$  (tab. 5) [1] [20]

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Typ vznikajícího tělesa	Předběžné zatížení $F_0$ (N)	Přídavné zatížení $F_1$	Celkové zatížení $F$	Oblast použití
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3 N	588,4 N	20 až 88
B	HRB	Kulička 1,587 5 mm	98,07	882,6 N	980,7 N	20 až 100
C	HRC	Diamantový kužel	98,07	1,373 kN	1,471 kN	20 až 70
D	HRD	Diamantový kužel	98,07	882,6 N	980,7 N	40 až 77
E	HRE	Kulička 3,175 mm	98,07	882,6 N	980,7 N	70 až 100
F	HRF	Kulička 1,587 5 mm	98,07	490,3 N	588,4 N	60 až 100
G	HRG	Kulička 1,587 5 mm	98,07	1,373 kN	1,471 kN	30 až 94
H	HRH	Kulička 3,175 mm	98,07	490,3 N	588,4 N	80 až 100
K	HRK	Kulička 3,175 mm	98,07	1,373 kN	1,471 kN	40 až 100

Tab. 5 Zkoušky tvrdosti podle Rockwella – stupnice a rozsahy použití [1]

Diamantový kužel nebo kulička z tvrdokovu, dotýkající se povrchu zkoušeného tělesa (výchozí poloha pro měření hloubky vtisku), zatížení předběžnou silou  $F_0$ . Potom zvolna sílu zvětšujeme a přidáváme zatížení  $F_1$ , až dostaneme celkové zatížení  $F$  předepsaného normou. Pak přídavné zatížení  $F_1$  opět odlehčujeme na předběžné zatížení  $F_0$  a zjistíme hloubku vtisku  $h$ . Z hodnoty  $h$  a dvou konstant  $N$  (číslo charakterizující stupnici) a  $S$  (jednotková stupnice) se vypočítá tvrdost podle Rockwella ze vzorce:

$$\text{Tvrdost podle Rockwella} = N - \frac{h}{S} \quad (3)$$

U materiálů, které při zkoušce vykazují podstatnou závislost plastické deformace na čase, se odlehčuje po uplynutí (10-15 s) s působením celkového zkušebního zatížení  $F$ . U materiálů, které vykazují omezenou nebo žádnou závislost plastické deformace na čase, se doba celkového zkušebního zatížení rovná (1 až 5 s). Většina tvrdoměrů pro tuto zkoušku

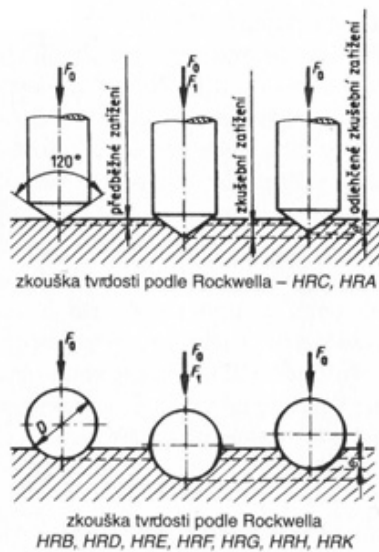
se upravuje tak, že hloubku vtisku odečteme na číselníkovém úchylkoměru, ze kterého odečteme přesnou hodnotu tvrdosti podle Rockwella. Je to zkouška rychlá a snadná a vtisky jsou malé (maximálně 0,2mm).

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 98N se nastaví hloubkoměr na nulu a zatíží se hlavní silou (tab. 5).

### Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Rockwella

Hodnota tvrdosti	Symbol tvrdosti	Doba působení zkušebního zatížení*)
$\frac{ }{X X}$	$\frac{ }{H R X}$	$\frac{ }{X X}$
		Stupnice tvrdosti (A až K)

[1] [8] [9] [10] [20]



Obr. 5. Princip zkoušky podle Rockwella [20]



Obr. 6 Stolní tvrdoměr Rockwell série RA-150 [21]

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

### 1.3.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse:

Současně se vznikem Rockwellovy metody vznikla v Anglii metoda, kterou popsali Smith a Sandland. V Evropě je tato zkouška známá podle tvrdoměru firmy Vickers. V USA je obvykle označována diamond pyramid hardness test. Norma ČSN ISO 6507-1

(42 0374):1993, ČSN ISO 6507-2 (42 0374):1993 byla nahrazena novou normou ČSN EN ISO 6507- 1,2 (42 0374):1999 [1] [20]

*Princip zkoušky:*

Zkouška spočívá ve vtlačování diamantového vnikajícího tělesa do zkušebního tělesa pod zkušebním zatížením  $F$  po stanovenou dobu a změření úhlopříček vtisku (zjistíme aritmetický průměr délek obou změřených úhlopříček  $u_1$  a  $u_2$ ), který zůstane po odlehčení zatížení. Vnikajícím tělesem je čtyřboký diamantový jehlan o vrcholovém úhlu  $136^\circ$ . Zkušební zatížení se volí podle (tab. 6). Doba působení plného zkušebního zatížení musí být 10 až 15 s. (pro některé materiály lze použít delší dobu. Potom musí být vyznačena

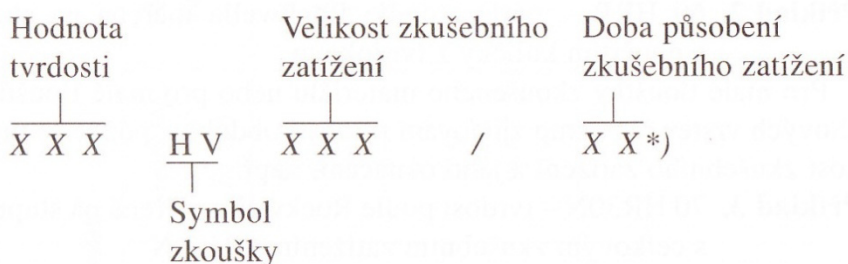
v označení tvrdosti). Po provedení vtisku se měří jeho úhlopříčka. Její hodnota je pak dosazena do vztahu [8] [10]

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \tag{4}$$

F- zatěžující síla [N], u- průměrná hodnota úhlopříčky [mm]

Tuto metodu můžeme použít pro všechny tvrdosti. Je velmi přesná a není téměř závislá na zatížení. Ve velkých závodech se používá zdokonalených Vickersových tvrdoměrů, tzv. Diatestoru. Obraz čtvercového vtisku je promítán ve zvětšeném měřítku na matnici. To umožňuje pohodlné a rychlé čtení délky úhlopříček. Hodnoty tvrdosti podle HV nelze obecně převést na jiné tvrdosti nebo pevnost v tahu. Takové přepočty lze používat jen, pokud jsou k dispozici spolehlivé podklady. [9] [1] [20]

**Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Vickerse**



Označení	Symbol tvrdosti HV	Zkušební zatížení F (N)
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	≥ HV 5	F ≤ 49,03
Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení	HV 0,2 až HV 5	1,961 ≤ F ≤ 49,03
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	HV 0,01 < HV 0,2	0,098 07 ≤ F < 1,961

Tab. 6 Zkoušky tvrdosti podle Vickerse – typy zkoušek a rozsahy použití [1]

## 1.4 Dynamické zkoušky tvrdosti

U dynamických zkoušek na materiál nepůsobí plynule rostoucí síla, zatížení je vyvozeno dynamicky, rázem. Nevýhodou dynamických zkoušek proti zkouškám statickým je menší přesnost naměřených hodnot.

Výhodou je, že tvrdoměry jsou malých rozměrů a dají se snadno přenášet. Zkoušky dynamické mají tedy uplatnění zejména v provozních podmínkách a při měření tvrdosti rozměrných součástí, které nelze zkoušet v laboratoři. Podle povahy deformace vzniklé ve zkoušeném materiálu se rozlišují zkoušky plastické a elastické. Mezi dynamické zkoušky tvrdosti patří kladívko Poldi nebo Baumannovo kladívko. [9] [10]

### 1.4.1 Zkouška tvrdosti Baumannovým kladívkem

Baumannovo kladívko pracuje na principu vyvolávání rázové energie k vytvoření vtisku pružinou, která má definovanou tuhost. Proto je kulička vždy stálou energií vtiskována do zkoušeného materiálu. Hlavní součástí je pružina, která má definovanou tuhost. Indektorem je při zkoušce kulička a to buď o průměru 5mm nebo 10mm.

*Postup při měření Baumannovým kladívkem:*

V případě, že zkoušený vzorek nemá dostatečnou hmotnost, pokládá se na masivní podložku o hmotnosti asi 40 kg. Na kladívku se nastaví velikost síly (velikost stlačení pružiny) a přiloží se kolmo k povrchu zkoušeného materiálu. Stlačením zaobleného konce se pružina uvolní a vymrští razník s kuličkou, která vytvoří ve zkoušeném materiálu vtisku. Lupou se změří velikost vtisku a podle tabulek se na základě velikosti vtisku určí tvrdost. Protože je síla úderů vždy stejná, není třeba používat etalon ani korigovat výsledky. Podobně jako kladívko Poldi, je Baumannovo kladívko vhodné spíše do provozního prostředí. Hodnoty naměřené Baumannovým kladívkem nejsou tak přesné jako hodnoty naměřené Brinellovou metodou. [9] [10] [20]

## 1.5 Zkoušky odrazové

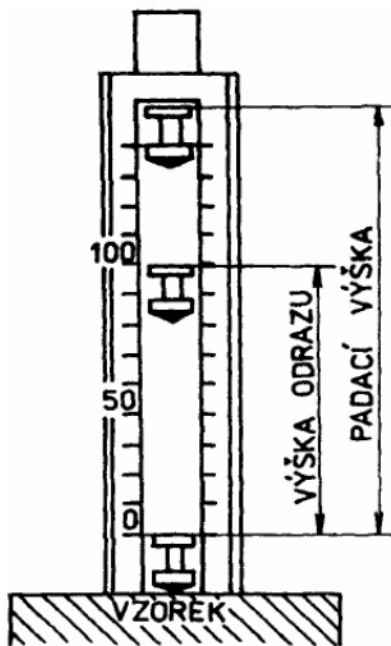
Metoda pružného odrazu je založena na měření tvrdosti na základě pružného tělesa, padajícího z určité výše na povrch kovu. Výška nebo úhel odrazu tohoto tělesa charakterizují tvrdost zkoušeného materiálu. Výška, nebo úhel odrazu tohoto standardního tělesa charakterizuje tvrdost zkoušeného materiálu. Při této metodě nevzniká trvalá deformace (případně je velmi malá). Tyto zkoušky lze využít hlavně na součásti, na



kterých je vytvoření vtisku nepřipustné. V principu se měří rozdíl pádem indektoru dodané energie a energie získané útlumem pružných deformací. Celková energie je pak součtem trvalých a pružných energií. Poměr těchto energií je pak ukazatelem tvrdosti materiálu. [8] [10]

### 1.5.1 Zkouška tvrdosti Shoreho skleroskopem

U původního Shoreho skleroskopu se pohybuje válcový čep ve skleněné trubce opatřené



Obr 7 Schéma Shoreho skleroskopu [10]

stupnicí, na které se odečte výška odrazu pomocí lupy. Nastavení počáteční výšky tělesa je možné buď vysátím vzduchu nebo tělesem pomocí gumového balónku nebo u některých přístrojů pomocí pružiny.

*Postup při měření tvrdosti Shoreho skleroskopem:*

Povrch zkoušeného materiálu musí být hladký a tělíčko dopadá vícekrát na stejné místo. Hodnoty získané pomocí Shoreho skleroskopu nejsou velmi přesné (např. kvůli tření vedení). Metoda se používá především pro velmi tvrdé materiály a měkké elastické materiály. V současné době má Shoreho metoda dvě stupnice HSC a HSD. [8] [10]

Stupnice HSC: Hmotnost pádového tělesa = 2,5g

Pádová výška = 254mm

$$HSC = \frac{10 \cdot h_2}{65 \cdot h_1} \quad (5)$$

$h_1$ ..... padací výška [mm]

$h_2$ ..... výška odrazu [mm]

Stupnice HSD: Hmotnost pádové ho tělesa = 36,2g

Pádová výška = 19mm

$$HSD = \frac{140 \cdot h_2}{h_1} \quad (6)$$

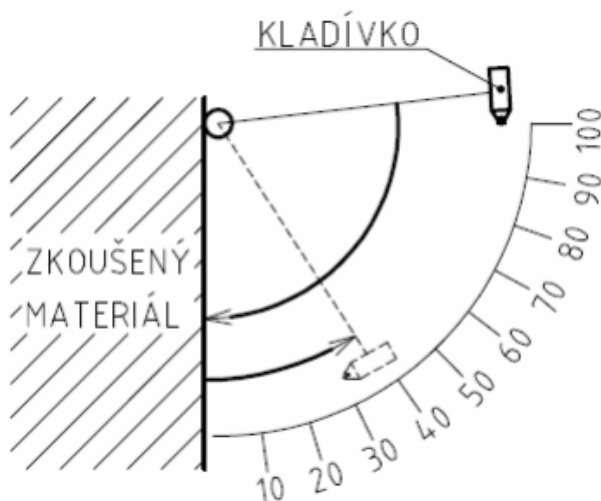
$h_1$ .....pádová výška [mm]

$h_2$ ..... výška odrazu [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 elektromagnetické pole. Vyhodnocení je prováděno výlučně elektronicky s možností přepočtu na jiné stupnici. [8] [10]

### 1.5.2 Měření pomocí Duroskopu

Duroskop je méně používaný, než přístroj předchozí. Duroskop se skládá z kladívka s ocelovým kulovým vrchlíkem na čele. Toto kladívko dopadá z určité výšky na zkoušený předmět. Opět výška odrazu je ukazatelem tvrdosti zkoušeného povrchu. Tato metoda se používá pro měření tvrdosti svislých ploch. Kladívko padá neustále ze stejné výšky (úhlu). Po nárazu je vymrštěno opačným směrem. Při odrazu kladívko zachytne ručičku, která zaznamená výšku odrazu. Výška (úhel) odrazu je mírou tvrdosti. Výsledná tvrdost se pomocí vlečené ručičky odečítá přímo na stupnici tvrdoměru. Princip je zobrazen na obrázku 8. [8] [12]



Obr. 8 Princip měření duroskopem [8]

### 1.5.3 Tvrdoměr Equotip

Metoda je založena na Leebově principu. Měřicí metoda realizovaná přístroji EQUOTIP



(obr. 9) je jednoduchá dynamická zkouška tvrdosti. Nárazové tělíčko ze zušlechtěné oceli je vrženo silou vyvozenou pružinou proti kontrolované ploše. Dopad tělíčka vyvolá deformaci kontrolované plochy, což vede ke snížení kinetické energie. Pro určení tvrdosti se měří rychlost padajícího a odraženého tělíčka v určité definované vzdálenosti od kontrolované plochy. Poměr

*Obr. 9 Tvrdoměr Equotip[21]*

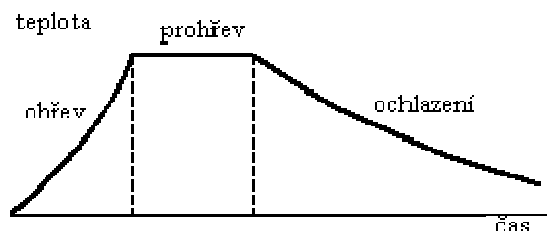
obou rychlostí násobené tisícem, slouží ke stanovení hodnoty HL (tvrdosti Leeb, nazváno podle autora

metody). Hlavní použití měřicího přístroje EQUOTIP je měření na těžkých a velkých součástech, zejména součástech již zabudovaných do strojních celků a skupin. Výhodou je měření na zakřivených plochách ( $R > 10$ ), může pracovat i v rozsahu teplot (0 až 50 °C). [20]

## 2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Vlastnosti kovových materiálů jsou závislé nejen na jejich chemickém složení, ale především na jejich struktuře, tj. na množství, tvaru, velikosti a rozložení jednotlivých fází. Vhodnou strukturou lze využít kovové materiály co nejlépe např. snížit hmotnost stroje nebo strojního zařízení, popř. použít materiály levnější. Obojí přispívá ke zvýšení hospodárnosti výroby. Požadovanou strukturu daného kovového materiálu získáme hlavně tepelným zpracováním, a proto dobrý technik musí ovládat základy znalosti tohoto oboru.

Tepelným zpracováním kovů se rozumí postup, při kterém se řízeně mění teploty a někdy také chemické složení kovu. V podstatě jde vždy o souhrn těchto operací: ohřev určitou rychlostí na danou teplotu, výdrž na této teplotě a ochlazování určitou rychlostí na konečnou teplotu. Někdy se tyto operace opakují vícekrát za sebou za různých podmínek.



Obr. 10 Schéma průběhu  
tepelného zpracování [7]

Konkrétní druh tepelného zpracování je charakterizován rychlostí a průběhem ohřevu konečnou výškou teploty ohřevu, dobou setrvání na dané teplotě a rychlosti ochlazování, případně podmínkami při opakování základního postupu. [1] [7]

### 2.1 Tepelné zpracování oceli

Tepelné zpracování oceli je založeno na řízené difuzi atomů materiálu. Z toho je možno tepelně rozdělit do dvou základních skupin.

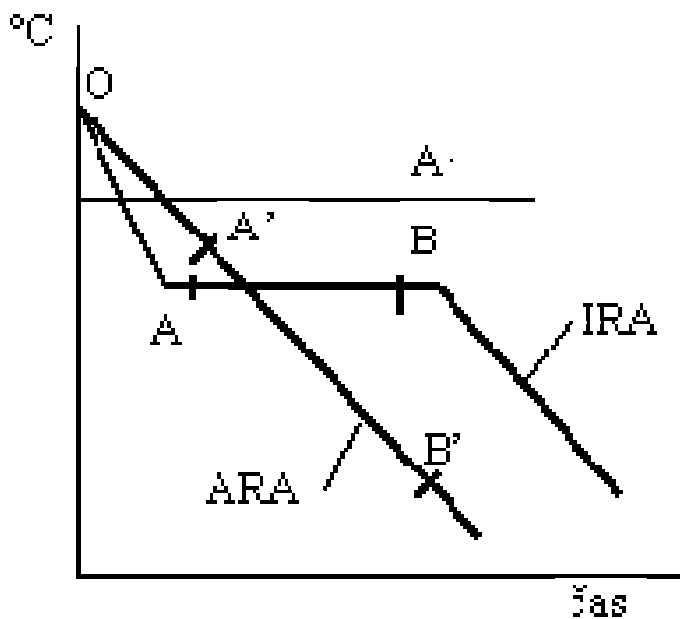
- Způsoby, při kterých je difuze podporována
- Způsoby, při kterých je difuze potlačována: do této skupiny patří především kalení

U postupů první skupiny probíhají děje tak pomalu, že stav soustavy je blízký rovnováze. Patří zde žíhání. Pro postupy druhé skupiny je naopak typický rychlý průběh teplotních změn, při kterém je vlivem setrvačnosti materiálu rovnováha soustavy porušena. Důsledkem je zpomalení až potlačení některých procesů. [2] [7]

### 2.1.1 Vliv rychlosti ochlazování na rozpad austenitu

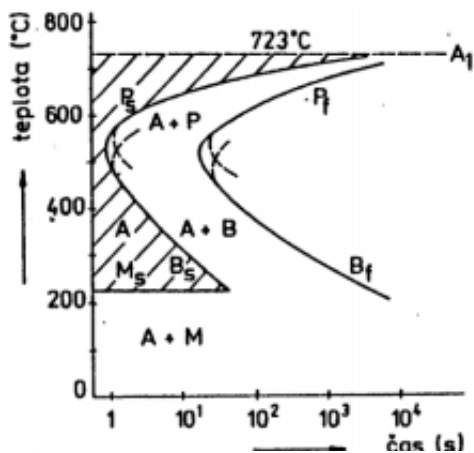
Rozpad tuhé fáze s překrytím a se změnou rozpustnosti vysvětlíme na rozpadu austenitu. Má totiž největší význam, neboť umožňuje kalení a zušlechťování oceli. Avšak stejně můžeme kalit některé slitiny neželezných kovů (Cr-Mn, Cu-Mn), u nichž rovnovážný diagram je podobný jako u oceli. Rozpad austenitu lze realizovat dvěma způsoby:

1. Slitina se ohřeje do oblasti austenitu, ponechá se na této teplotě tak dlouho, dokud neproběhne úplná austenitizace a pak se prudce ochladí (teoreticky nekonečně velkou ochlazovací rychlostí) na určitou teplotu. Ta se pak udržuje konstantní a sleduje se průběh rozpadu austenitu v závislosti na čase. Jde o tzv. Izotermický rozpad austenitu.
2. Slitina se z austenitizační teploty plynule ochlazuje (v praxi nejčastější) a sleduje se průběh rozpadu. Mluvíme potom o anizotermickém rozpadu austenitu. [2] [7] [15]



Obr. 11 Izotermický a Anizotermický rozpad austenitu [7]

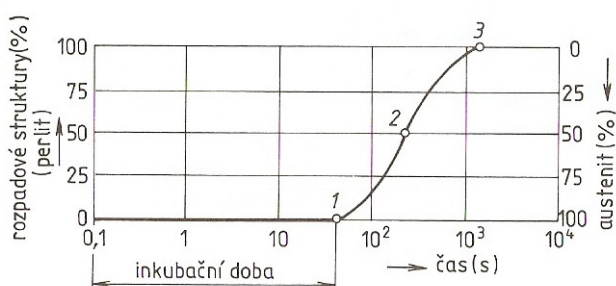
### 2.1.2 Izotermický rozpad austenitu



Obr. 12 Diagram IRA[16]

Při nižších teplotách než je  $723^{\circ}\text{C}$  se austenit rozpadá na perlit, což je směs feritu a cementitu. Přitom přeměna se řídí stejnými zákony jako u krystalizace z tekutého stavu, tj. vznikem zárodků nové fáze a rychlosti růstu na těchto zárodcích. Proto trvá přeměna austenitu na perlit určitou dobu a průběh rozpadu můžeme pro danou teplotu vyjádřit křivkou závislosti procenta vzniklých rozpadových struktur na čase. Tvar a poloha křivek IRA jsou ovlivněny zejména chemickým složením

oceli a stavem austenitu. Křivky mají tvar písmene „C“, které znázorňuje počátek a konec perlitické a bainitické přeměny. V levé části diagramu je struktura austenitická, vpravo jsou struktury tvořeny perlitem nebo bainitem. Na obr. 13 rozpad začne v bodě 1 až po určité tzv. inkubační době, která je nutná pro vznik zárodku nové fáze. Vlastní rozpad trvá určitou dobu a končí v bodě 3. Bod 2 křivky odpovídá 50 % rozpadu. Časový interval mezi bodem 1 a 3 udává rychlost rozpadu. Tato křivka se získá například magnetickou indukční metodou, neboť austenit je nemagnetický, kdežto produkty rozpadu austenitu jsou magnetické. [2] [7] [16]



Obr. 13 Průběh izotermického rozpadu austenitu eutektoidní oceli při teplotě  $700^{\circ}\text{C}$  v závislosti na čase [2]

#### Perlitická přeměna

Rozpad austenitu neprobíhá za všech teplot pod  $723^{\circ}\text{C}$  stejně. Za teplot nad nosem křivky rozpadu probíhá rozpad austenitu podle zákonů vzniku perlitu. Čím víc se bude teplota

rozpadu blížit k teplotě nosu křivky, tím jemnější bude vzniklý lamelární perlit a naopak. [2] [16]

### **Bainitická přeměna**

Při vyšší ochlazovací rychlosti a nižší teplotě, než je teplota perlitické přeměny, vzniká bainit, nelamelární směs perlitu a cementitu. Bainit vzniklý za vyšších teplot se nazývá horní bainit a vlastnostmi a strukturou se blíží perlitu, zatímco za nižších teplot vzniká dolní bainit podobný martenzitu. Bainitická transformace neprobíhá úplně, část austenitu zůstane neproměněná ve formě zbytkového austenitu. Na obr. 14 je bainitická struktura. Výrazně je patrný vzniklý cementit (tmavé útvary) po stranách světlých feritových jehlic, vzniklých primárně v austenitu. V důsledku této jehlicové struktury se bainit vyznačuje značnou pevností, zejména vzniká-li za nižších teplot. Naproti tomu se ale vyznačuje poměrně vysokou houževnatostí. [2]



*Obr. 14 Bainitická struktura eutektoidní oceli s 3,5% manganu.*

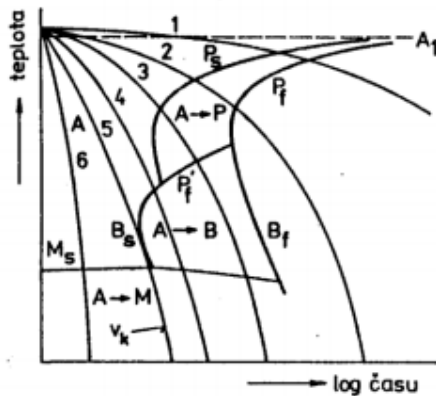
*Zvětšení 4 000 krát [2]*

### **Martenzitická přeměna**

Ochladíme-li totiž prudce austenit na teplotu pod  $M_s$ , probíhá jeho rozpad odlišně od předchozích. Při této teplotě jsou difuzní jevy zcela potlačeny, přeměnění se pouze mřížka  $\gamma$  na  $\alpha$  na jehlicovité až diskové útvary podle obsahu uhlíku a uhlík zůstane uzavřen v mřížce železa  $\alpha$ . Vznik martenzitu je doprovázen deformací mřížky a vznikem mřížkových poruch, které způsobují značná vnitřní pnutí. To se na venek projeví křehkostí a tvrdostí. Martenzitická přeměna probíhá atermálně. K transformaci nemůže dojít izotermicky při výdrži na teplotě, ale pouze při klesající teplotě. Rozpad začíná při teplotě  $M_s$  a probíhá podle křivky, která přechází při teplotě  $M_f$ , což je konec martenzitické přeměny ve vodorovnou přímku. Podobně jako u bainitické přeměny se i u martenzitické přeměny

vyskytuje zbytkový austenit, který se již ani při dalším snížení teploty nerozpadne. Podíl zbytkového austenitu roste především s obsahem uhlíku a některých legujících prvků. [2]

### 2.1.3 Anizotermický rozpad austenitu



Obr. 15 Diagram ARA [16]

Popsané diagramy IRA platí pro izotermické fázové přeměny. Při plynulém ochlazování, které je při tepelném zpracování mnohem častější, dochází k rozpadu austenitu při různých teplotách, závisí na rychlosti ochlazování. Právě tak jako při izotermickém rozpadu lze i při anizotermickém rozpadu zjistit pro každou rychlost ochlazování teplotu a dobu počátku a konce jednotlivých přeměn. Z nich pak sestojíme diagram ARA. S rostoucí rychlostí ochlazování se posouvá začátek a konec přeměny k nižším teplotám a kratším časům. Při dosažení určité rychlosti ochlazování vzniká struktura tvořená perlitem a bainitem. U vyšších rychlostí ochlazování vzniká martenzitická struktura. Čím je rychlost ochlazování vyšší, tím je křivka, která ji znázorňuje, strmější.

Vliv legujících prvků a podmínek austenitizace na polohu a tvar jednotlivých křivek diagramu ARA je podobný jako u diagramu IRA. Součet legur u nízkolegovaných ocelí zpravidla nepřesahuje 3-5%. Oceli se legují Cr, Mo, Ni, V, Mn, a Si z důvodu zvýšení mechanických vlastností, zejména se zvyšuje pevnost a tvrdost při zachování houževnatosti. Legurami (Cr, Mo, Ni, V) se zvyšuje prokalitelnost a Ti, Nb, Ta a V přispívají ke zmenšení sklonu oceli k růstu zrna a vyšších teplot, dosahuje se jemnozrná struktura. [2] [7] [16]

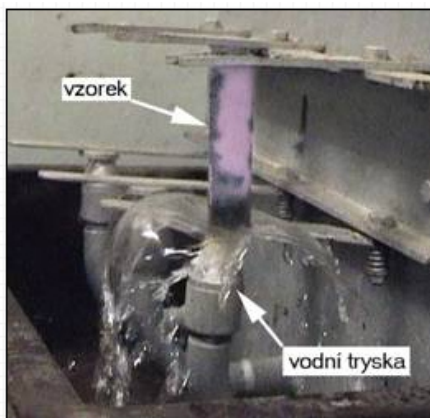


Kalící prostředí	Rychlost ochlazování [°C/s] v rozmezí teplot	
	650-550°C	350-250°C
Voda, 18°C	600	270
Voda, 50°C	100	270
10% NaCl, 18°C	1100	300
10% NaOH, 18°C	1200	300
Minerální olej	125	25
Vzduch	5	1

Tab 7. Rychlost ochlazování oceli v různých kalících médiích [15]

Je zřejmé, že nejintenzivněji ochlazuje voda a některé vodné roztoky solí. Nevýhodou je vysoká rychlost ochlazování v průběhu martenzitické transformace, čímž dochází ke vzniku velkého vnitřního pnutí. Z toho pohledu se jeví vhodnější olejové lázně.

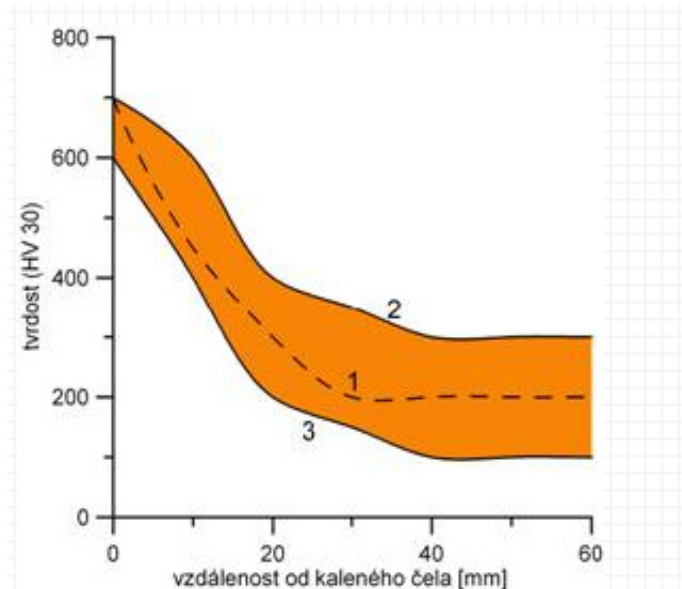
Se zušlechťováním souvisí dvě vlastnosti oceli – kalitelnost a prokalitelnost. Kalitelnost



Obr. 16 Jominyho zkouška [15]

určuje schopnost oceli provést martenzitickou transformaci. Protože však struktura oceli není tvořena pouze martenzitem, za zakalenou se považuje struktura tvořena alespoň 50% martenzitu. Kalitelnost se nejčastěji určuje měřením tvrdosti, protože každé oceli podle obsahu uhlíku odpovídá maximální dosažitelná tvrdost pro 50% martenzitu ve struktuře. Za kalitelný se považuje takový materiál, u něhož při daném způsobu kalení dosáhneme tvrdosti, která odpovídá alespoň 50% martenzitu. Samotná kalitelnost pro zušlechťování

nepostačuje. Je nutno znát také hloubku pod povrch, do které zakalení proběhlo. Tato veličina se nazývá prokalitelnost. Tato veličina se zjišťuje pomocí Jominyho zkouškou. Při tomto postupu se měří tvrdost závislosti na vzdálenosti od vodou ochlazovaného čela zkušební tyče. U ocelí se zaručenou prokalitelností musí křivka prokalitelnosti ležet uvnitř oblasti označované jako pás prokalitelnosti. Je vymezen křivkami nejvyšší nejnižší prokalitelnosti získanými z většího počtu čelních zkoušek prokalitelnosti těžé oceli. Hranice pásu prokalitelnosti lze číselně vyjádřit indexem prokalitelnosti. [2] [7] [15] [16]



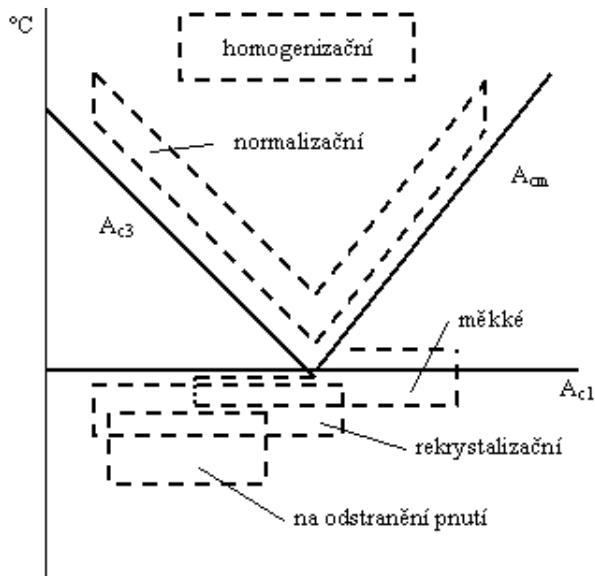
Obr. 17 Diagram prokalitelnosti: 1 – křivka prokalitelnosti, 2,3 – hranice pásu prokalitelnosti [15]

## 2.2 Žihání

Cílem žihání ocelí je zpravidla uvedení do stavu blízkého rovnováze. Proto se při žihání užívá rovnoměrného a pomalého ohřevu, dlouhé doby prohřátí a pomalého ochlazování. Tímto režimem je podporována difuze uvnitř materiálu. Žihání jde rozdělit do dvou hlavních skupin.

- a) Žihání bez překrytalizace, tj. při teplotách nižších než  $A_1$ , ke kterým patří nejčastěji způsoby žihání:
  - Ke snížení pnutí
  - Rekrystalizační
  - Naměkko (měkké)
- b) Žihání s překrytalizací, tj. při teplotách vyšších než  $A_1$ , ke kterým patří nejčastější způsoby žihání:
  - Normalizační
  - Izotermické
  - Homogenizační

Pásma teplot ohřevu pro jmenované způsoby žihání jsou zakreslena v obrázku, znázorňujícím dolní část rovnovážného diagramu. [7] [15]



Obr. 18. Jednotlivé druhy žhání v dolní část rovnovážného diagramu [7]

### Žhání ke snížení vnitřního pnutí

Cílem tohoto postupu je odstranit nebo alespoň snížit vnitřní pnutí uvnitř materiálu, které vzniklo jako důsledek předchozího zpracování (tváření, svařování, obrábění, nerovnoměrného chladnutí po odlití). Ohřevem dojde ke snížení meze kluzu materiálu natolik, že vnitřní pnutí vyvolá místní plastickou deformaci krystalů a tím jejich uvolnění. Po ohřevu na teplotu 500 až 650 °C a výdrži na této teplotě, 1 až 10 hodin. Podle velikosti a tvaru součásti následuje pomalé chlazení v peci při teplotě 250 až 300 °C a pak dochlazení na vzduchu. [7] [15]

### Rekrytalizační žhání

Cílem je obnovení tvárnosti oceli, která byla předtím tvářena za studena a ve které tím došlo k deformaci zrn a ke zpevnění. Ohřevem je urychlena difuze, při které se rozdrobená zrna spojují a dochází k obnovení tvárné struktury schopné další deformace. Teplota ohřevu je 550 až 700 °C. Výdrž na této teplotě závisí na zpracování polotovaru a technologické zařízení od desítek sekund až po 1 hodinu i více hodin a následující ochlazování, u něhož rychlost již není rozhodující. Teplota rekrytalizačního žhání se volí v závislosti na stupni předchozí deformace a na původní a požadované velikosti zrna. Obecně platí, že čím větší je stupeň předchozí deformace, tím nižší je rekrytalizační teplota. [7] [15]

### **Žihání na měkko**

Žihání na měkko používáme zejména u nástrojových ocelí a u některých konstrukčních legovaných ocelí ke zlepšení obrobitelnosti materiálu. Cementit obsažený v oceli může mít dvě formy – lamelární, čili destičkovou a lobulární, čili kuličkovou. Cementitové lamely způsobují při obrábění rychlé otupování břitu nástroje, materiál je špatně obrobitelný. Ohřevem se dosáhne sbalování lamel do globulí, které břit nástroje otupují mnohem méně. U podeutektoidních ocelí probíhá žihání při teplotách pod  $A_1$ , v rozmezích 680 až 700 °C. U ocelí nadeutektoidních se používá kolísavého ohřevu, při němž se využívá setrvačnosti materiálu. Teplota se zvyšuje nad  $A_1$ , ale před začátkem překrytalizace se materiál opět stabilizuje pod tuto teplotu. Zvyšování a snižování teploty se několikrát opakuje. Výhodou tohoto postupu je urychlení procesu. [2] [7]

### **Žihání normalizační**

První ze způsobů žihání, při nichž dochází k překrytalizaci. Záleží v ohřevu na teplotě o 30 až 50 °C vyšší než  $A_{c3}$ , popř.  $A_{cm}$ , a v dostatečně dlouhé výdrži na této teplotě, aby se dosáhl homogenní austenit. Pak následuje ochlazování na klidném vzduchu. Výsledkem je poměrně jemnozrnná struktura s vyšší pevností. U tenkých součástí někdy může vzniknout ve struktuře i bainit, popř. martenzit. Normalizačním žiháním odstraníme nerovnoměrnosti struktury vzniklé předchozím tvářením při teplotách pod  $A_{c3}$  (např. při doválcování nebo dokování za teplot mezi  $A_{c3}$  a  $A_{c1}$ ) nebo za studena, anebo litím (u odlitků). Normalizační žihání se používá velmi často a téměř vždy se s ním setkáme u výkovků a odlitků. [2] [7]

### **Izotermické žihání**

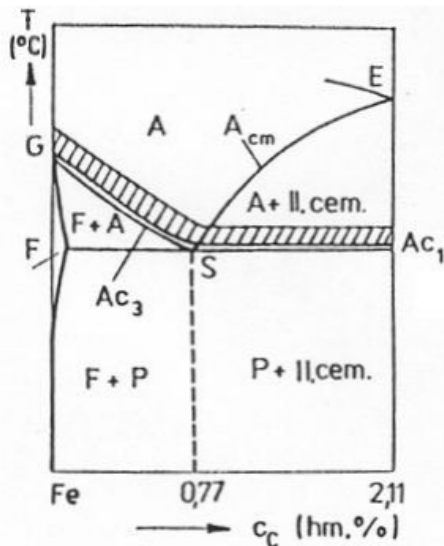
Izotermické žihání zpravidla slouží k podobným účelům jako žihání normalizační. Jeho výhodou je kratší doba procesu, jehož průběh je ale poněkud složitější. Teplota ohřevu je na dolní úrovni pásma ohřevu žihání normalizačního. Po prohřátí se materiál ochladí proudem vzduchu na teplotu odpovídající asi polovině perlitické oblasti v diagramu IRA a na této teplotě se po dobu překrytalizace udržuje. Překrytalizace proběhne izotermicky. Potom se materiál ochladí. [7]

### **Homogenizační žihání**

Tento způsob se používá zejména u velkých odlitků ze slitinových ocelí, v jejichž struktuře došlo během tuhnutí k významné segregaci uhlíku a přísadových prvků. Cílem žihání je

dosažení homogenní struktury. Teploty ohřevu jsou 1000 až 1250 °C. Při tak vysoké teplotě velmi zhrubne zrno oceli a proto je zpravidla nutno po homogenizačním žhání zařadit ještě žhání normalizační. [7]

### 2.3 Kalení



Obr. 19 Pásmo kalících teplot v diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C [16]

Účelem kalení je zvýšení tvrdosti oceli. Je to ohřev součásti na teplotu nad  $A_{c3}$ , popř.  $A_{c1}$ , výdrži na této teplotě a ochlazování kritickou rychlostí, čímž se potlačí vznik feritu a perlitu a zachovaný nestabilní austenit při teplotách pod 500 °C se přemění na bainit nebo martenzit. Z toho plyne, že kalící teplota (teplota ohřevu předmětu před kalením) musí ležet nad překrystalizačními teplotami oceli, aby struktura před kalením byla u podeutektoidních ocelí homogenním austenitem a u ocelí nadeutektoidních směsí austenitu a cementitu. Správné kalící teploty se volí 30 až 50 °C nad  $A_{c3}$  u ocelí podeutektoidní nebo na nad  $A_{c1}$  u ocelí nadeutektoidních. U ocelí nadeutektoidních nevolíme teploty kalení nad  $A_{cm}$  proto, že zbylý cementit po ohřevu jen nad  $A_{c1}$  je tvrdou složkou, a tedy přispívá k tvrdosti oceli po kalení. [2] [16]

#### Martenzitické kalení

K dosažení martenzitické struktury musí být ocel ochlazována rychlostí stejnou nebo větší než je kritická rychlost ochlazování. Ochlazovací křivky povrchu i středu minou křivky počátku difuzního rozpadu austenitu. Čím více uhlíku a slitinových prvků obsahuje ocel, tím nižší je kritická ochlazovací rychlost. Na rychlost ochlazování má vliv i výše kalící teploty a velikost austenitického zrna.

Jako kalící prostředí se volí vzduch, olej nebo voda. Nejmírnějším ochlazovacím prostředím je klidný vzduch, tím se kalí samokalitelné oceli. Olej ochlazuje intenzivněji než vzduch, intenzita kalení se může zvyšovat prouděním oleje v lázni. Nejintenzivnějším ochlazovacím prostředím je voda nebo vodní sprcha.

Martenzitické kalení může být nepřetržité nebo přerušované (lomené, termální a se zpracováním). U nepřetržitého kalení po ohřevu na kalící teplotu ihned následuje plynulé ochlazování až pod teplotu  $M_s$ , kdy začne přeměna austenitu na martenzit. Největší deformace a trhliny vznikají při kalení do vody.

Při přerušovaném lomeném kalení se ochlazuje ve dvou studených lázních po sobě. Nejprve se předmět rychle ochladí až na teplotu  $M_s$ , což zabrání přeměně, a potom se přemístí do mírnějšího ochlazovacího prostředí, kde proběhne martenzitická přeměna.

Při termálním kalení se součást ochlazuje v lázni rychlostí větší než kritickou do teploty nad  $M_s$ , poté následuje výdrž na vyrovnání teploty v celém průřezu materiálu a k potlačení pnutí. Poté následuje ochlazení většinou na vzduchu, při kterém dojde k martenzitické přeměně.

Kalení se zmrazováním s cílem snížit podíl zbytkového austenitu. Zakalený předmět se v co nejkratší době přenesse do prostředí s teplotou pod bodem mrazu. Používá se pro zajištění větší rozměrové stálosti měřidel, přesných valivých ložisek a strojů atd.

[2] [7] [15] [16]

### **Bainitické kalení**

Při bainitickém kalení se austenit transformuje na bainit buď v průběhu plynulého ochlazování nebo izotermicky, při konstantní teplotě. Při nepřetržitém bainitickém kalení vzniká směs bainitu a martenzitu, při které musí následovat popouštění, pro odstranění martenzitu. Toto kalení se neprovádí pouze u ocelí s předsunutou bainitickou oblastí v diagramu IRA. Po izotermickém bainitickém kalení je ve struktuře bainit a menší množství zbytkového austenitu. [2] [7]

## **2.4 Popouštění**

Ocel zakalená na martenzitickou strukturu má značné pnutí a kromě toho, že má velkou tvrdost, je také hodně křehká. V tomto stavu ji můžeme používat jen zcela výjimečně. Aby se snížilo vnitřní pnutí, a tím i křehkost (popř. aby se získaly i struktury s dobrou houževnatostí), je vhodné ocel po kalení popouštět. Je to ohřev na určitou hodnotu pod  $A_{c1}$ .

Martenzit vzniklý při martenzitickém kalení má tvar jehlicovitý. Nežádoucím jevem spojeným při popouštění je pokles tvrdosti materiálu. Při popouštění za nižších teplot (do 200 °C) vzniká tzv. kubický martenzit, výsledkem je mírné snížení tvrdosti a vnitřního pnutí. V rozmezí teplot 180 až 300 °C se rozkládá zbytkový austenit buď na nízkouhlíkový martenzit, nebo na dolní bainit. U ocelí s vyšším obsahem uhlíku, a tím i zbytkového austenitu, dochází k mírnému zvýšení tvrdosti. Při popouštění za teplot 300 až 400 °C dochází k úplnému rozpadu martenzitu na velmi jemnou feritickou strukturu s globulárním cementitem. Jehlicový tvar feritických zrn se zachová. Křehkost i tvrdost se snižuje, a to podstatně. Za teplot nad 400 °C až do  $A_{c1}$  se postupně cementitové kulovité částice zvětšují a mizí jehlicový charakter struktury. Výsledkem je jemná struktura s kuličkovým cementitem v základní feritické hmotě a označuje se jako sorbit.

Z hlediska popouštěcích teplot rozeznáváme:

- Popouštění za nízkých teplot asi do 350 °C, které často v praxi nazýváme napouštění. Protože je používáme převážně u nástrojových ocelí, můžeme také mluvit o popouštění nástrojů, což je pro praktické účely vhodnější rozlišení
- Popouštění za vysokých teplot od 350 do 700 °C. Tomuto popouštění ve spojení s kalením říkáme zušlechťování. [2] [7] [15]

#### 2.4.1 Zušlechťování

Cílem zušlechťování je dosažení sorbitické struktury vyznačující se vysokou pevností, houževnatostí a zvýšenou mezí kluzu. Princip zušlechťování spočívá ve spojení martenzitického kalení oceli a jejího následného popouštění na teploty vyšší než 400 °C. Provádí se jednak u hotových výrobků, jednak u hutních polotovarů. Stav po tomto tepelném zpracování označujeme první doplňkovou číslicí 6, 7 a 8 za značkou oceli, přičemž vyšší číslice znamená zpracování na vyšší pevnost z pevnostního rozsahu dané oceli. [2] [15]

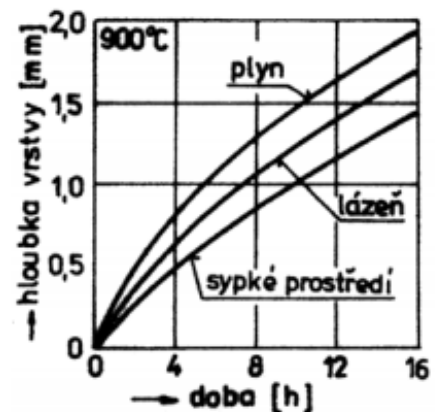
### 2.5 Chemicko-tepelné zpracování

Mezi chemicko-tepelné zpracování zařazujeme obvykle řadu způsobů, při nichž se sytí povrch oceli různými prvky, aby se dosáhlo různých požadovaných vlastností, např. žáruvzdornost, korozivzdornost, odolnost proti opotřebení atd. Jádro součástí zůstává houževnaté. Změny chemického složení povrchové vrstvy se dosahuje ohřevem v aktivním

prostředí s vysokou koncentrací příslušného prvku. Prostředí může být plynné nebo kapalně, disociací uvolňujeme ve styku se žhavým povrchem potřebný prvek v atomárním stavu. Ten je absorbován povrchem, pokud je rozpustný v daném materiálu. [6] [2]

### 2.5.1 Cementování

Cementování patří mezi nejrozšířenější způsoby chemicko-tepelného zpracování. Při tomto procesu se nasytí součásti uhlíkem tak, aby jej bylo možno po ukončení procesu zakalit na vysokou tvrdost. Protože se obsah uhlíku zvýší pouze ve slabé vrstvě a výchozí oceli mají max. 0,25% uhlíku, zůstává zachovaná vysoká houževnatost jádra. Cementování lze provádět v prostředí plynném, kapalném a pevném. Nauhličená vrstva má tloušťku 0,5 až 1,5 mm. Pro cementování jsou určeny měkké konstrukční oceli, jejíž čtvrtá číslice ve značce oceli je 1 nebo 2 u nelegovaných ocelí např. 12 010, 12 020, 12 024. U legovaných ocelí např. 14 220, 16 220 aj. [6] [7] [16]



Obr. 20 Závislost hloubky cementační vrstvy na době cementování [17]

### 2.5.2 Nitridování

Nitridování je syčení povrchu oceli dusíkem, který reaguje se železem a s jinými úmyslně přidávanými prvky (hlavně Al a Cr). Vytvářejí se tím tvrdé nitridy, které působí značně na zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy. Nitridování probíhá za teplot 500 až 600°C buď v plynném (čpavek), nebo kapalném prostředí např. solné lázni. Vzhledem k nízkým nitridačním teplotám mohou být součásti před nitridováním plně zušlechťeny a vzhledem k neoxidačnímu prostředí také obráběny na hotovo. Nitridování v plynném prostředí je proces velmi zdlouhavý. K vytvoření nitridové vrstvy o tloušťce 0,1 mm potřebujeme 10 až 12 hodin. V lázni je rychlejší, avšak vytvořené vrstvy jsou velmi tenké (do 0,05mm). Tyto tenké vrstvy jsou vhodné pro nástroje. [6] [7] [17]

### 2.5.3 Nitrocementování

Nitrocementuje se buď v kyanidových solných lázních při teplotách od 750 do 850 °C, nebo v plynné cementační atmosféře s přísadou čpavku při teplotách od 800 po 880 °C.



Dojde k nasycení povrchu dusíkem a uhlíkem současně tak, že čím je vyšší teplota, tím více převládá nasycení uhlíkem a naopak. Po nitrocementaci se součásti kalí v oleji, z důvodu snížení pnutí. Po kalení se součásti popouštějí stejně jako po cementaci na teplotu 180 °C. [2] [6]

#### **2.5.4 Karbonitridování**

Při karbonitridování dochází k současnému nasycování dusíkem a uhlíkem za teploty 570 až 620 °C. Na povrchu součásti se tvoří vrstva karbidu o tloušťce 0,01 až 0,05 mm, která obsahuje více než 8 % N a více než 2% C a určitý podíl kyslíku (cca 1%) Tvrdost karbonitridové vrstvy se pohybuje okolo 1000 HV. Do hloubky 1 mm zasahuje difúzně zpevněná vrstva s rozpuštěným dusíkem o tvrdosti 300 až 400 HV, která podporuje nosnost vrstvy karbonitridů. Karbonitridování se provádí v solných lázních, které je obdobné jako u nitrocementování v solích. Základní rozdíl je v teplotě procesu a tím ve vzájemném poměru difuze C a N. Karbonitridování lze provádět také ve směsných atmosférách. Nositelem dusíku je amoniak, který na povrchu disociuje. Nositelem je oxid uhelnatý, který se získává z různých atmosfér. [2]

### 3 MATERIÁLY FOREM

Formy se vyrábějí hlavně z konstrukčních ocelí třídy 11 (upínací desky, kotevní desky, rozpěrné desky atd.) a z ocelí třídy 14 a 12. Nástrojová ocel je určena pro součásti s vysokým namáháním (tvárníky, tvárnice, horké trysky, vyhřívané vtokové systémy, atd.).

#### 3.1 Nástrojová ocel

K výrobě nástrojů se používá jakostních uhlíkových, slitinových a rychlořezných ocelí, k výrobě přípravků pak běžných i jakostních ocelí. Ve zvláštních případech je nutné použít i neželezných kovů nebo plastických hmot. Nástrojové oceli musí vyhovovat všem požadavkům různých druhů nástrojů, např. pro obrábění, tváření za tepla, měřidlům, formám na vstřikování atd. Tyto požadavky musí odpovídat vhodnému druhu oceli s možností potřebného tepelného zpracování, neboť většinou se všechny nástroje tepelně zpracovávají. Nástrojové oceli musí vyhovovat těmto základním požadavkům:

##### **Tvrdość a pevnost**

Závisí na obsahu uhlíku a způsobu tepelného zpracování. Tvrdość zakalené uhlíkové oceli stoupá až do 0,8% C, kdy dosahuje největší hodnoty asi 67 HRC. Dalším zvyšováním obsahu uhlíku se zvětšuje odolnost proti opotřebení. Vysoká tvrdość se využije převážně u nástrojů pro obrábění, kdežto nástroje pro tváření jsou obvykle vystaveny účinkům mechanických rázů a vyžadují nižší tvrdość.

##### **Houževnatost**

Vyžaduje většinou nástroje pro tváření, namáhané často kombinovanými silami v tahu, tlaku, ohybu, krůtu a dynamickými rázy. Volí se proto i menší tvrdość na úkor potřebné houževnatosti. Houževnatá ocel má jemnozrnnou strukturu získanou správným postupem tepelného zpracování a musí být prosta vnitřních nečistot, trhlinek a vnitřního pnutí.

##### **Odolnost proti popouštění**

Závisí na chemickém složení nástrojových ocelí. Uhlíkové oceli a většina nízkolegovaných ocelí si podržuje maximální tvrdość jen do 200 až 300 °C. Oceli slitinové (pro práci za tepla) a rychlořezné oceli mohou být používány od 500 až do 600 °C, aniž dojde k výraznému snížení tvrdości, získané tepelným zpracováním.

### **Prokalitelnost**

Závisí na chemickém složení oceli a na velikosti nástroje. Dobrá prokalitelnost je nutná u nástrojů které kromě povrchu musí být tepelně zpracovány i do hloubky průřezů, např. u zápustek, forem pro tlakové lití atd. U uhlíkových ocelí je prokalitelnost malá a zvyšuje se přidávkem manganu, niklu, chromu, atd.

### **Stálost rozměru**

Závisí na druhu oceli a vhodném postupu tepelného zpracování. Stálost rozměrů se vyžaduje nejen při tepelném zpracování oceli, ale i po tepelném zpracování během provozu. Vysokou stálost rozměrů vyžadujeme zejména u měřidel a přesné zápustky, pro které jsou také vytvářeny speciální oceli.

### **Další požadavky**

Jsou jednak speciální podle druhu použití nástrojů, jednak všeobecné, společně všem výrobkům nástrojárny. Speciální požadavky na vlastnosti nástrojových ocelí jsou např. odolnost proti trhlinkám, korozi roztavenými kovy, malá tepelná roztažnost, možnost chemicko-tepelných úprav atd. K všeobecným požadavkům patří především nízká cena, dobrá obrobitelnost, odolnost proti přehřátí atd. [2] [19]

## **3.2 Konstrukční oceli**

Jsou uhlíkové (nelegované) konstrukční oceli se zaručenou čistotou, zaručeným obsahem fosforu a síry, zaručenou minimální pevností v tahu, mezí kluzu a tažností. Pro méně namáhané strojní součásti, jako např. čepy, hřídele, menší ozubená kola aj., jsou vhodné oceli s pevností řady 37 (370 MPa), např. 11 373 nebo řady 42 (420 MPa), např. 11 423, dají se svařovat a jsou vhodné pro svařované konstrukce. Oceli 11 378, 11 483, 11 523 a 11 583 jsou značeny jako oceli jemnozrnné. Mají zvýšenou mez kluzu. Nejběžnější oceli pro strojní součásti, jež lze zušlechťovat je 11 500 (0,3 % C) min. Pevnost v normalizačně žíhaném stavu je 500 MPa. Zušlechťuje se nejvýše na pevnost okolo 700 MPa. Použití: svorníky, ozubená kola, hřídele. Pro náročnější a více namáhané strojní součásti jsou vhodné oceli vyšších pevností, např. 11 600, 11 700 a 11 800. Zvláštní oceli jsou tzv. automatové (11 109, 11 110, 11 120, 11 121, 11 140) které obsahují až 0,2 % S. Síra je vázáná zvýšeným obsahem manganu (kolem 1%) na MnS. Tyto oceli dosahují dobré obrobitelnosti s kvalitním povrchem při velké řezné rychlosti a snadné lámavosti třísky. Dodávají se v tyčích tažených za studena. [2] [18]

## 4 POVLAKOVÁNÍ

Povlakování nám zvýší živostnost. Zvýšení živostnosti má spíše vedlejší účinky:

- Vhodnější nasazení do výrobního procesu
- Menší frekvence výměny nástroje
- Menší prostoje strojů
- Přesnější obrábění v dlouhých cyklech
- Menší skladové zásoby

Povlakování nám také zvyšuje řeznou rychlost a ostatní řezné parametry:

- Produktivita
- Kvalita povrchu

Povlakování je i výhodné z hlediska ekonomického. Pouhé 4 % z celkové ceny nástroje.

Mezi hlavní typy povlakování patří metody PVD, CVD a PACVD. [25]

### 4.1 Metoda PVD (Physical Vapour Deposition)

Metody PVD byly vyvinuty především pro účely povlakování ocelových nástrojů za nízkých teplot (80-550°C) nejpoužívanější typy vrstev jsou TiN, TiCN, CrN, ZrN a v současné době nejúspěšnější vrstvy na bázi TiAlN. Metody PVD na bázi (Ti, Al) N mají v poslední době dominantní postavení na trhu s řeznými nástroji určenými pro vysoce výkonné obrábění. PVD technologie umožňuje pouze přípravu tloušťek do 7 – 8 μm.

Přínos PVD vrstvy:

- Tvrdost – vysoká abrazivnost
- Koeficient frikce – kluzné vlastnosti snižování tření – řezných odporů, anti-nárůstový efekt
- Chemická stabilita i při zvýšené teplotě – produktivní aplikace, suché obrábění
- Adheze

[24] [25] [26]

## 4.2 Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition)

Metoda CVD je nejpoužívanější pro přípravu vrstev za vysokých teplot nad 900 °C (900-1100 °C) na nástroje ze slinutých karbidů a zahrnuje povlaky obvykle na bázi TiN, TiCN a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a diamantu. CVD technologie umožňuje přípravu vrstev od 2 do 15 μm. Tenká vrstva se na povrch substrátu vytváří v důsledku chemických procesů probíhajících v objemu plazmatu a přímo na rozhraní mezi plazmatem a povrchem substrátu. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi, které se za vysokých teplot rozkládají. Metodou CVD je možné vytvářet jednovrstvé i multivrstvé povlaky. Multivrstvé povlaky jsou takové, ve kterých se střídají minimálně dva druhy vrstev. Přechody mezi jednotlivými vrstvami zvyšují odolnost proti šíření poruch, což vede ke zvýšení tvrdosti a houževnatosti. [25]

## 4.3 Metoda PACVD (Plasma Asisted Chemical Vapour Deposition)

Metoda PACVD je povlakování nástrojů při mnohem nižších teplotách, než u konvenčních CVD technik. Plazmou aktivovaný CVD proces umožňuje snížit teplotu potřebnou pro vznik vrstvy na povrchu substrátu na 470-530 °C. Proces se aplikuje u nástrojů až po konečném zušlechťení na požadovanou tvrdost a v průběhu povlakování nedochází k rozměrovým změnám. Mezi výhody patří možnost povlakovat i dutiny. PACVD povlaky se vyznačují extrémně nízkým koeficientem tření – až 0,1.

Mezi další výhody PACVD povlaků patří:

- Umožňuje provádět nitridaci a povlakování v jednom procesu
- Nepotřebuje vysoké vakuum, takže odplynění použitého zařízení je snazší a kratší
- Zařízení nepotřebují rotační části. Povlakované dutiny nerotují. V důsledku nucené cirkulace plynu v povlakovací komoře se vylučuje homogenní povlak i na velmi složitých nástrojích s dutinami.
- Umožňuje povlakování rozměrných a těžkých kusů až do hmotnosti 1 250 kg.

Technologie povlakování PACVD je vhodná například na přesné kalibrovací nástroje, tvářecí a lisovací nástroje, obráběcí nástroje a formy pro tlakové lití. [25] [27]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

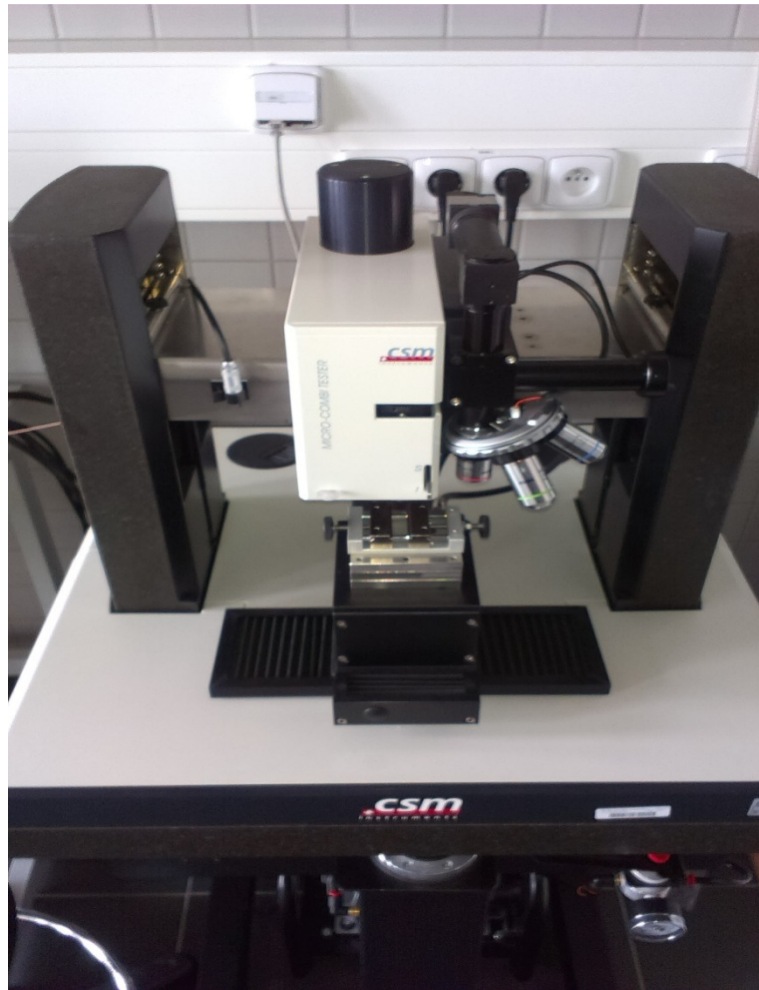
Cílem bakalářské práce bylo měření tvrdosti (nanotvrdosti) tenkých vrstev povlaků pro mechanické části forem, zejména pro tvarovou dutinu formy. Měření proběhlo na 5 vzorcích, z nichž byl 1 vzorek nepovlakovaný a vyrobený z nástrojové oceli 19 552 (1.2343). Zbylé 4 zkušební vzorky byly povlakovány, z nichž každý jiným druhem povlaku. Instrumentovaná zkouška tvrdosti (nanotvrdosti) byla provedena na nanotvrdoměru (NHT2) – Opx/Cpx od firmy CSM Instruments při aplikovaném zatížení 10mN. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

**Cíle bakalářské práce byly následující:**

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava zkušebních těles pro experimentální část.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení a grafické znázornění naměřených hodnot.

## 5.1 Typ zkoušky

Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI se měřila na nanotvrdoměru (NHT2) – Opx/Cpx od firmy CSM Instruments, na pracovišti Cebia-Tech. Jako vnikací tělísko (indentor) byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  (Vickersův indentor).



*Obr. 21. Nanotvrdoměr (NHT2) – Opx/Cpx*

## 5.2 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky byly připraveny metalografickým výbrusem. Vzorky byly nejdříve preparovány zalitím do epoxidové pryskyřice na stroji SimpliMet 1000 Mounting Press, z důvodu usnadnění manipulace při broušení a leštění. Následovalo broušení a leštění na stroji Eco Met 250 Pro Grinder-Polisher.



**Zkušební vzorky:**

**PVD1** – Používá se u řezných nástrojů pro vysoké řezné rychlosti. Frézování, vrtání litiny a ocelolitiny. Vstřikování plastů. HSS nástroje pro vysoké tepelné zatížení, opracování za sucha. Formy pro lisování plechů. Vyznačuje se fialovou barvou. Maximální pracovní teplota je 800 °C, koeficient tření je 0,4. Tloušťka povlaků bývá 1-8µm. Povlakování se provádí metodou PVD. [28]

**PVD2** – Povlak typu PVD2 se nejčastěji používá u forem pro tváření za studena, jako je například lisování. Dále se používá v potravinářském průmyslu, u forem a trysek pro vstřikování plastů (zejména s obsahem Cl, F atd.). Barva povlaku je stříbrošedá, pracovní teplota PVD2 povlaku je 700 °C, koeficient tření je 0,4. Tloušťka povlaku bývá 1-10 µm. Povlakování se provádí technologií PVD. [28]

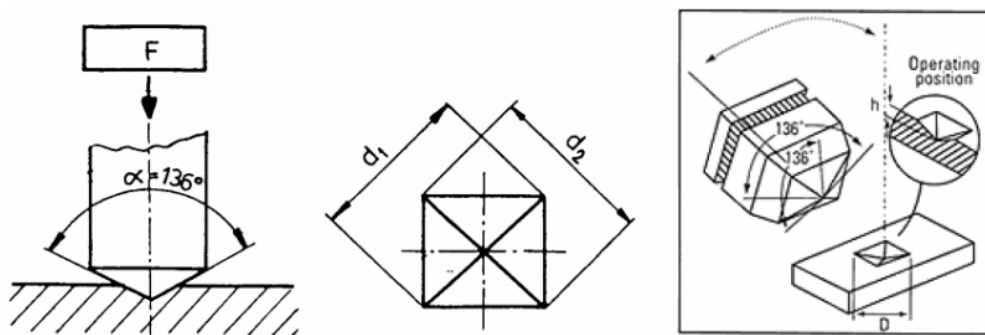
**PVD3** – PVD3 je základní povlak pro řezné nástroje, děrování a tvarování za studena. Zpracování materiálu s nízkou tvrdostí. Povlak má zlatou barvu a pracovní teplotu 600 °C. Koeficient tření je 0,4. Povlakuje se tloušťkou 1-6 µm a využívá se technologie PVD. [28]

**PVD4** – Povlak typu PVD4 se využívá u Al forem na lisování gumy a v potravinářském průmyslu. Povlak má velice dobré kluzné charakteristiky při vysoké abrazivní odolnosti. To má za následek výhodu nižší spotřeby maziv. Zamezení nalepování zpracovávaného materiálu. Povlak má černou barvu a pracovní teplotu 350 °C a koeficient tření 0,05-0,15, tloušťka povlaku je 1-3 µm. Technologie povlakování PVD/PACVD. [28]

**Základní materiál 1.2343** – Legovaná ocel s vysokou prokalitelností a houževnatostí. Vyznačuje se velmi dobrými pevnostními vlastnostmi za tepla. Má dobrou tepelnou vodivost, odolnost k tvorbě trhlin za tepla a malou citlivost na prudké změny teploty (chlazení vodou). Je dobře lešitelná. Je vhodná k nitridaci. Má obzvláště dobrou kalitelnost na vzduchu a ve vakuu. Ocel 1.2343 se používá na nástroje pro lisování za tepla a formy pro tlakové lití. Zejména se využívá na nástroje pro zpracování lehkých kovů. [23]

### 5.3 Postup měření

Zkušební vzorek po úpravách se položí na tvrdou podložku. Na stroji se nastaví požadované parametry, které chceme naměřit. Měření probíhalo metodou Vickerse. Základním principem zkoušky podle Vickerse je vtlačování zkušebního tělesa pod zkušebním zatížením  $F$  po stanovenou dobu. Po odlehčení se změří úhlopříčky ( $u_1$  a  $u_2$ ). Vnikacím tělesem je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu  $136^\circ$ . [2]



Obr. 22. Schéma měření podle Vickerse [11]

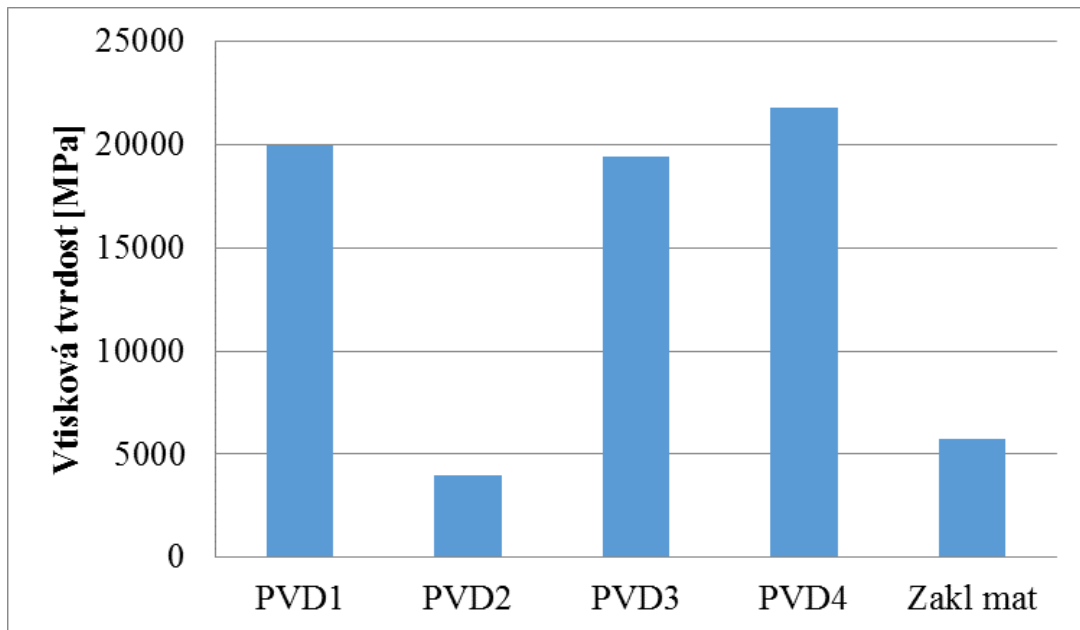
## 6 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Měření probíhalo při zatížení  $F_{\max}=10\text{mN}$ . Doba výdrže byla 10s.

### Vyhodnocované veličiny:

1. HIT- Vtisková tvrdost [MPa]
2. HIT%- Vtisková tvrdost v %
3. EIT- Vtiskový modul pružnosti [GPa]
4. EIT%-Vtiskový modul pružnosti v %
5. CIT- Creep [%]
6. HVIT- Tvrdost dle Vickerse [HVC]
7. Welast- Elastická deformační práce [pJ]
8. Wplast- Plastická deformační práce [pJ]
9. Wtotal- Celková deformační práce [pJ]
10.  $\eta_{IT}$ - Koeficient zpětné deformace [%]

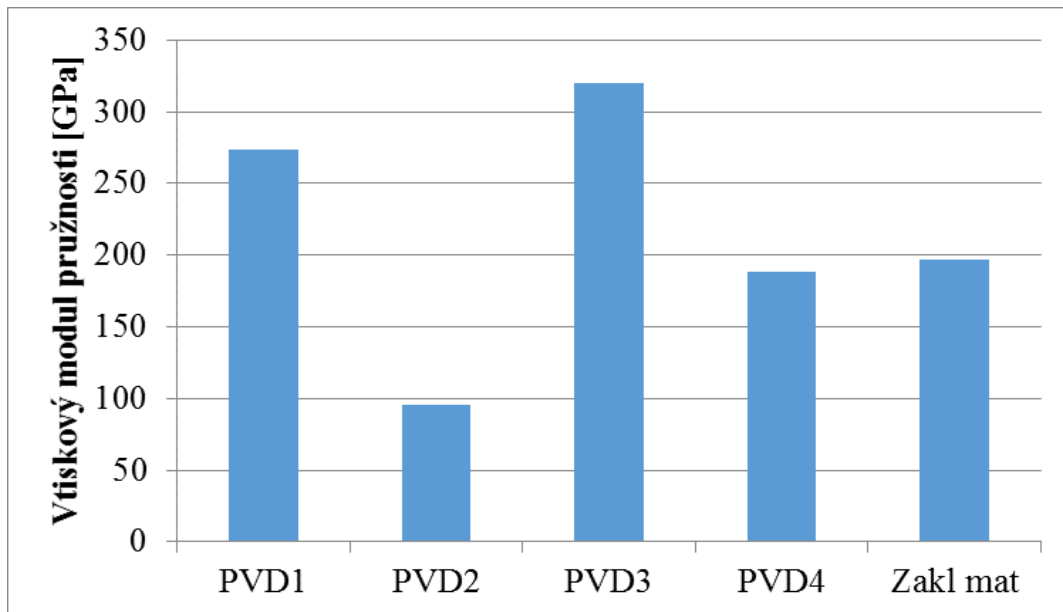
## 6.1 Vyhodnocení vtiskové tvrdosti



Obr. 23. Porovnání vtiskové tvrdosti mezi jednotlivými vzorky.

Z naměřených hodnot vyplynulo, že největší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u povlaku PVD4 (21783MPa). Naopak nejmenší hodnotu vtiskové tvrdosti vykázal povlak PVD2 s hodnotou vtiskové tvrdosti 4003 MPa, jak je patrné z obrázku 23.

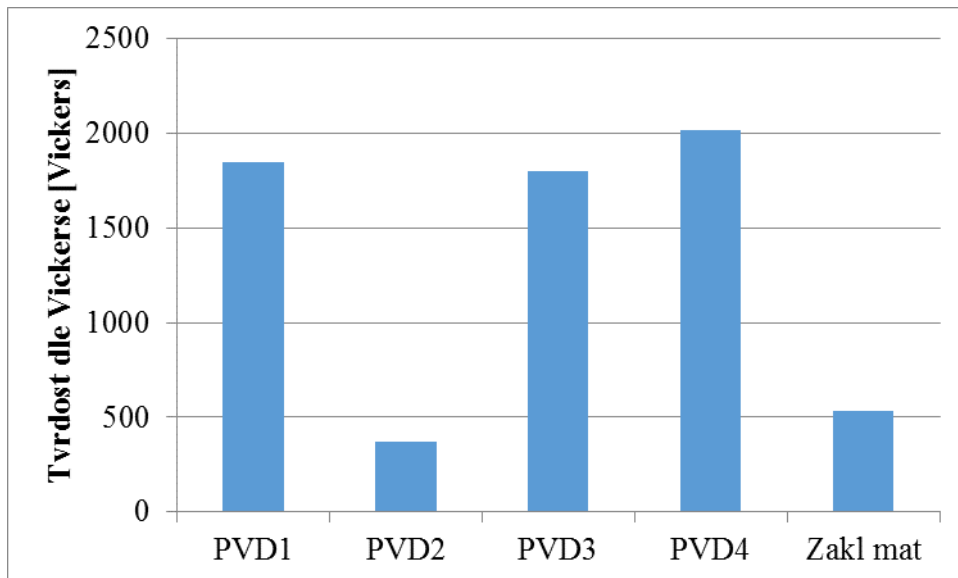
## 6.2 Vyhodnocení vtiskového modulu pružnosti



Obr. 24. Porovnání vtiskového modulu pružnosti u jednotlivých vzorků

Z naměřených hodnot vyplynulo, že nejvyšší hodnotu vtiskového modulu pružnosti byla naměřena u povlaku s označením PVD3 (320GPa). Nejnižší hodnota vtiskového modulu pružnosti byla naměřena u povlaku PVD2 (95 GPa). Jak je patrné z obrázku 24.

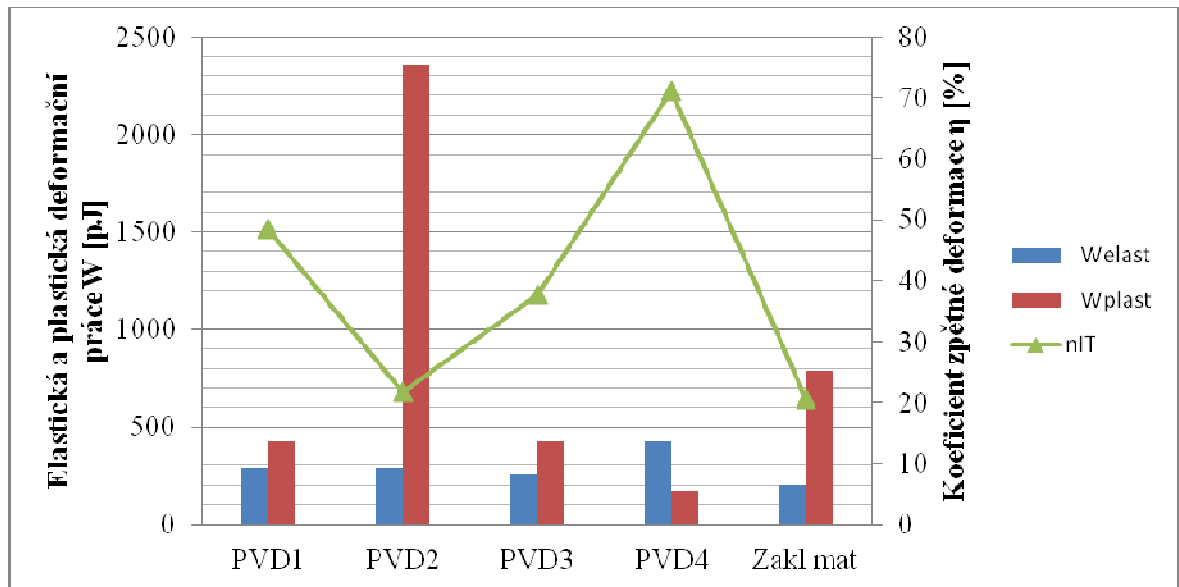
### 6.3 Vyhodnocení tvrdosti dle Vickerse



*Obr. 25. Porovnání tvrdosti podle Vickerse u jednotlivých vzorků*

Z naměřených hodnot vyplynulo, že nejvyšší hodnota tvrdosti podle Vickerse byla naměřena u povlaku PVD4 (2017 Vickerse). Nejnižší hodnota byla naměřena u vzorku PVD2 (370 Vickerse). Jak je patrné z obrázku 25.

#### 6.4 Vyhodnocení a porovnání elastické deformační práce, plastické deformační práce a koeficientu zpětné deformace.

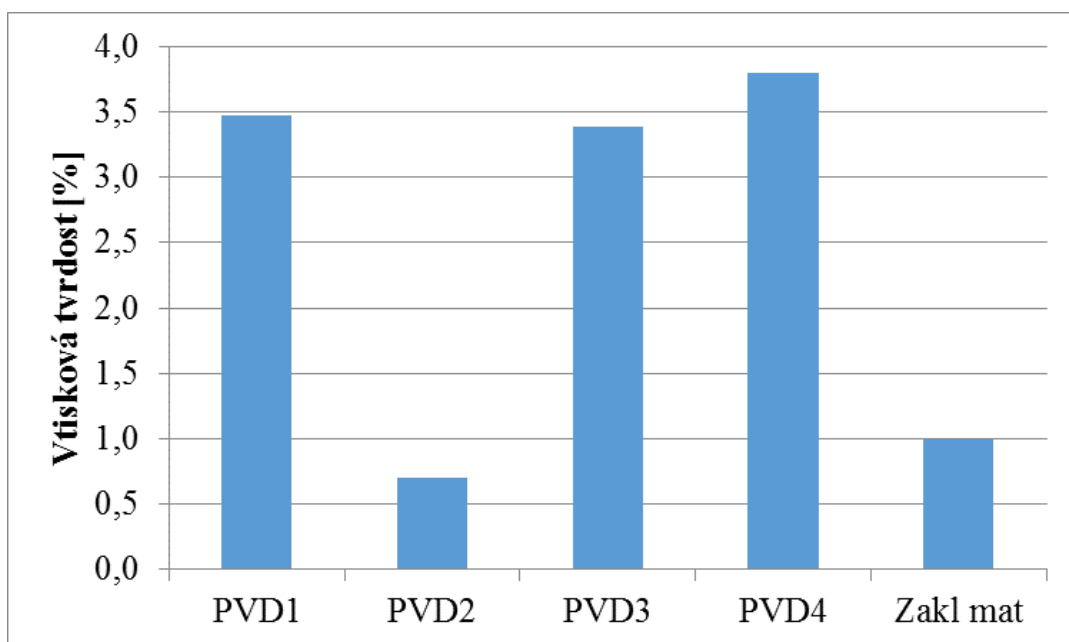


Obr. 26. Porovnání elastické, plastické deformační práce a koeficientu zpětné deformace.

Z výsledků měření deformační práce vyplynulo, že zkušební vzorek s povlakem PVD2 dosáhl nejvyšší hodnoty plastické deformační práce (2360 pJ). Nejmenší hodnoty plastické deformační práce bylo dosaženo u zkušební vzorku PVD4 (174 pJ). U elastické deformační práce výsledky již nebyly tak rozdílné. Nejvyšší hodnota elastické práce byla naměřena u zkušební vzorku PVD4 (429 pJ). Základní materiál ocel 1.2343 dosáhl nejnižší hodnoty elastické práce (203 pJ). U koeficientu zpětné deformace (elastické části deformační práce) byla naměřena nejvyšší hodnota u zkušební vzorku PVD4 (71 %) a u zkušební vzorku základního materiálu oceli 1.2343 bylo dosaženo hodnot nejnižších (21 %). Jak je patrné z obrázku 26.

## DISKUZE VÝSLEDKŮ

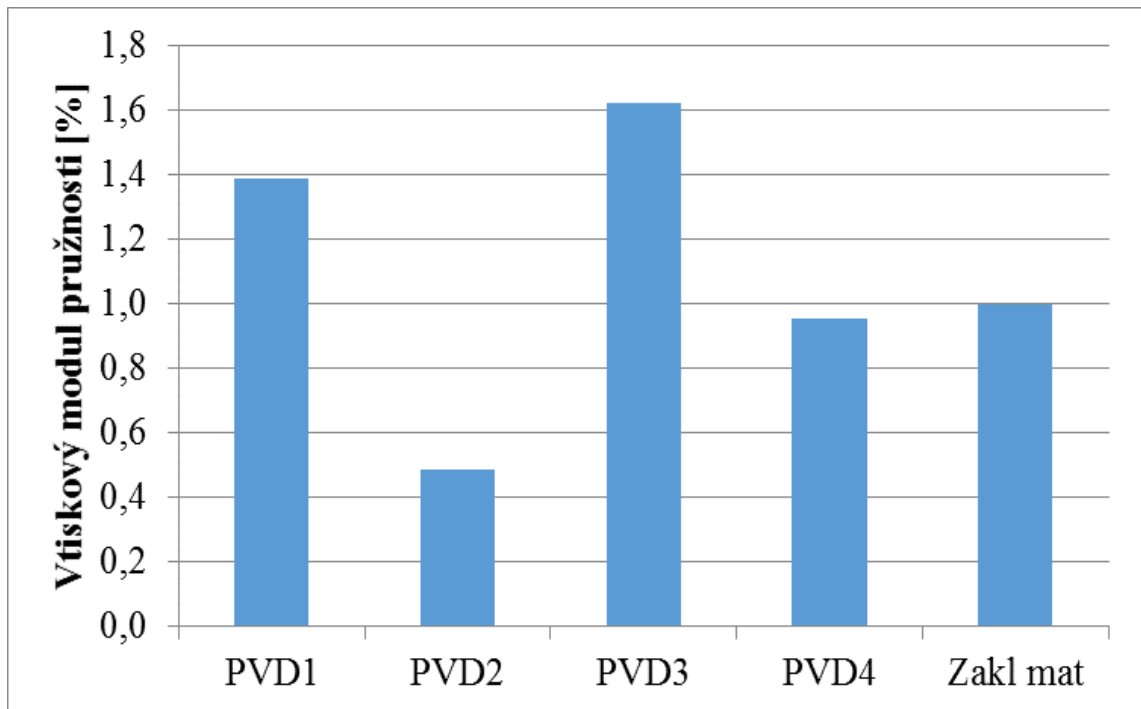
Bakalářská práce popisuje měření tvrdosti (nanotvrdosti) vybraných typů povlaků nanosených na základním materiálu oceli ČSN EN 419552 (1.2343). Vybrané typy povlaků (PVD1, PVD2, PVD3 a PVD4) byly testovány instrumentovanou zkouškou tvrdosti (nanotvrdosti) na nanotvrdoměru (NHT2) – Opx/Cpx od firmy CSM Instruments. Pro měření tvrdosti (nanotvrdosti) bylo zvoleno aplikované zatížení 10mN. Na každém testovaném zkušebním vzorku bylo provedeno vždy 10 měření. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.



Obr. 27. Porovnání vtiskové tvrdosti v procentech

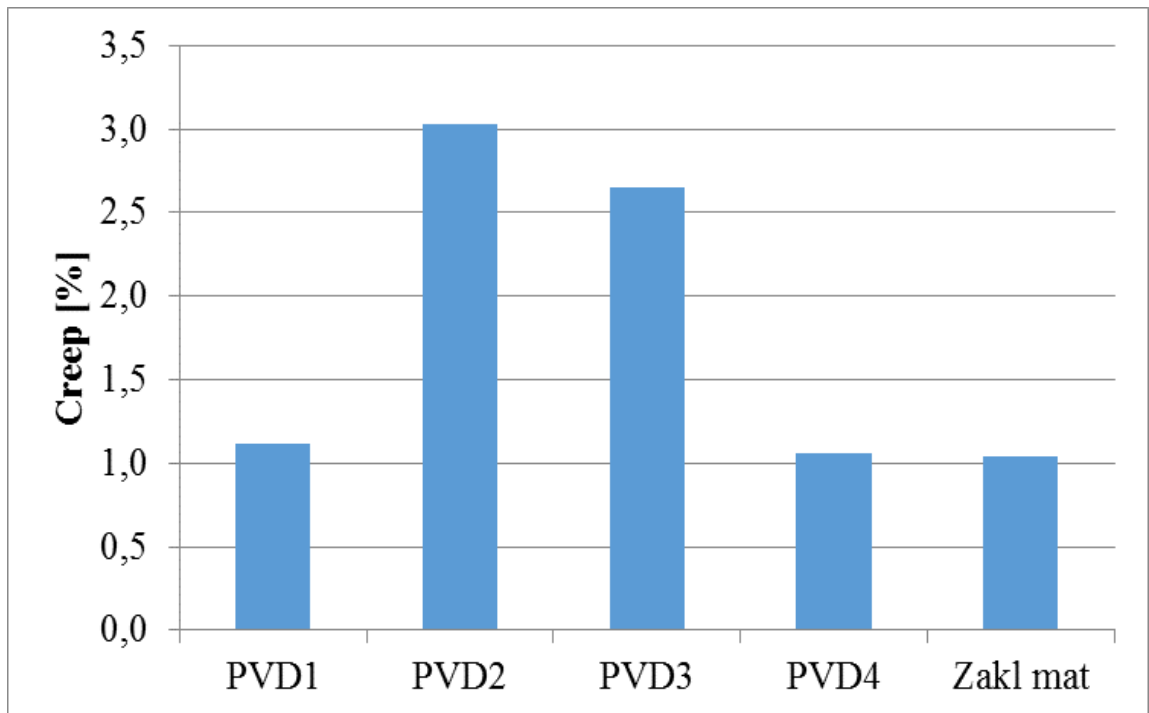
Z výsledků měření vyplynulo, že nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u povlaku PVD4, kde byl zaznamenán nárůst vtiskové tvrdosti v porovnání se základním nepovlakovaným materiálem oceli 1.2343 o 280%. Naopak nejmenší hodnotu vtiskové tvrdosti zaznamenal povlak PVD2, u kterého byl zjištěn pokles vtiskové tvrdosti v porovnání se základním nepovlakovaným materiálem oceli 1.2343 o 31%. Jak je patrné z obrázku 27.





Obr. 28. Porovnání vtiskového modulu pružnosti v procentech

Z výsledků měření vyplývá, že nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti, který reprezentuje tuhost testované povrchové vrstvy, byla naměřena u povlaku PVD3, kde byl zaznamenán nárůst vtiskového modulu pružnosti v porovnání se základním materiálem oceli 1.2343 o 60%. Naopak nejnižší hodnotu vtiskového modulu pružnosti zaznamenal povlak PVD2 u kterého byl zjištěn pokles modulu pružnosti v porovnání se základním materiálem oceli 1.2343 a to o 55%. Jak je patrné z obrázku 28.



*Obr. 29 Porovnání Creepu v procentech.*

Z výsledků měření vyplývá, že nejvyšší hodnota creepu byla naměřena u povlaku PVD2, kde byl zaznamenán nárůst creepu oproti základnímu materiálu oceli 1.2343 o 202%. Nejnižší hodnota creepu byla naměřena u povlaku PVD4, kde byl zaznamenán nárůst creepu oproti základnímu materiálu oceli 1.2343 o 2,1%. Jak je patrné z obrázku 29.

## ZÁVĚR

Bakalářská práce řeší problém měření tvrdosti (nanotvrdosti) vybraných typů povlaků nanosených na základním materiálu oceli ČSN EN 419552 (1.2343). Vybrané typy povlaků (PVD1, PVD2, PVD3 a PVD4) byly testovány instrumentovanou zkouškou tvrdosti (nanotvrdosti) na nanotvrdoměru (NHT2) – Opx/Cpx od firmy CSM Instruments. Pro měření tvrdosti (nanotvrdosti) bylo zvoleno aplikované zatížení 10mN s výdrží na tomto zatížení po dobu 10s. Na každém testovaném zkušebním vzorku bylo provedeno vždy 10 měření. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření vyplynulo, že povlakované testované zkušební tělesa nevykázaly horší mechanické vlastnosti. Vtisková tvrdost se u povlakovaných zkušebních těles zvýšila v průměru o 284 %, v porovnání se základním materiálem oceli 1.2343. Vtiskový modul pružnosti, reprezentující tuhost testované povrchové vrstvy zkušebního tělesa vykázal nárůst hodnot v průměru o 60% u povlaku PVD3, v porovnání se základním materiálem oceli 1.2343. Vtiskové tečení, reprezentující creep testované povrchové vrstvy zkušebního tělesa, ukázalo jeho nárůst u všech typů povlaků, v porovnání se základním materiálem.

Nejhorší výsledky testů tvrdosti (nanotvrdosti) vykázal povlak PVD2, u kterého byl zjištěn nejvyšší pokles hodnot vtiskové tvrdosti, tuhosti a nejvyšší nárůst hodnot vtiskového tečení (creepu).

V této práci je nutné pokračovat a provést celou škálu dalších experimentů jako je test zatékavosti apod.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Miroslav HLUCHÝ, Jan KOLOUCH. Strojírenská technologie 1. díl, 3., přeprac. Vyd. Praha: Scientia, 2002, 266 s. ISBN 80-718-3262-6
- [2] Miroslav HLUCHÝ, Oldřich MODRÁČEK, Rudolf PAŇÁK. Strojírenská technologie 1. 2. díl, 3., přeprac. Vyd. Praha, Scientia, 2002, 266 s. ISBN 80-7183-265-0
- [3] Miroslav HLUCHÝ, Oldřich MODRÁČEK, Rudolf PAŇÁK. Strojírenská technologie 4. díl, 3., přeprac. Vyd. Praha, Scientia, 2002, 266 s. ISBN 80-7183-265-0
- [4] [http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16840/svozil\\_2011\\_bp.pdf?sequence=1](http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16840/svozil_2011_bp.pdf?sequence=1)
- [5] [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/nove-materialy-k-vyrobeni-forem\\_14169.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/nove-materialy-k-vyrobeni-forem_14169.html)
- [6] [https://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/15286/tich%C3%A1\\_2011\\_bp.pdf?sequence=1](https://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/15286/tich%C3%A1_2011_bp.pdf?sequence=1)
- [7] [http://jhamernik.sweb.cz/tepelne\\_zpracovani.htm](http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm)
- [8] [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27306](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306)
- [9] [http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkousky_tvrlosti.pdf)
- [10] [http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)
- [11] [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27306](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306)
- [12] [https://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/5203/o%C5%A1%C5%A5%C3%A1da\\_2008\\_bp.pdf?sequence=1](https://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/5203/o%C5%A1%C5%A5%C3%A1da_2008_bp.pdf?sequence=1)
- [13] <http://www.sps-vitkovice.cz/Projekt2/projekt/texty/STT/Chemicko-tepeln%C3%A9%20zpracov%C3%A1n%C3%AD.pdf>
- [14] [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_tepelne\\_zprac\\_oceli/teorie2.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_oceli/teorie2.htm)
- [15] [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=66135](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66135)
- [16] [http://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha6\\_Chemtepzprac.pdf](http://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha6_Chemtepzprac.pdf)
- [17] [http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Vanova\\_ZTZ.pdf](http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Vanova_ZTZ.pdf)
- [18] <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/nastrojovematerialy/nastrojove-oceli/#>
- [19] <http://www.tumlikovo.cz/neuslechtile-uhlikovekonstrukcni-oceli-tridy-11-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/#>

- [20] Měření tvrdosti modifikovaných ocelí – Jan Komárek Bakalářská práce 2013 UTB ve Zlíně Fakulta technologická
- [21] <http://www.proinex.cz/3-mereni-kvality-materialu/stolni-tvrdomery-rockwell.html>
- [22] <http://www.proinex.cz/3-mereni-kvality-materialu/stolni-tvrdomery-brinell.html>
- [23] <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.2343>
- [24] Průmyslové centrum 4/2003 Nová průmyslová technologie povlakování
- [25] SHM PVD vrstvy 2004
- [26] SHM Tlusté vrstvy – projekt výzkumu a vývoje PROGRES
- [27] VUHZ Advanced metal technologies Coating centrum
- [28] VUHZ Nové povlakovací centrum Nové PVD + PVCAD povlakovací centrum

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

F	Zkušební zatížení [N]
D	Průměr kuličky [mm]
d	Průměr vtisku [mm]
h	Hloubka vtisku [mm]
HBW	Tvrdomost podle Brinella
F <sub>0</sub>	Předběžné zatížení [N]
F <sub>1</sub>	Přídavné zatížení
N	Číslo charakterizující stupnice
S	Jednotková stupnice
u	Úhlopříčka vtisku [mm]
HSC,HSD	Stupnice u Shoreho skleroskopu
h <sub>1</sub>	Padací výška [mm]
h <sub>2</sub>	Výška odrazu
HL	Tvrdomost Leeb
M <sub>S</sub>	Martenzit start
M <sub>f</sub>	Martenzit finiš
P <sub>S</sub>	Perlit start
P <sub>f</sub>	Perlit finiš
B <sub>S</sub>	Bainit start
B <sub>f</sub>	Bainit finiš
IRA	Izotermický rozpad austenitu
ARA	Anizotermický rozpad austenitu
Cr	Chrom
Mo	Molybden

---

V	Vanad
Mn	Mangan
Si	Křemík
Ti	Titan
Nb	Niob
HRV	Tvrдость podle Vickerse
C	Uhlík
N	Dusík
HRC	Tvrдость podle Rockwella
HIT	Vtisková tvrдость [MPa]
HIT%	Vtisková tvrдость v procentech
EIT	Vtiskový modul pružnosti [Gpa]
EIT%	Vtiskový modul pružnosti v procentech
CIT	Creep [%]
HVIT	Tvrдость podle Vickerse [HVC]
$W_{\text{elast}}$	Elastická deformační práce [pJ]
$W_{\text{plast}}$	Plastická deformační práce [pJ]
$W_{\text{total}}$	Celková deformační práce [pJ]
nIT	Koeficient zpětné deformace [pJ]
PVD1	Označení povlaku u prvního vzorku
PVD2	Označení povlaku u druhého vzorku
PVD3	Označení povlaku u třetího vzorku
PVD4	Označení povlaku u čtvrtého vzorku

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1. Zkouška tvrdosti [1].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2. Princip tvrdosti podle Brinella [11].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3. Stolní tvrdoměr Brinell série B – 3000 [22].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4. Ruční tvrdoměr Poldi [8].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr.5. Princip zkoušky podle Rockwella [20].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6. Stolní tvrdoměr Rockwell série RA - 150 [20].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 7. Schéma Shoreho skleroskopu [10].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 8. Princip měření duroskopem [8] .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 9. Tvrdoměr Equotip [21].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 10. Schéma průběhu tepelného zpracování [7].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 11. Izotermický a Anizotermický rozpad austenitu [7].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 12. Diagram IRA [16].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 13. Průběh izotermického rozpadu austenitu eutektoidní oceli při teplotě 700°C v závislosti na čase[2].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 14. Bainitická struktura eutektoidní oceli s 3,5% manganu. Zvětšení 4000krát[2]....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 15. Diagram ARA [16].....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 16. Jominyho zkouška [15].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 17. Diagram prokalitelnosti: 1-křivka prokalitelnosti, 2,3-hranice pásu prokalitelnosti [15].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 18. Rozdělení druhu žhánání v dolní část diagramu rovnovážného diagramu [7].....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 19. Pásmo kalících teplot v diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C [16].....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 20. Závislost hloubky cementační vrstvy na době cementování [17].....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 21. Nanotvrdoměr (NHT2)-Opx/Cpx.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 22. Schéma měření podle Vickerse.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 23 Porovnání vtiskové tvrdosti mezi jednotlivými vzorky.....</i>	<i>52</i>



---

<i>Obr. 24. Porovnání vtiskového modulu pružnosti u jednotlivých vzorků.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 25. Porovnání tvrdosti podle Vickerse.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 26. Porovnání elastické, plastické deformační práce a koeficientu zpětné deformace .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 27. Porovnání vtiskové tvrdosti v procentech.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 28. Porovnání vtiskového modulu pružnosti v procentech.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 29. Porovnání creepu v procentech.....</i>	<i>58</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab 1. Rozdělení zkoušky tvrdosti [20].....</i>	<i>13</i>
<i>Tab 2. Moshova stupnice tvrdosti a tvrdost materiálu používaných ve strojírenství podle Moshovy stupnice [11].....</i>	<i>14</i>
<i>Tab 3. Vztah průměrů a zatěžující síly u metod Brinell [20].....</i>	<i>18</i>
<i>Tab 4. Volba poloměru <math>0,102 F/D^2</math> pro různé materiály [20].....</i>	<i>19</i>
<i>Tab 5. Zkouška tvrdosti podle Rockwella – stupnice a rozsah použití [1].....</i>	<i>20</i>
<i>Tab 6. Zkouška tvrdosti podle Vickerse – typy a rozsah použití [1].....</i>	<i>23</i>
<i>Tab 7. Rychlost ochlazování oceli v různých kalících médiích [15].....</i>	<i>33</i>