

# Měření mikrotvrdosti struktury kovů

Tomáš Pytlík

---

Bakalářská práce  
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš PYTLÍK**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Měření mikrotvrdosti struktury kovů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava vzorků pro měření mikrotvrdosti.
3. Provedení zkoušky mikrotvrdosti.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího bakalářské práce.**

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

Datum zadání bakalářské práce: **19. února 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2010**

Ve Zlíně dne 19. ledna 2010



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



doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.  
*vedoucí katedry*

Příjmení a jméno: **Pytlík Tomáš**

Obor: **Technologická zařízení**

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně **4.6.2010**



.....

<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 nevydávalečně 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.

<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 nevydělčně 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 vzdělávacího zařízení (školní dílo).

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

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-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 se zabývá studiem mikrotvrdosti u vybraných kovových materiálů. V teoretické části je pojednáno o průběhu tvorby slitin železa, jeho chování při teplem zpracování a popisu mikrotvrdostních zkoušek. V praktické části se již věnujeme zkoumáním a popisu naměřených hodnot mikrotvrdosti.

Klíčová slova: Slitiny železa, tepelné zpracování, mikrotvrdost

## **ABSTRACT**

This bachelor work is dealt with studium of microhardness for selected metallic materials. The theoretical part shows of formation of iron alloy, its behavior on heat treatment and its test description. Practical part attends exploring and we describe the measured values of microhardness.

Keywords: Ferroalloy, heat treatment, microhardness

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Davidu Maňasovi Ph.D., za ochotu, cenné rady a pomoc, kterou mi poskytl při řešení této práce.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
<b>1 METALOGRAFIE.....</b>	<b>13</b>
1.1 HISTORIE .....	13
1.2 ROZDĚLENÍ DLE POZOROVÁNÍ .....	13
1.2.1 Makroskopické pozorování .....	13
1.2.2 Mikroskopické pozorování.....	14
1.2.3 Metody hodnocení struktury.....	14
1.2.3.1 Světelná mikroskopie (LOM) .....	14
1.2.3.2 Elektronová mikroskopie .....	15
1.2.3.3 Mikroskopie rastrující sondy .....	17
1.3 PŘÍPRAVA VZORKU .....	17
1.3.1 Odběr vzorku.....	18
1.3.2 Prepretace .....	18
1.3.3 Broušení .....	18
1.3.4 Leštění .....	19
1.3.5 Leptání.....	19
1.3.6 Pozorování a hodnocení .....	20
1.4 ŽELEZNÉ SLITINY .....	20
1.4.1 Vlastnosti čistého železa .....	20
1.4.2 Modifikace .....	21
1.4.3 Uhlík ve slitinách železa .....	21
1.4.3.1 Rovnovážné soustavy.....	21
1.4.3.2 Rovnovážné strukturní součásti .....	22
1.4.3.3 Nerovnovážné strukturní součásti.....	24
1.4.3.4 Rovnovážný digram Fe-C .....	25
1.4.3.5 Soustava metastabilní Fe <sub>3</sub> C .....	25
1.4.3.6 Rovnovážný stabilní diagram Fe-C.....	27
<b>2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN KOVU.....</b>	<b>29</b>
2.1 AUSTENITIZACE.....	29
2.2 IZOTERMICKÝ ROZPAD AUSTENITU IRA.....	31
2.2.1 Perlitická přeměna.....	32
2.2.2 Baitická přeměna.....	32
2.2.3 Martenzitická přeměna .....	32
2.3 ANIZOTROPICKÝ ROZPAD AUSTENITU ARA.....	33
2.4 ŽÍHÁNÍ.....	33
2.4.1 Žíhání bez překrytalizace.....	34
2.4.1 Žíhání s překrytalizací .....	35
2.5 KALENÍ.....	36
2.5.1 Martenzitické kalení.....	37
2.5.2 Baitické kalení.....	38



2.6	POPOUŠTĚNÍ .....	39
2.6.1	Popouštění při nízkých teplotách .....	40
2.6.2	Popouštění při vyšších teplotách .....	40
<b>3</b>	<b>ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI.....</b>	<b>41</b>
3.1	MIKROTVRDOST .....	41
3.2	NANOTVRDOST.....	42
3.3	VICKERSOVA METODA.....	43
3.3.1	Označení tvrdosti .....	44
3.3.2	Průběh zkoušky .....	44
3.4	METODA KNOOP .....	45
3.4.1	Označení tvrdosti .....	46
3.4.1	Průběh zkoušky .....	46
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>48</b>
<b>4</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>49</b>
4.1	CÍL PRÁCE .....	49
4.2	METODIKA PRÁCE .....	49
4.2.1	Navržené zkušební tělesa .....	49
4.2.2	Zkušební zařízení pro měření mikrotvrdomi .....	50
4.3	TEPELNÉ A CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ZKUŠENÍCH TĚLES .....	51
4.3.1	Cementování .....	51
4.3.2	Nitridování .....	52
4.3.3	Karbonitridace.....	52
4.3.4	Povrchové kalení.....	52
4.3.5	Zušlechtění .....	52
4.4	POSTUP PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH TĚLES A PROVEDENÍ ZKOUŠKY.....	53
<b>5</b>	<b>MIKROTVRDOST ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....</b>	<b>56</b>
5.1	OCEL 11 353 CEMENTOVÁNA .....	56
5.2	OCEL 12 060 ZÁKLADNÍ MATERIÁL (NEZPRACOVÁNA) .....	57
5.3	OCEL 12 060 ZUŠLECHTĚNA .....	59
5.4	OCEL 12 060 KALENA.....	60
5.5	OCEL 14 220 ZÁKLADNÍ MATERIÁL (NEZPRACOVÁNA) .....	61
5.6	OCEL 14 220 CEMENTOVÁNA .....	62
5.7	OCEL 14 220 NITRIDOVANÁ.....	63
5.8	OCEL 14 220 KALENA.....	64
5.9	OCEL 14 220 ZUŠLECHTĚNA .....	65
<b>6</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>66</b>
6.1.1	Porovnání mikrotvrdomi u oceli 12 060.....	66
6.1.2	Porovnání mikrotvrdomi u oceli 14 220.....	67
6.1.3	Vyhodnocení tepelně zpracovaných oceli 12 060 a 14 220 .....	68

6.1.4	Vyhodnocení Chemicko-tepelně zpracovaných ocelí 11 353 a 14 220.....	68
6.1.5	Vyhodnocení všech zadaných vzorků materiálů .....	69
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>70</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>		<b>71</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>		<b>72</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>74</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>76</b>

## ÚVOD

Kovy a slitiny kovů zaujímají již od konce 18. století první místo mezi všemi lidstvem používanými materiály. Pro konkrétnější případ slitin železa, které je tato bakalářská práce věnovaná, jen v roce 2008 bylo vyprodukováno 1329 miliónu tun oceli. Pro stejný druh železné slitiny existuje přes 2000 druhů ocelových materiálů s přesně definovaným složením. K tomu abychom mohli z tak širokého spektra materiálu zvolit správný, musíme vycházet z nutnosti znát jeho základní parametry a vlastnosti.

Jednou z nejdůležitějších základních vlastností materiálu je chemické složení a znalost jeho vnitřní stavby. Obě tyto vlastnosti nám dávají základní definici toho, jak se daný materiál bude chovat v různých stresových prostředích a to za použití různých zatěžujících sil a jiným vlivů, kterým bude vystaven.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 METALOGRAFIE

Metalografie je vědní disciplína, která se zabývá analýzou a studiem struktury kovových materiálů. Její podstatou je vyhodnocení struktury odebraného vzorku v místě, které je charakteristické pro celek zkoumaného materiálu. Vezmeme-li její užití v praxi, pak se metalografie dá definovat jako souhrn fází v přímé vazbě na jejich technologické vlastnosti a možnosti použití.

### 1.1 Historie

Historie metalografie se začala psát roku 1864, kdy anglický vědec dr. C. Sorby představil světu první fotografii struktury leptaného výbrusu slitiny železa. Přesněji řečeno jednalo se o metalografický výbrus meteoritu, tedy téměř čistého železa. Ten týž vědec roku 1885 na shromáždění Iron and Steel Institute v Londýně, poukázal na důležitost mikroskopických studií materiálů. Další zajímavé závěry pak učinil německý vědec Adolf Martens v publikaci o mikroskopickém pozorování železa. Další zajímavé formulace a myšlenky v pozorování struktury patří dr. Weddingovi, jenž od počátku upřednostňoval používání mikrofotografie na místo kreslených obrázků.

Za přelomové datum se následně dá považovat setkání inženýrského kongresu roku 1893 v Chicagu, kde byla F. Osmondem představena práce pod názvem „Mikroskopická metalografie“. Tato konference byla velice významná tím, že se zde poprvé objevily pojmy jako ferit, cementit nebo perlit. O rozvoj metalografie se také zasloužili i další významní vědci té doby, jako Henry Louis Le Chatelier, profesor Austen či baron Juptner.

### 1.2 Rozdělení dle pozorování

#### 1.2.1 Makroskopické pozorování

Pro toto měření se odborně uvádí, že hodnota zkoumaného materiálu nepřesáhne zvětšení 20x. Používá se zde stereomikroskop, lupa nebo jen prosté zkoumání připraveného vzorku materiálu okem. Tento druh pozorování se používá přímo na povrchu nebo na řezu zkoušené součásti a to jak neleptaných tak na leptaných plochách. U leptaných ploch, lze pozorovat chemické a strukturní nestejnorodosti, hrubé primární zrno, tloušťku a homogenitu povrchu. Na proti tomu u neleptaných ploch, je možné pozorovat vady většího rozsahu

jako jsou vměstky, praskliny nebo různé dutiny. Pro charakteristiku makrostruktury patří i údaje jako studie strukturních útvaru při tuhnutí a krystalizaci nebo tváření či jiných způsobů spojování materiálu [1].

### 1.2.2 Mikroskopické pozorování

Mikroskopická měření, se zásadně pro velikost zvětšení užívá, pouze na vysoce upravené ploše, jedinou výjimku představuje tzv. faktografické studie lomových ploch. Možnost zvětšení může přesahovat i úroveň krystalického zrna. Zahrnuje pojednání o fázových složení určené za pomoci difrakční metody, různých druhů mikrostrukturních útvarů dále údaje o jejich množství, velikost a složení nebo informace o poruchách krystalické mřížky [2].

### 1.2.3 Metody hodnocení struktury

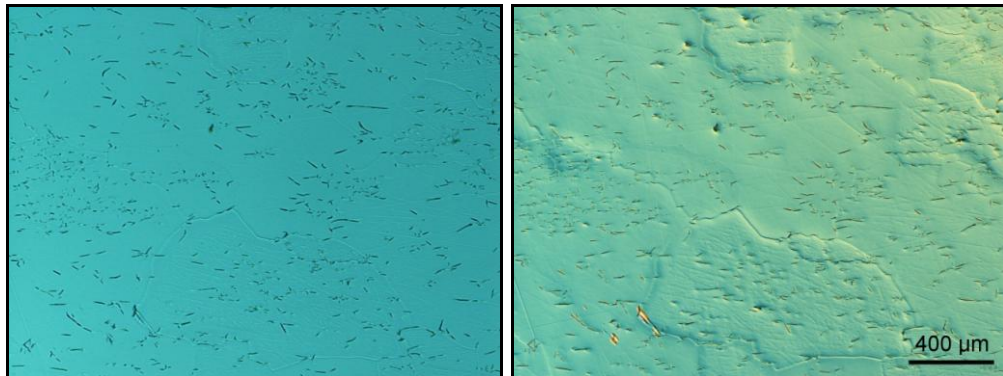
#### 1.2.3.1 Světelná mikroskopie (LOM)

Jedná se o základní metodu pozorování struktury kovů a to v rozměrech  $10^{-3}$  až  $10^{-6}$  m a při zvětšení 10 až 1000x. Jako zařízení je zde použito světelného mikroskopu tzv. metalografického mikroskopu. Tento mikroskop je založen na principech světelné optiky a platí v něm její zákony.

Světlo je vyzařováno zdrojem a dopadá na planparalelní sklo, kde se odráží. Následně prochází přes objektiv a dopadá na pozorovaný povrch. Dle způsobu osvětlení vzorku známe tři druhy zobrazení. Jednou z nich je pozorování ve světlém poli, které využívá kolmého osvětlení vzorku. Dalším druhem je pomocí šikmého osvětlení, které získáme vychýlením aparatury z optické osy mikroskopu. Pozorovaný vzorek má pak vyšší kontrast na nerovnostech. Posledním způsobem je pozorování v tmavém poli, které získáme šikmým osvětlením a zpětným odrazem mimo objektiv. Výsledný obraz je pak více plastický a má daleko lepší rozlišovací schopnost.

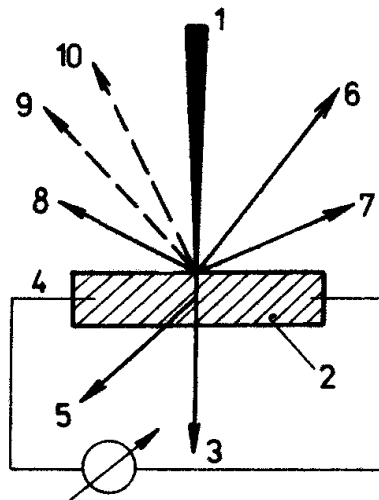
Chceme-li docílit u jedné z těchto metod zlepšení kontrastu, můžeme využít polarizovaného světla. Získáme jej pomocí dvojlomných látek, které nám paprsek rozdělí na dva kmitavé a navzájem kolmé. Nabízí se také metoda fázového kontrastu, tuto metodu uplatňuje v případě, že pro vyvolání povrchu nelze použít chemické látky. Posledním způsobem

je využití povlaků, kde dochází k interferenci mezi jednotlivými rozhraními. Jedná se o barevnou metalografii [6,7].



Obr. 1.: Zvýšení kontrastu u hranice zrn

### 1.2.3.2 Elektronová mikroskopie



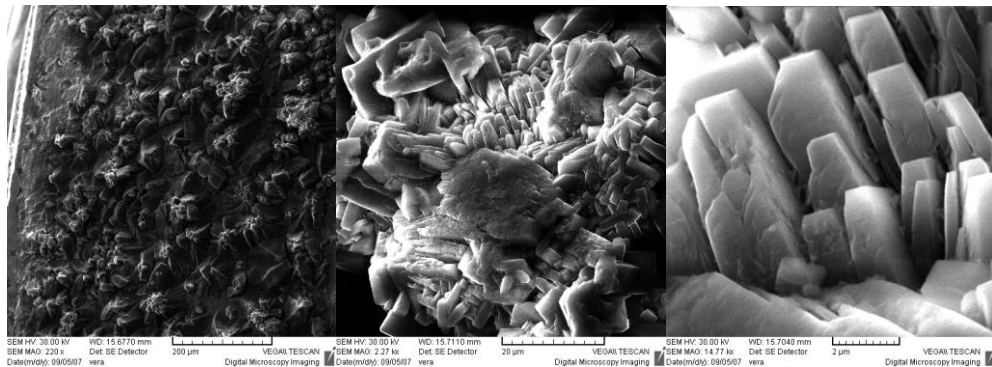
Obr. 2.: Fyzikální jevy vyvolané interakcí vzorku a elektronů: 1 – svazek primárních elektronů, 2 – vzorek, elektrony: 3 – prošlé, 4 – absorbované, 5 – rozptýlené, 6 – odražené, 7 – sekundární, 8 – Augerovy, 9 – rentgenové záření charakteristické, 10 - rentgenové záření spojitě

Pomocí elektronové mikroskopie můžeme pozorovat nejen mikrostrukturu ale také submikrostrukturu, případně se dá použít ke studii vzniku fází. Jejím principem je použití urychleného elektronového paprsku, který dopadá na povrch vzorku. Zde, dochází k interakci, všechny tyto fyzikální vlastnosti zaznamenává detektor (obr. 2.). V současné době

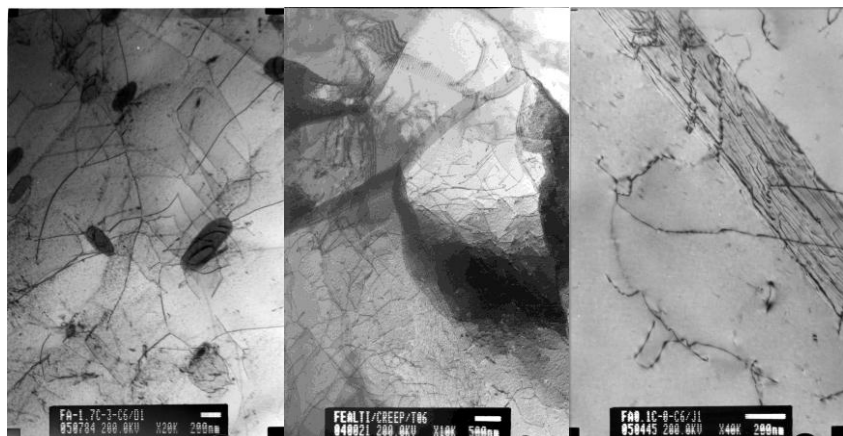
se používají hlavně dvě metody a to TEM a REM, neboli transmisní a rastrovací elektronová mikroskopie.

TEM je metodou kdy konečný obraz pozoruje na fluorescenčním stínítku nebo se zachytí na fotografické desce. U tohoto druhu elektronové mikroskopie je svazek elektronů urychlený díky poli, které vzniká mezi katodou a anodou. Následně prochází kondenzátorem, pozorovaným povrchem, objektivem a projektorem.

REM technologie nám umožňuje zobrazovat výsledný vzhled povrchu vzorku přímo na obrazovku. V tomto případě nám svazek elektronů putuje optickou soustavou a systémem cívek je pak vychylován tak aby postupně řádek po řádku reagoval s povrchem materiálu. Tyto reakce nám zaznamenává již zmíněný detektor [6,7,8].



Obr. 3.: REM technologie u fosfátovaného šroubu při zvětšení 220x, 2300x 15000x



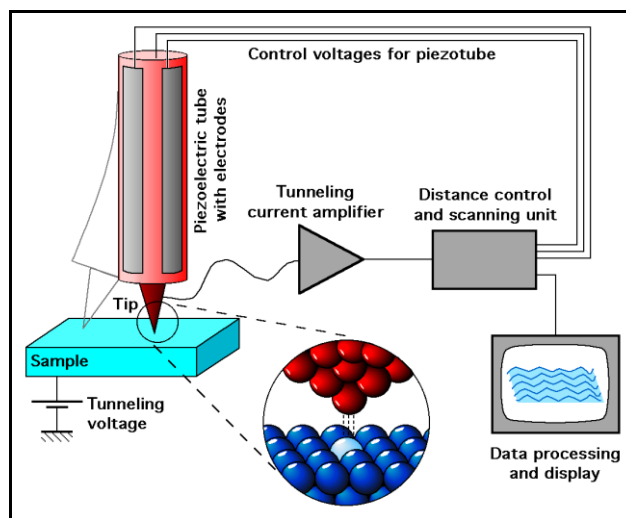
Obr. 4.: TEM technologie u identifikace fází a hranicí zrn



### 1.2.3.3 Mikroskopie rastrující sondy

Jedná se o poslední metodu zobrazování, která funguje na principu interakce sondy se vzorkem. Tedy sonda nám sleduje povrch a pomocí zpětné vazby nám zobrazí povrch materiálu. Pojem zvětšení u tohoto typu mikroskopie nemá žádný smysl, protože se jedná o použití elektromechanického principu. Tato technologie je velmi přesná a pracuje na atomární úrovni. Je tedy nezbytně nutné velmi přesně kalibrovat celé zařízení.

V praxi se uplatňují dva nejvýznamnější způsoby a to STM, neboli řádkový tunelový mikroskop a AMF mikroskop atomárních sil. U STM dochází k mapování pomocí vodivého hrotu, který se pohybuje nad materiálem. Naproti tomu AMF je zkonstruovaný s pomocnou výkyvným rámečkem, který mění svou polohu dle toho, jak je hrot přitahován elektrostatickými nebo Van der Walsovými silami. U AMF mikroskopu je rozlišovací schopnost až v hodnotě  $10^{-12}$  m [6,7,8].



Obr. 5.: Detail interakce mezi hrotem a povrchem

## 1.3 Příprava vzorku

Správná příprava vzorků pro metalografii je nesmírně důležitá a musí splňovat mnoho podmínek a to přes odebrání vzorku až po manipulaci s ním. Postup získání metalografického výbrusu materiálu je zobrazen na obrázku (obr. 6).



Obr. 6.: Schéma průběhu metalografického výbrusu

### 1.3.1 Odběr vzorku

Pro tuto část operace přípravy vzorku je hned několik podmínek. Vybrané místo odběru by mělo nejlépe charakterizovat celkový materiál. Další důležitou podmínkou je vyvarovat se toho aby během samotného odebírání materiálu nedošlo k narušení původní struktury například teplými pochody vzniklým během odebírání nebo naopak tlakem chladicího média během chladicího období. V metalografické praxi se obecně udává, že plocha vzorku by měla mít hodnotu nad  $2 \text{ cm}^2$  [6,8].

### 1.3.2 Prepretace

Tento zavedený pojem nám označuje způsob konzervování vzorku a to během manipulace a přepravy. Jedná se o technologickou operaci, kdy odebraný vzorek zalijeme polymerní hmotou. Zalítí se může provádět buď za tepla, zalisováním do epoxidové pryskyřice nebo zalitím za studena do dentakrylu [6,8].

### 1.3.3 Broušení

Jedná se o úlohu, kdy za pomoci mechanického působení brusného papíru docílíme co možná nejmenší povrchové nerovnosti na vzorku. K tomuto účelu se používají různé druhy metalografických brusek a různé tvrdosti brusných papírů. Pro odstranění největších nerovností, které mohou být způsobeny odebíráním materiálu, použijeme nejhrubší brusné papíry a postupně pokračujeme v broušení jemnějšími. Konstrukce metalografické brusky je složena z vodorovného rotačního kotouče. Nejčastěji se brousí za mokra, kde jako médium

slouží voda. Díky tomu docílíme nejen chlazení ale také odvodu odbroušeného materiálu a samozřejmě možnosti využít vyšší rychlosti brusného papíru [6,8].

### 1.3.4 Leštění

Při mechanickém leštění nedochází k úbytku materiálu, ale tlakem je vyrovnána nerovnoměrnost povrchu. Vyvýšeniny se zmenšují, prohlubeniny jsou zaplňovány materiálem. Leštěním se nejprve vytvoří polykrystalická vrstva, jejíž krystalky se dalším leštěním drobí na stále menší, až se vytvoří nová vrstva tak jemně krystalická, že se chová jako amorfni tzv. Beilbyho vrstva.

Mechanické leštění se provádí na leštících kotoučích, potažených tkaninou. Na kotouč je nanášena leštící suspenze, což bývá  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Některé strukturní součásti pozorujeme na vyleštěném nenaleptaném vzorku. Při takovém pozorování je opět třeba dbát na to, aby během leštění nedošlo k jednostranné deformaci povrchu vzorku. Vedle mechanického leštění se používá také leštění elektrolytické a chemické. Elektrolytické leštění se v praxi uplatňuje zejména u měkkých materiálů, u kterých se tvoří při mechanickém leštění rýhy a vzniká i hluboká Beilbyho vrstva.

Chemické leštění je založeno na stejném principu jako leštění elektrolytické. Vzorek je ponořen do elektrolytu, který má vhodné chemické složení. Na povrchu leštěného vzorku vznikají elementární elektrochemické články, které způsobí vyrovnání povrchu obdobně jako přiváděný proud u elektrolytického leštění [6,8].

### 1.3.5 Leptání

Na chemicky vyleštěném povrchu metalografického vzorku můžeme pozorovat praskliny, póry, různé dutiny, nekovové částice a nečistoty. Krystalická struktura kovového materiálu je zakryta tvářenou Beilbyho vrstvou. Abychom mohli strukturu pozorovat, je třeba Beilbyho vrstvu odstranit. Toto docílíme chemickou cestou, a to leptáním vzorku v kyselinách nebo jejich alkoholických roztocích či elektrolyticky. Leptání může probíhat tak, že leptadlo působí buď na plochu zrn, na hranice zrn nebo pouze na určené strukturní částice. Podle toho rozlišujeme: plošné leptání, leptání na hranice zrn a selektivní leptání [6,8].

### 1.3.6 Pozorování a hodnocení

Pro tyto účely je zcela nezbytné znát rovnovážné diagramy a také diagramy rozpadu austenitu během tepelného zpracování. Jejich popis nalezneme v následujících kapitolách. Výsledná struktura je pak ovlivněna těmito všemi faktory.

## 1.4 Železné slitiny

Slitiny železa představují nejvýznamnější skupinu kovových materiálů, které se používají v širokém uplatnění ve většině všech oborů. Tyto slitiny jsou výsledkem dlouholetých výzkumů a jejich aplikací v praxi, ať už se jedná o litiny nebo speciální vysokolegované materiály.

Přesto, že se slitiny železa používají již několik tisíc let, teprve druhá polovina 19. století znamenala začátek rozvoje v této oblasti. Do tohoto období, byly známy pouze dva základní druhy ocelí a to uhlíková, která obsahuje nízké procento uhlíku tzv. měkké železo a tvrdší kalitelná ocel s vyšším obsahem. Teprve roku 1880 se začala rozšiřovat výroba prvních legovaných ocelí. Přímou úměrně s rostoucím objemem výroby také vzrostl zájem o studium vlastností slitin železa [3,8].

### 1.4.1 Vlastnosti čistého železa

Železo ve čisté formě má atomovou hmotnost 26 a atomovou relativní hmotnost 55,874. Je tvořeno směsí čtyř izotopů. V periodické tabulce prvků je nalezneme mezi kovy v přechodové skupině. Z hlediska četnosti výskytu zaujímá čtvrté místo mezi prvky existujícími na naší planetě. Největší množství bychom našli v zemském jádru, kde tvoří, spolu s niklem jeho podstatnou část. Z hlediska výroby je však jeho získání nákladná a velmi obtížná záležitost, proto nelze vyrobit zcela čisté železo. Největší dosažená hodnota představuje 99,99% čistoty za pomoci rafinace. Používají se tedy jeho slitiny, které představují 90% vyrobeného objemu mezi kovovými materiály.

Čisté železo je velmi měkké, dobře tvárné, má malou pevnost a snadno podléhá korozi. Teplota tavení železa silně závisí na jeho čistotě a je v intervalu 1535 až 1539°C. Teplota varu je pohybuje kolem 3070°C [3,8].

### 1.4.2 Modifikace

Železo je polymorfní kov, který se vyskytuje za normálního tlaku ve třech základních modifikacích označených písmeny řecké abecedy a to železo  $\alpha$ ,  $\beta, \gamma$  a  $\delta$ . Tyto modifikace od sebe liší uspořádáním molekul v atomární mřížce nebo případně svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi.

Modifikace  $\alpha$  je stabilní a nízkoteplotní případ železa, jenž má feromagnetické vlastnosti. Vyskytuje se při teplotách do  $911^{\circ}\text{C}$  a nad teplotou  $1392^{\circ}\text{C}$  až  $1538^{\circ}\text{C}$ , kde je označen písmenem  $\delta$ . Její krystalická mřížka je kubická prostorově centrována.

Železo  $\beta$  je rozšířená modifikace železa  $\alpha$ , která ztratila feromagnetické vlastnosti při teplotě  $769^{\circ}\text{C}$  v takzvaném Curiero bodě. Nad touto teplotou jsem její vlastnosti paramagnetické.

Modifikace  $\gamma$  se vyskytuje v tepelném poli mezi  $911^{\circ}\text{C}$  a  $1392^{\circ}\text{C}$ . Při teplotě přechodu mezi  $\beta$  a  $\gamma$  dochází ke změně krystalické mřížky na kubickou plošně centrovanou a parametr mřížky zde tedy skokově roste. Železo  $\gamma$  je však možné zachovat za normálních teplot v austenitické oceli [3,8].

### 1.4.3 Uhlík ve slitinách železa

Ve všech slitinách železa je vždy přítomný uhlík, který podstatnou mírou ovlivňuje jeho vlastnosti. Podle obsahu uhlíku v těchto směsích se železné slitiny rozdělují do skupin na oceli, kde je obsah uhlíku do 2% celkového objemu nebo surová železa a litiny, kde obsah uhlíku bývá vyšší než 2% [4,7,8].

#### 1.4.3.1 Rovnovážné soustavy

Rovnovážné diagramy jsou velmi důležité pro studium tepelné oblasti zpracování, lití a tváření slitin železa jako jsou oceli a litiny. Z těchto diagramů je možné stanovit žíhací teploty a teploty přeměn přímo pro dané složení litin nebo ocelí, které probíhají přímo při podmínkách blízkým rovnovážnému stavu. Dále lze vyčíst teploty tavení lití nebo tváření za studena. Jsou velmi významné pro hodnocení vlastností a struktury ocelí a litin.

V případě modifikace železa  $\alpha$  se nám uhlík rozpouští jen velmi slabě při teplotě  $723^{\circ}\text{C}$  je to pouze 0,018 %. Je-li teplota  $20^{\circ}\text{C}$  dosahuje rozpustnost pouze  $1,5 \cdot 10^{-7}$  %. Pro modifikaci  $\gamma$  se rozpustnost pohybuje na hranici 2,14 % uhlíku. Za příčinou tohoto rozdílu

je změna krystalické mřížky, kdy se v železe  $\gamma$  nacházejí větší intersticiální prostory než je tomu v případě  $\alpha$  modifikace. Tedy do tohoto prostoru se snáze může umístit atom uhlíku, který je malý.

V případě, že se dostaneme nad mez rozpustnosti pro modifikace  $\alpha$  a  $\gamma$  je uhlík tvořen samostatnou fází. Vzniká nám tedy sloučenina karbidu železa  $\text{Fe}_3\text{C}$ . V praxi se tato sloučenina označuje jako cementit, který není zcela stabilní a žháním se může při vyšších teplotách rozkládat na železo a volný uhlík. Tento proces se označuje pojmem grafizace.

### 1.4.3.2 Rovnovážné strukturní součásti

**Ferit** je intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ . Maximální rozpustnost uhlíku ve feritu za teploty  $20^\circ\text{C}$  je 0,018 %. Feromagnetické vlastnosti ferit ztrácí nad teplotu  $768^\circ\text{C}$ . Je tvárný a má pevnost kolem 220 MPa a tvrdost 50 HB. Jeho přítomnost je v šedých litinách a podeutektoidních ocelí.

**$\delta$  ferit** je intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe  $\delta$ . Krystalizuje přímo z taveny, u slitin o obsahu uhlíku do 0,53 %.

**Austenit** je intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe  $\gamma$ . Jeho maximální rozpustnost je 2,14 % a to při teplotě  $1147^\circ\text{C}$  a zmenšuje se s klesající teplotou na 0,765 % uhlíku. Tvoří strukturu pouze uhlíkových ocelí pouze nad teplotou  $723^\circ\text{C}$ . Tento roztok je dobře tvárný, houževnatý a paramagnetický.

**Perlit** je případ eutektoidu, který je tvořen střídavě uloženými krystaly feritu a cementitu. Jeho pevnost se pohybuje kolem 840 MPa a tvrdost 280 HB. Je méně tvárný než austenit. Rozděluje se na laminární perlit, který má zrna cementitu a feritu ve tvaru destiček a globulární, pokud jsou zrna ve formě kuliček. Ve srovnání s feritem je houževnatější, měkčí a lépe obrobitelný.

**Cementit** je chemická sloučenina, je velmi křehký a jeho tvrdost dosahuje přes 800 HV.

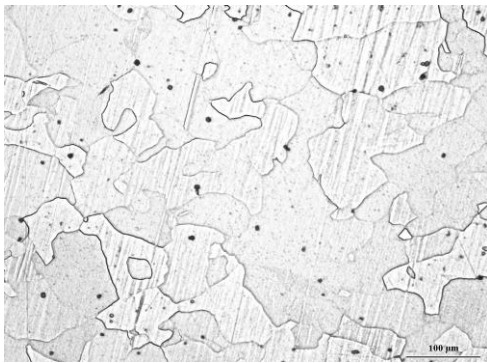
**Primární cementit** krystalizuje přímo z taveniny u bílých nadeutektoidních litin.

**Sekundární cementit** vzniká segregací z přesyceného roztoku  $\gamma$  v důsledku klesající rozpustnosti uhlíku v austenitu při ochlazování z teploty  $1147^\circ\text{C}$  do teploty  $723^\circ\text{C}$ .

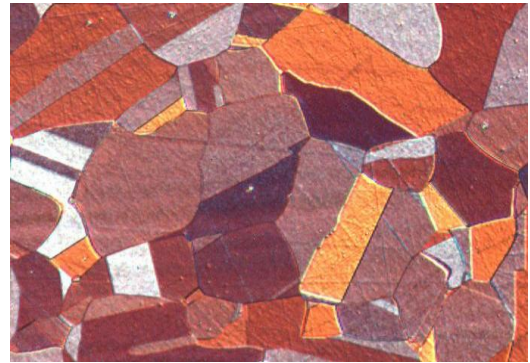
**Terciální cementit** vzniká změnou rozpustnosti uhlíku z tuhého roztoku železa  $\alpha$  pod teplotou  $723^\circ\text{C}$ .

**Grafit** je volný uhlík. Je velmi měkký, málo pevný, krystalizuje v soustavě šesterečné a je přítomen v šedé litině. Nejčastěji ho tvoří podlouhlé lupínky, pak se označuje jako grafit lupínkový. Primární grafit krystalizuje přímo z taveniny s nadetektickým složením.

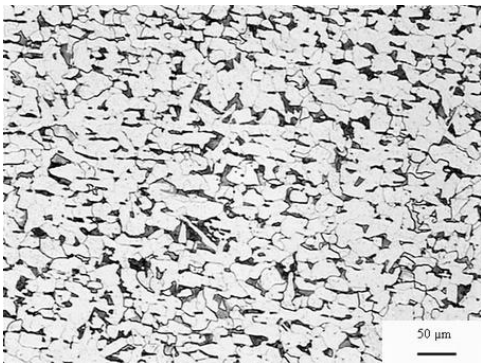
**Ledeburit** je eutektikem, tvoří směsi austenitu o obsahu uhlíku 2,14 % a eutektického cementitu. Je stabilní pouze do teploty 723°C, kdy se jeho austenitická složka rozpadá v perlitu a vzniká tak rozpadlý ledeburit.



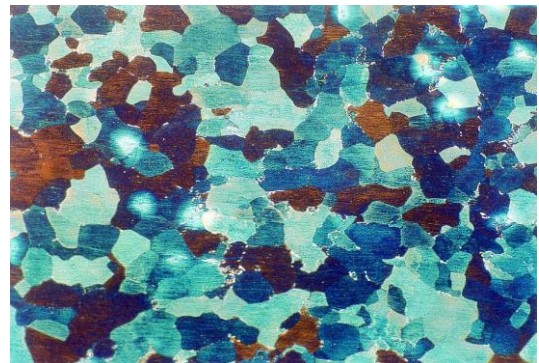
Obr. 7.: Feritická struktura



Obr. 8.: Austenitická struktura



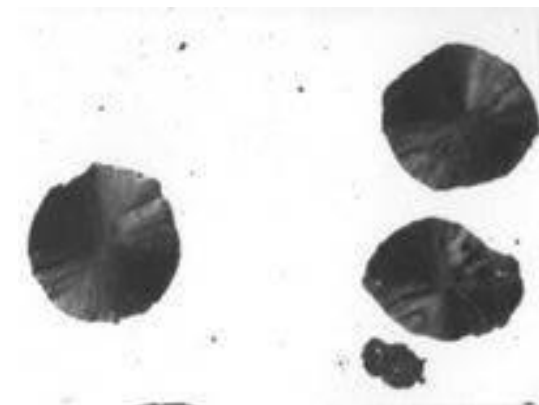
Obr. 9.: Perlitická struktura (tmavá místa)



Obr. 10.: Terciální cementit (bílé místa)



Obr. 11.: Ledeburitická struktura



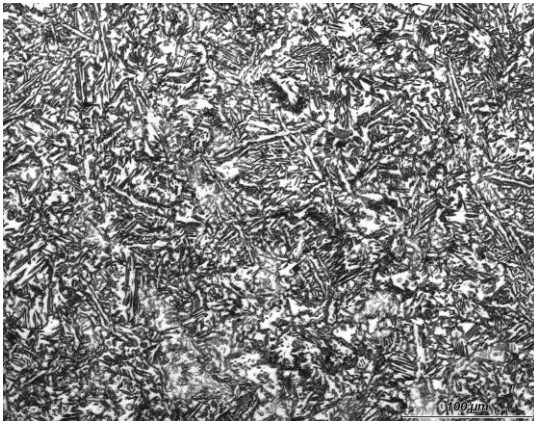
Obr. 12.: Příklad kuličkového grafitu

### 1.4.3.3 Nerovnovážné strukturní součásti

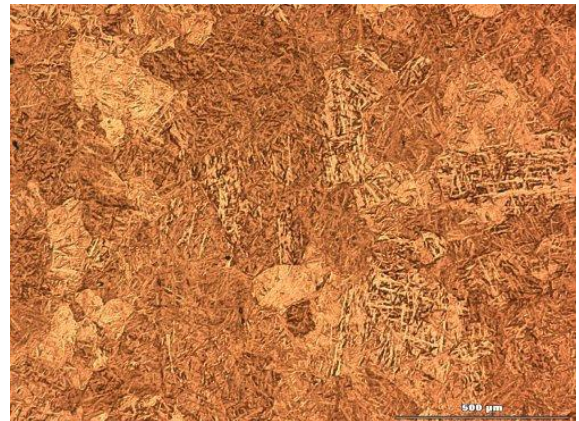
**Martenzit** je přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ . Přítomnost uhlíku v mřížce železa  $\alpha$  vyvolává značné vnitřní pnutí, jenž má za následek velkou tvrdost a křehkost martenzitu. Martenzit vzniká kalením uhlíkových podeutektoidních ocelí nad teplotou  $A_{c3}$  a nadeutektoidních ocelí nad  $A_{c1}$ .

**Bainit** je stejně jako perlit tvořen feriticko-cementickou strukturou. Jeho tvrdost je 400 až 450 HB, je méně křehký než martenzit a vzniká rozpadem přechlazeného austenitu pod teplotou  $550^{\circ}\text{C}$ .

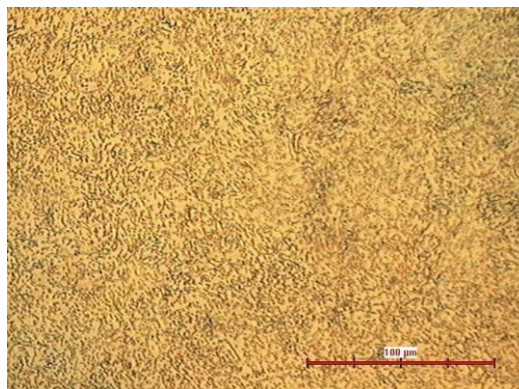
**Sorbit** je směs jemně vyloučeného cementitu a feritu při popouštění martenzitu za vyšší teploty.



Obr. 13.: Bainitická struktura



Obr. 14.: Martenzit



Obr. 15.: Sorbitická struktura



#### 1.4.3.4 Rovnovázný digram Fe-C

Struktura slitin železa nám do značné míry ovlivňuje vlastnosti železa. Tato struktura se však v průběhu krystalizace a překrystalizačních změn mění a závisí na chemickém složení a rychlosti ochlazování. Právě k popisu těchto změn nám slouží rovnovážný diagram, ve kterém najdeme přesně vymezeny oblasti fází, jejich směsí v přímé vazbě na teplotu a chemické složení dané slitiny. Při jejím chladnutí dochází k vylučování přebytečného uhlíku z tuhého roztoku nad mezí rozpustnosti za dané teploty a to buď ve formě cementitu nebo volného uhlíku, grafitu. Aby došlo, k vyloučení musí být splněny podmínky, které záleží na obsahu uhlíku, na rychlosti ochlazování. Existují tedova rovnovážné diagramy a to železo cementit neboli metastabilní soustava  $Fe_3C$  a stabilní soustava Fe-C.

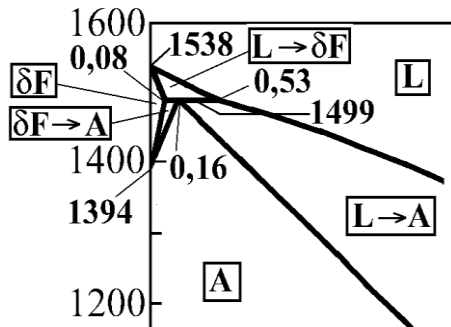
#### 1.4.3.5 Soustava metastabilní $Fe_3C$

Tato soustava má u slitin z technického hlediska větší význam než stabilní soustava Fe-C, neboť nám ukazuje, jak se mění strukturní poměry ocelí, surového železa a litin s bílým lomem během procesu krystalizace. Jedná se o typický příklad binární soustavy s eutektikem, dokonalou rozpustností složek v kapalném skupenství, dokonalou nerozpustností jedné složky železa v karbidu železa a s neomezenou rozpustností druhé složky například uhlíku v železe  $\alpha$  a  $\gamma$ . V této soustavě probíhají tři základní reakce.

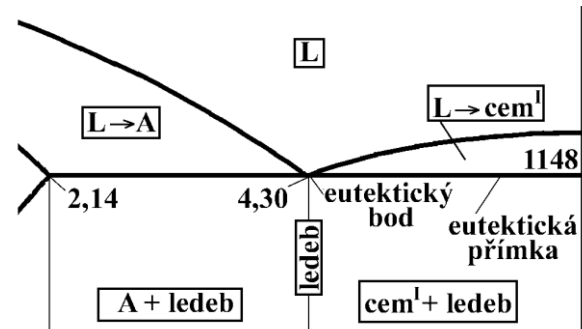
První z nich je reakce peritaektická (obr. 16), jenž probíhá za teploty  $1499^\circ C$ . Oblast průběhu je stanovena do obsahu uhlíku 0,53 %. Tato oblast je rozdělena na část kde dochází ke krystalizaci taveniny přes směs taveniny a  $\delta$  feritu do čistého  $\delta$  feritu do obsahu uhlíku 0,08 %. V intervalu koncentrace uhlíku 0,08 % až 0,16 % krystalizuje tavenina na směs taveniny a  $\delta$  feritu a následně z taveniny vyloučí austenit nebo modifikace  $\gamma$ . Výsledná směs je tvořena pouze austenitem. Mezi hodnotou uhlíku 0,16 % a 0,53 % se z taveniny vyloučí  $\delta$  ferit a při teplotě  $1499^\circ C$  dojde k přeměně na austenit. Výsledná směs je kombinací austenitu a taveniny. Pro obsah uhlíku 0,53 % dojde k přímé krystalizaci austenitu z taveniny, směs je tvořena austenitem a taveninou.

Další z reakcí je oblast eutektické transformace (obr. 17), která probíhá za teploty  $1148^\circ C$  pro hodnoty uhlíku od 2,14 % až po 6,687 %. Oblast je rozdělena na interval 2,14 % až 4,3 % a 4,3 % až 6,687 % uhlíku. Během tohoto procesu dojde k transformaci směsi taveniny a austenitu a směsi taveniny a primárního cementitu přes změnu taveniny na eutektikum takzvaný ledeburit.

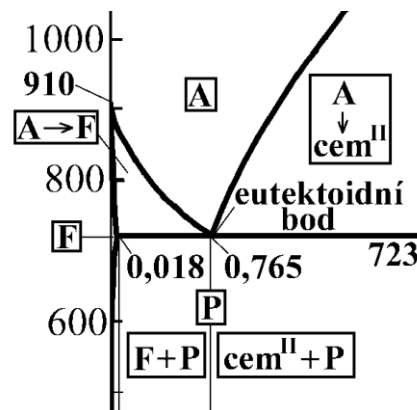
Třetí způsob je označená jako eutektoidní oblast transformace (obr. 18). Najdeme ji při konstantní teplotě 723°C pro materiály jejíž hodnota uhlíku je mezi 0,018 % a 6,687 %. Přeměna se děje prostřednictvím eutektoidu neboli perlitu. Přímá transformace austenity na perlit je pouze při hmotové koncentraci 0,765 % uhlíku.



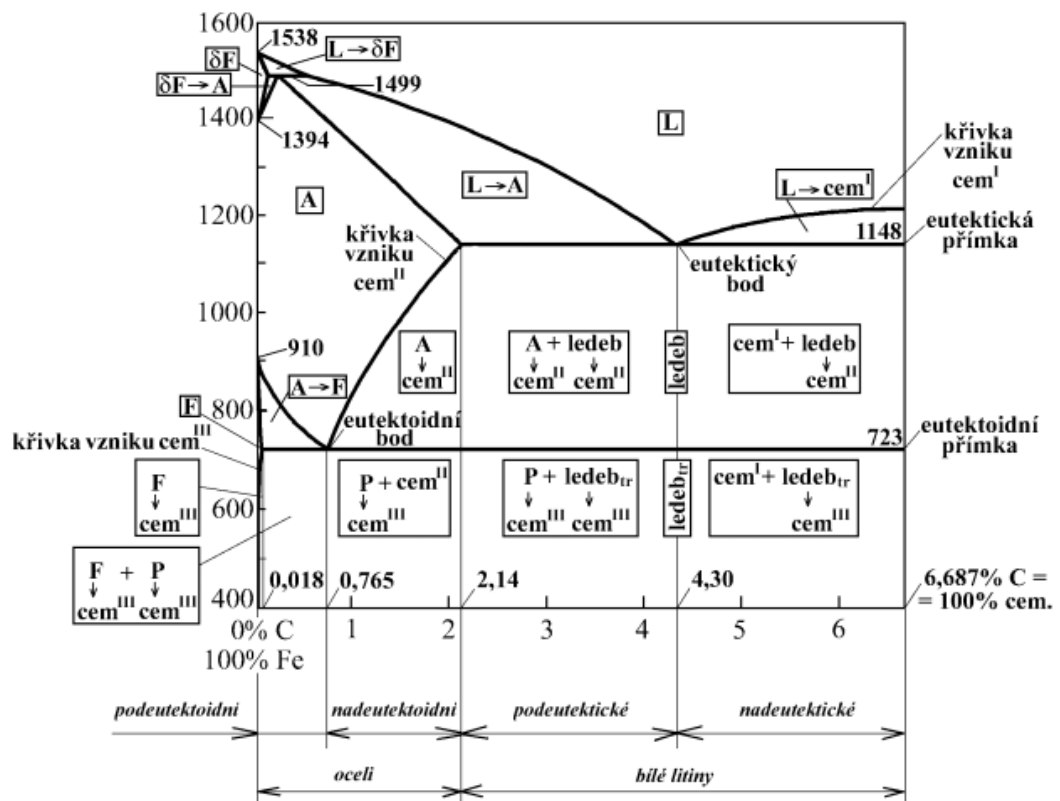
Obr. 16.: Peritektická reakce



Obr. 17.: Eutektická transformace



Obr. 18.: Eutektoidní transformace

Obr. 19.: Metastabilní Fe<sub>3</sub>C diagram

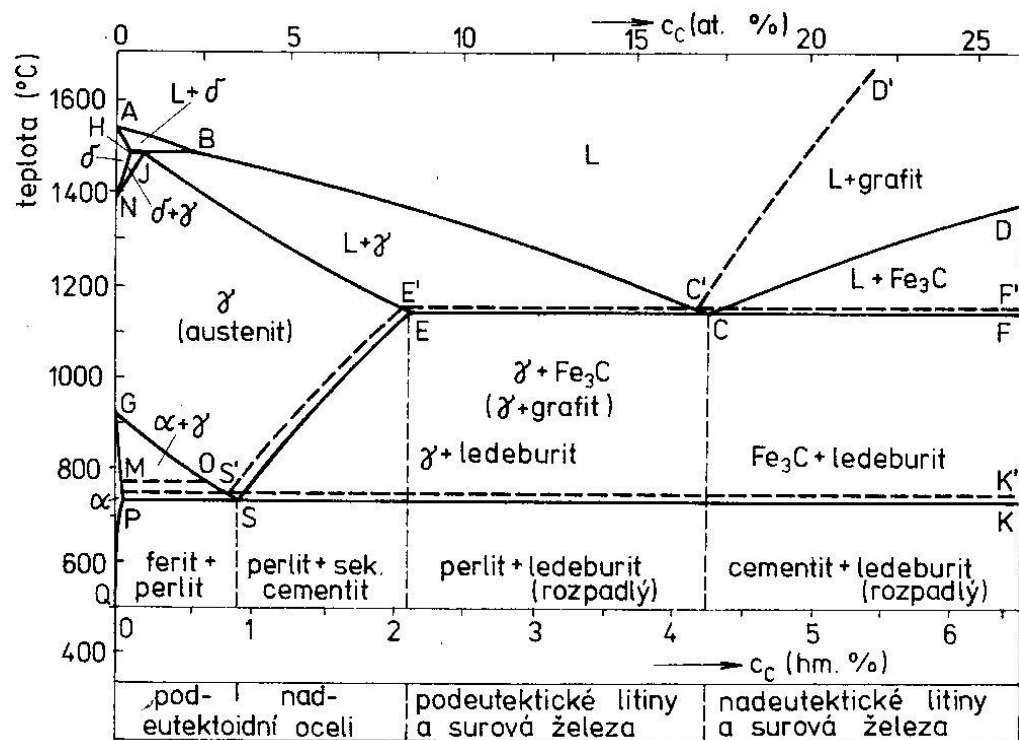
#### 1.4.3.6 Rovnovážný stabilní diagram Fe-C

Rovnovážný stabilní diagram Fe-C se čárkovaně zakresluje do diagramu metastabilního. Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma diagramy je v tom, že zatímco diagram metastabilní je zakončený intermediální fází cementitu, která vzniká při obsahu uhlíku 6,687%, lze stabilní diagram uvažovat až do stoprocentního obsahu uhlíku. Dalším rozdílem je také reakce eutektoidní a eutektická, která zde probíhá při vyšších teplotách a nižších koncentracích. V praktickém případě se stabilní diagram však téměř nepoužívá, protože k tomu bychom rozpustili tak velké množství uhlíku v železe, by bylo potřeba užít velmi vysokých teplot. Zabýváme se tedy pouze částí na straně železa. Stabilní formou u toho diagramu je grafit a podle něj zde krystalizují šedé litiny a surová železa s šedým lomem.

Při bližším pohledu zjistíme, že teplota eutektoidní přeměny nám vzrostla na 1153°C, teplota eutektické přeměny je 738°C. Koncentrace eutektického bodu C' je 4,26% a koncentrace eutektoidního bodu S' je 0,69%. Koncentrace bodu E' je 2,11%. Analogií primárního cementitu je primární grafit. Výsledkem eutektické reakce je grafitové eutektikum, skládající se z austenitu  $\gamma$  a grafitu. Výsledkem eutektoidní reakce je grafitový eutektoid,

skládající se z feritu  $\alpha$  a grafitu. Při ochlazování austenitu podle čáry S'E' se vylučuje sekundární grafit  $C_{grII}$ .

Vezmeme-li v úvahu kinematické hledisko pak je výhodnější použití cementitu než grafitu, protože stavba cementitu je velmi blízká stavbě austenitu proti tomu austenit a grafit se významně liší. Stejně tak i tvorba cementitu z austenitu je snadnější. Práce, která je zapotřebí ke vzniku zárodků a difuzní změna je menší než při krystalizaci grafitu. Z hlediska termodynamických pochodů je grafit stabilnější než již zmiňovaný cementit. Porovnáme-li volné entalpie grafitu a cementitu pak zjistíme, že entalpie u grafitu je nižší a proto podporuje i tvorbu grafitu. Tyto hlediska jsou důležité při sledování krystalizace grafitu přímo z taveniny nebo vylučování sekundárního grafitu z austenitu. Jestliže jsou splněny správné podmínky, pak vzniká struktura s grafitem nebo s cementitem.



Obr. 20.: Rovnovážní stabilní diagram (vyznačen čárkovaně)

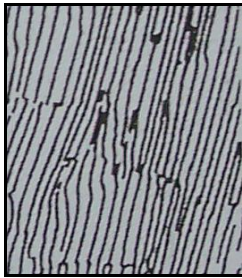
## 2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN KOVU

Fázové přeměny, které probíhají při změnách skupenství během procesu tuhnutí, mají zásadní význam pro vznik primárních struktur kovů, slitin a jsou příčinou změny struktury a následně tedy i změny jejich vlastností. Naproti tomu fázové změny slitin železa s uhlíkem v tuhém stavu během ohřevu nebo ochlazování, probíhají jen zřídka a to za podmínek, které jsou blízké podmínkám rovnovážným. Jestliže však dojde k zvýšení rychlosti ochlazování pak již nelze dále předpokládat ustálení termodynamické rovnováhy celé soustavy. Z těchto důvodů nelze použít rovnovážné diagramy. Například oceli se často zpracovávají za účelem dosažení nerovnovážných podmínek. Změny během procesů tuhnutí můžeme sledovat v transformačních diagramech, které obsahují údaje o perlitické, bainitické a martenzitické přeměně austenitu. Znázorňují nám průběhy přeměny přechlazeného austenitu a udávají jaký vliv má teplota a čas na průběh přeměn. Vycházíme ze dvou základních digramů. Diagram izotermické přeměny austenitu a anizotermické přeměny austenitu [2].

### 2.1 Austenitizace

Její začátek je vždy vyvolán přeměnou perlitu v autenit nad teplotou  $A_{c1}$ . Zárodky vznikají na fázovém rozhraní feritu a cementitu a jejich následný růst pokračuje dále ve feritu. Růst nově vznikající fáze je řízen difuzí uhlíku, který se získává z rozpuštěného cementitu do obklopujícího austenitu.

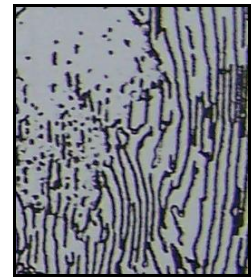
Na obrázku je znázorněn mechanismus austenitizace pro eutektoidní oceli. Na obrázku 21, je zobrazena původní laminární perlitická struktura, ta se nejprve rozpadá v určitých oblastech na kolonie s potrhanými lamelami perlitického cementitu 22. Následně se kolonie transformuje na austenit 23, který obsahuje zbytky potrhaných lamel. Na obrázku 24, pak vidíme zbylé zrno perlitu, které obklopuje nově vzniklý austenit. V tomto austenitu jsou patrné zbytky stop po původně lamelárním uspořádáním cementitu 25. Celý proces austenitizace dospěje do stavu, kdy jsou v austenitu nevyrovnané koncentrační rozdíly (obr. 26).



Obr. 21.: Perlit



Obr. 22.: Rozpad perlitu



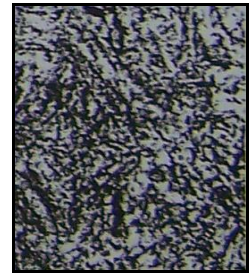
Obr. 23.: Transformace



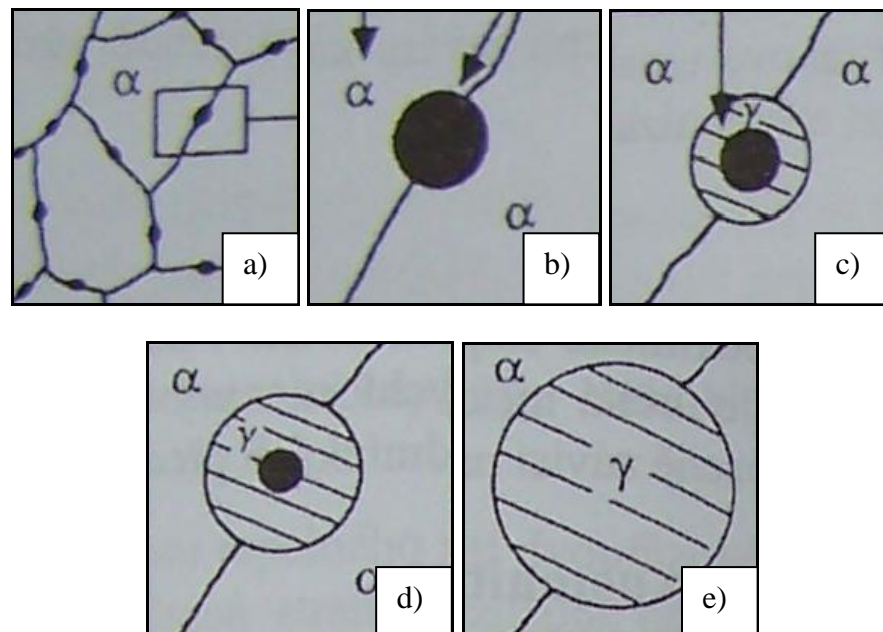
Obr. 24.: Zbylé zrno



Obr. 25.: Stopy austenitu



Obr. 26.: Finální fáze

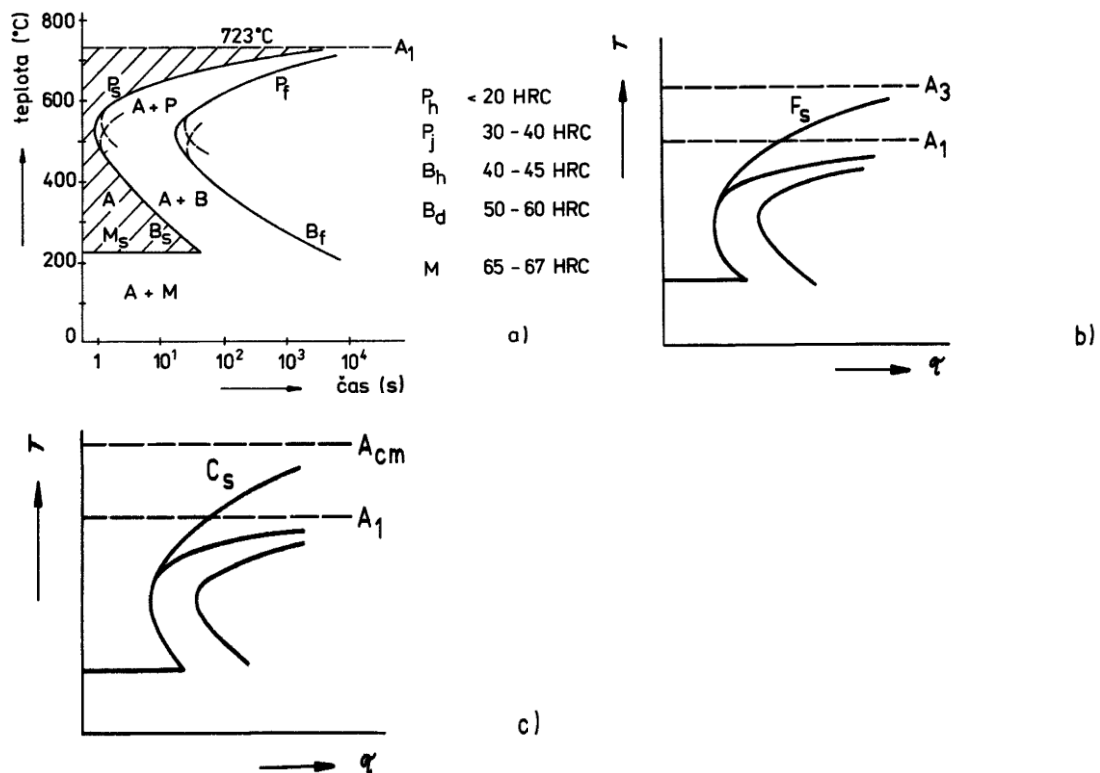


Obr. 27.: a) částice karbidu, b) zrno feritu, c) vznik austenitu, d) růst austenitu, e) dokončení růstu zrna austenitu.

Pro popis rozpouštění karbidů a přeměny feritu v austenit slouží obrázek 27. Na tomto modelu uvažujeme částici karbidu na hranici zrn feritu (obr. 27a.) nebo v zrně feritu při daných teplotách  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  (obr. 27b.). Austenit nám zde začne vznikat na fázovém rozhraní karbid – ferit, jenž má kulovitý tvar (obr. 27c.). Karbid se nám následně začne rozpouštět a austenit roste do feritu (obr. 27d.). Na konec se karbid zcela rozpustí a zrno austenitu roste dále na úkor feritu (obr. 27e.).

## 2.2 Izotermický rozpad austenitu IRA

V tomto diagramu, můžeme sledovat závislost doby přeměny austenitu během platnosti izotermických podmínek. Tedy slitina se zahřeje do oblasti austenitu, zde se ponechá dostatečně dlouhou dobu, aby došlo k úplné austenizaci a pak se prudce ochladí na určitou teplotu, tato teplota je následně konstantní [2,3,8].



Obr. 28.: Schéma izotermického rozpadu austenitu (IRA) oceli

a) eutektoidní, b) podutektoidní, c) nadeutektoidní;

$P_s, P_f$  – počátek a konec perlitické přeměny;  $B_s, B_f$  – počátek a konec bainitické přeměny;  $M_s$  – teplota počátku martenzitické přeměny;  $F_s, C_s$  – počátek vzniku proeutektoidního feritu, popř. cementitu;  $A$  – austenit;  $P$  – perlit;  $B$  – bainit;  $M$  – martenzit;  $P_h$  – hrubý perlit;  $P_j$  – jemný perlit;  $B_h$  – horní bainit;  $B_d$  – dolní bainit.

**$P_s$  – perlit start:** je počátek přeměny (transformace) austenitu na perlit.

**$P_f$  – perlit finish:** je konec přeměny austenitu na perlit

**$B_s$  – bainit start:** je počátek přeměny austenitu na bainit.

**$B_f$  – bainit finish:** je konec přeměny austenitu na bainit.

**$M_s$  – martenzit start:** je teplota počátku přeměny austenitu na martenzit.

**$M_f$  – martenzit finish:** je teplota konce přeměny austenitu na martenzit.

**$A_z$  – austenit zbytkový:** je austenit, který zůstává po kalení nebo jiným způsobem ochlazení

### 2.2.1 Perlitická přeměna

Za teplot nad nosem křivky rozpadu, teplotou 550°C, probíhá rozpad austenitu podle zákonů vzniku perlitu. Čím více se bude teplota rozpadu blížit k teplotě nosu křivky, tím jemnější bude vzniklý lamelární perlit. Čím více se bude teplota izotermického rozpadu blížit teplotě  $a_1$ , tím bude mít perlit více hrubé zrna.

### 2.2.2 Bainitická přeměna

Pod nosem křivky v důsledku snížené difúze probíhá rozpad austenitu odlišně, od perlitické přeměny. Čím bude teplota izotermického rozpadu nižší, tím výrazněji vzniká z austenitu ferit a teprve potom vzniká z přesyceného feritu cementit. Bainitická přeměna se ukončí po určité době, i když zůstane určitý podíl austenitu nepřeměněn. Tomuto austenitu říkáme zbytkový austenit, který snižuje pevnost bainitu. Množství Zbytkového austenitu je závislé na složení oceli.

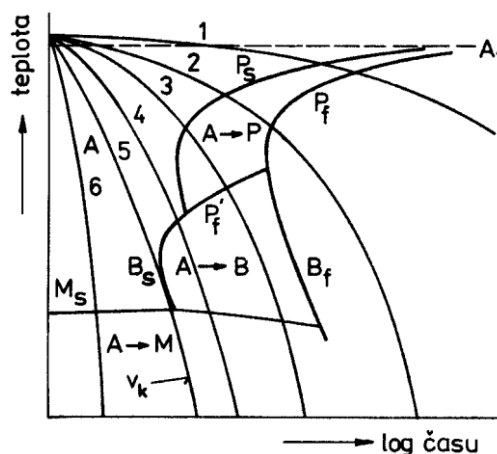
### 2.2.3 Martenzitická přeměna

Ochladíme-li prudce austenit na teplotu pod  $M_s$ , jsou zcela potlačeny difúzní jevy a proběhne pouze přeměna mřížky gama na alfa. Navenek se projeví velkou tvrdostí a křehkostí. Takto vzniklá struktura se nazývá martenzit.



### 2.3 ANIZOTROPICKÝ ROZPAD AUSTENITU ARA

Diagramy ARA nám ukazují počátky a konce jednotlivých přeměn, které byly získány během plynulého ochlazování austenitu a to různou rychlostí (obr. 29). Na rozdíl od diagramu i IRA je anizotropický rozpadový diagram daleko složitější, protože výsledná struktura může být tvořena velkým počtem směsí, které vznikají během různých teplot. Jestliže ochladíme eutektoidní ocel, může nám vzniknout z přechlazeného austenitu perlit. V diagramu ARA je počátek a konec politické přeměny posunutý k nižším teplotám více, čím je rychlost ochlazovací křivky vyšší (pro křivky 1,2). Po dosažení určité ochlazovací rychlosti se nestačí veškerý austenit transformovat v perlitické části a jeho část se nám zachová až po počátek bainitické přeměny. V případě křivky 3 se spolu s perlitem objeví i martenzit a bainit. U křivky 4 nám platí, že rychlost ochlazování je taková, že se začíná rozpadat austenit bainitickou reakcí a pod  $M_s$  pokračuje martenzitická přeměna. Vzroste-li nám rychlost na křivku číslo 5., pak se austenit přímo transformuje na martenzit [2,3,8].



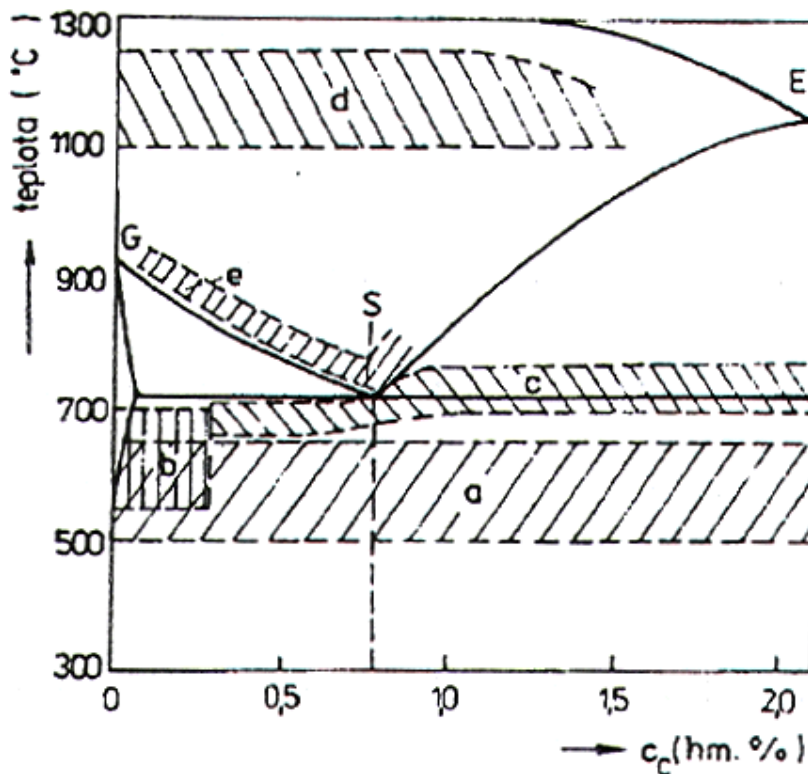
Obr. 29.: Diagram anizotermického rozpadu austenitu (ARA) eutektoidních ocelí.

### 2.4 Žihání

Cílem žihání je pokud možno co nejlíže se přiblížit rovnovážnému stavu oceli. Proto je součástí procesu žihání pomalé ochlazování. Toto tepelné zpracování má za účel odstranit vlivy, z předchozích operací, které měli přímý vliv na strukturu materiálu [4,8].

Způsoby žihání se dělí podle výšky žihacích teplot na:

- Žihání bez překrytálizace
- Žihání s rekrystalizací



Obr. 30.: Oblast teplot žihání v Fe-Fe<sub>3</sub>C diagramu:

- a) žihání ke snížení pnutí, b) rekrytalizační žihání, c) žihání na měkko,  
d) homogenizační žihání, e) normalizační žihání.

#### 2.4.1 Žihání bez překrytalizace

Během tento druh žihání nám probíhají takové změny, které obvykle nejsou spojeny s přeměnami fází, tedy dochází zde ke změnám strukturních (např. růst zrn, zotavování atd.). Limitní teplota je zde A<sub>1</sub> [4,8].

*Žihání ke snížení vnitřního pnutí* – základem je pozvolný ohřev na teplotu, která se pohybuje mezi 500 až 600 °C, době setrvání na této teplotě 1 až 10 hodin. Tato doba je závislá na velikosti a tvaru součásti. Dle názvu, se tento druh žihání používá jako příprava pro kalení.

*Rekrytalizační žihání* – se provádí za účelem odstranění důsledků tváření za studena, pohybujeme se tedy při rekrytalizačních teplotách, u ocelí je tomu 550 až 700°C podobu

nepřesahující 5 hodin. Dosáhneme tak odstranění deformačních zpevnění a částečně obnovíme také tvárné vlastnosti oceli.

*Žihání na měkko* – se provádí za teplot 680 až 720°C po dobu 4 až 8 hodin. Struktura se nám změní z laminárního perlitu na zrnitý perlit, který má lepší obrobiteľnosť. Hlavním účelem užití je snížení tvrdosti a zlepšení obrobiteľnosti oceli.

*Protivločkové žihání* – je způsob jak zabránit vzniku trhlin v oceli. Pomocí difuzního mechanismu, zde dochází k uvolnění vodíku z materiálu a to za pomalého ochlazování, v časovém intervalu až stovek hodin.

*Žihání pro odstranění křehkosti po moření* - při odstraňování okují z povrchu ocelových součástí mořením dochází k difúzi uvolňovaného vodíku do kovu, což by mohlo vést k následnému zkřehnutí. S ohledem na podmínky moření je difúze vodíku do oceli omezená, takže se tento vodík dá odstranit žiháním při teplotách 300 až 500 °C po dobu 1 až 4 hod.

#### 2.4.1 Žihání s překrystalizací

Při žihání s rekrystalizací dochází buď k úplné nebo k částečné přeměně feriticko-cementické struktury na austenit. Pondeutektoidní oceli se žihají většinou při teplotách nad  $A_3$ , nadeutektoidní oceli za teplot nad  $A_{cm}$  nebo mezi  $A_1$  a  $A_{cm}$ . Účelem tohoto žihání je zejména dosažení úrovně chemické nehomogenity oceli a větší rovnoměrnosti struktury [4,8].

*Normalizační žihání* – jeho účelem je zejména odstranění hrubého zrna, které může vzniknout již u lití nebo při tváření za vysoké teploty. Používá se téměř výhradně pro oceli pondeutoidní a to jak pro odlitky, tak také pro výkovky. Žihací teplota se zde pohybuje mezi 30 až 50 °C nad teplotou  $A_3$  a po čase v intervalu 1 až 4 hodiny. Ochlazování se pak děje přímo na vzduchu.

*Homogenizační žíhání* – dle názvu se používá pro snížení chemické heterogenity, která vzniká během tuhnutí odlitků a ingotů. Tyto rozdíly v chemickém složení se vyrovnávají difuzí, která je ovlivněna teplotou. Proto se teploty volí co možná nejvyšší a to v rozmezí 1100 až 1250°C. Výdrž na teplotě se pohybuje od 5 až o řádově desítky hodin. Proces ochlazování probíhá v pecích.

*Izotermické žíhání* – používá se z důvodu snížení pevnosti a zlepšení obrobitelnosti, zejména legovaných ocelí. Skládá se z austenitizace za teploty těsně nad  $A_3$  nebo  $A_{cm}$ , rychlého ochlazení na teplotu 600 až 700°C proudícím vzduchem. Pro použití je nutná znalost IRA diagramu pro žíhanou ocel.

*Kombinované žíhání* - je způsob cíleného vyžití více druhů žíhání. Zpravidla se používá kombinace normalizačního a bez překrystalizačního žíhání. Vyžívá se pro vysokouhlikové a legované oceli.

## 2.5 Kalení

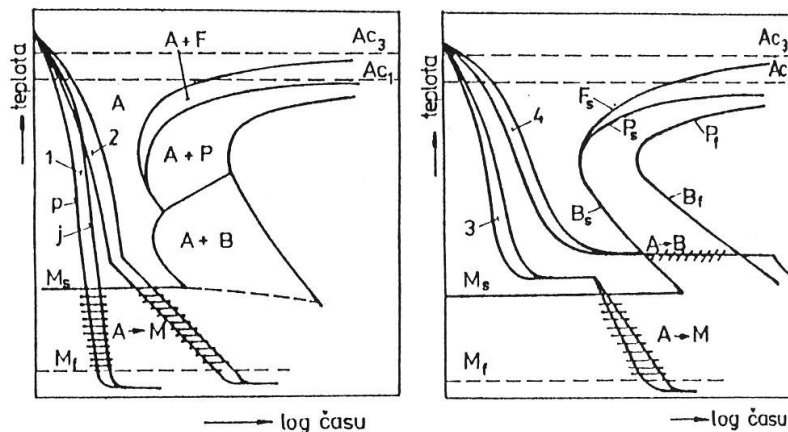
Jedná se o způsob tepelného zpracování, jehož účelem je dosažení nerovnovážného stavu ocelí. Kalením dosahujeme vysoké tvrdosti a zlepšení odolnosti vůči opotřebení [4,8].

Samotný proces kalení se složen ze tří fází:

- *Ohřev oceli na kalicí teplotu*: teplota se volí dle Fe-Fe<sub>3</sub>C diagramu
- *Výdrž na kalicí teplotě*: při této teplotě probíhá austenitizace oceli.
- *Ochlazování nadkritickou rychlostí*: dochází zde k přeměně austenitu na martenzit.

Rozdělení dle strukturních složek je na:

- *Kalení martenzitické*
- *Kalení bainitické*



Obr. 31.: Způsoby kalení do studené lázně

1, přerušované 2, c-termální 3, izotermické zušlechťování 4, p-ochlazování povrchu, j-ochlazování jádra/

### 2.5.1 Martenzitické kalení

Používá se za účelem získání vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Během rychlého ochlazování nedochází k difuznímu rozpadu austenitu, protože nedojde k protnutí křivky rozpadu. Interval kalicích teplot je  $30^{\circ}\text{C}$  až  $50^{\circ}\text{C}$  nad  $A_{3,u}$  u podeutektoidních a  $30^{\circ}\text{C}$  až  $50^{\circ}\text{C}$  nad  $A_1$  u nadeutektoidních ocelí. Po skončení kalení je pak výsledná podeutektoidní struktura tvořena martenzitem a zbytkovým austenitem. Naproti tomu u nadeutektoidních ocelí pak strukturu tvoří martenzit, austenit a nerozpustný sekundární cementit. Pro příklad kalení nadeutektoidních ocelí z teplot nad  $A_{cm}$  by došlo k rozpuštění sekundárního cementitu do austenitu a protože rostoucí množství uhlíku rozpuštěného v austenitu způsobuje pokles teploty  $M_s$  a  $M_f$ , zvýšilo by se množství zbytkového austenitu ve struktuře [4,8].

*Kalení do studené lázně* – jedná se nejjednodušší příklad kalení, které se provádí ve vodě, oleji nebo vzduchu. Představuje tedy snadný způsob, vyznačující se nenáročností technologickou a ekonomickou. Nevýhodou je pak velká míra vnitřního pnutí a z toho plynoucí deformace, které mohou vyústit až trhlinami materiálu.

*Přerušované kalení* – během jeho průběhu dojde nejprve k potlačení perlitické přeměny a to rychlejším ochlazováním a následně dokončení martenzitické přeměny v mírnějším ochlazovacím prostředí. Dosáhneme tak zmenšením tepelných a strukturních pnutí. Tohoto

způsobu kalení se používá u uhlíkových a nízkolegovaných ocelí, jenž se kalí nejprve ve vodních a následně v olejových lázních.

*Termální kalení* – nám dovoluje výrazně snížit rozdíl teplot mezi povrchem a vnitřních částí kaleného předmětu a to za použití tepelné prodlevy těsně nad teplotou  $M_s$ . Po dosažení austenitizace se součást ochlazuje v olejové nebo solné lázni. Použití tohoto kalení najdeme u legovaných ocelí, tenkostěnných a tvarově složitých nízkolegovaných ocelí.

*Kalení se zmrazováním* – cílem je odstranění zbytkového austenitu a zvýšení množství martenzitu ve výsledné struktuře. Toho dosáhneme změnou prostředí hluboko pod bodem mrazu v oblasti teplot až  $-196^\circ\text{C}$  a to pokud možno v co nejkratší době. Tímto kalením se vyrábí tvarově přesné nástroje a strojní součásti.

*Povrchové kalení* - jedná se o zvláštní způsob, kdy dochází zakalení pouze povrchu součásti s podmínkou zachování původní struktury pro zbytek součásti. Jeho výhodou je povrchová tvrdost při vysoké houževnatosti jádra součásti. Používá se tedy pro namáhané součásti, u nichž je vyžadována odolnost vůči opotřebení a dynamickému namáhání.

### 2.5.2 Baitické kalení

Během bairického kalení se dosáhne transformace austenitu na bainit buď během plynulého ochlazování nebo při konstantní teplotě. Používá se pro nízko nebo středně legované oceli a součásti menším nebo středních průřezů.

*Izotermické zušlechťování* – získáváme požadované mechanické vlastnosti bez nutnosti popouštění. Austenitizovaná součást se rychle ochladí na teplotu izotermické přeměny v bairické oblasti (teplota  $300$  až  $400^\circ\text{C}$ ). Na této teplotě se udržuje do konce přeměny austenitu na bainit. Následné ochlazení se dokončí na klidném vzduchu.

*Izotermické kalení* – používá se u ocelí s nižším obsahem uhlíku, kde je možné snížit teplotu izotermické přeměny až pod  $M_s$ . Dojde k vytvoření směsi bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu.

## 2.6 Popouštění

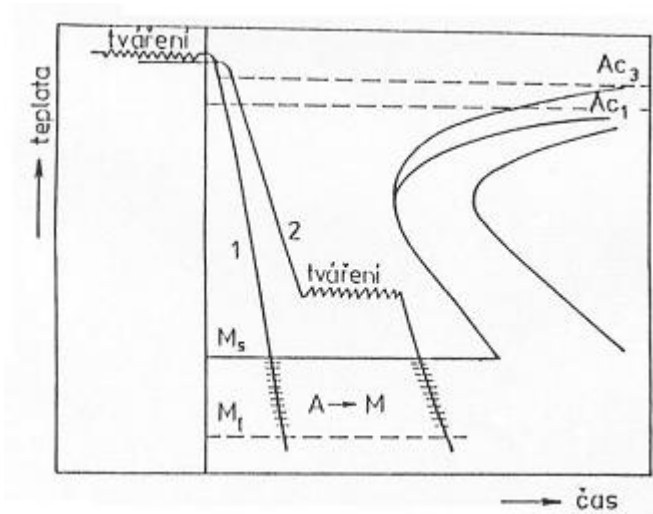
Je tepelné zpracování, které následuje hned po kalení, za účelem dosažení stavu blízcího se rovnovážnému stavu oceli. Zabraňuje nám také vnitřnímu pnutí, které vzniká při kalení. Rozsah změn struktury během popouštění nám závisí na teplotě a době popouštění [4,8].

Skládá se z fází:

- *Ohřev na popouštěcí teplotu* – teplota je nižší než  $A_1$
- *Výdrž na popouštěcí teplotě*
- *Ochlazení vhodnou rychlostí*

Podle výšky popouštěcích teplot rozlišujeme :

- *Popouštění při nízkých teplotách*
- *Popouštění při vyšších teplotách*



Obr. 32.: Schéma průběhu tepelně mechanického zpracování:  
1- vysokoteplotního, 2- nízkoteplotního.

### 2.6.1 Popouštění při nízkých teplotách

Teploty se pohybují v rozsahu 100 až 300°C. A účelem je snížit vnitřní pnutí, zmenšit podíl zbytkového austenitu, zlepšit houževnatost a to při zachování vysoké tvrdosti. Používá se zejména u nástrojových ocelí. U konstrukčních ocelí je však tento způsob méně častý a užívá se například u valivých ložisek nebo cementovaných a povrchově kalených součástí. Používá se prostředí vroucí vody, olejových lázní, solných lázní nebo elektrických pecí.

### 2.6.2 Popouštění při vyšších teplotách

Interval popouštěcích teplot se nachází v rozmezí 400 až 650°C, jsou-li požadovány vysoké pevnosti a současně zachování plasticity a houževnatosti oceli. U legovaných ocelí karbidovými prvky se teplota nachází nad 550°C. Nad touto teplotou dojde k rozpouštění karbidotvorných prvků v cementitu nebo ke vzniku zvláštních karbidů jako,  $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{V}_4\text{C}_3$  aj. Při zvyšování popouštěcí teploty nám však také klesá tvrdost, pevnost, mez kluzu a zvětšuje se houževnatost a plasticita. Pro velikost teplot 250 až 400°C u legovaných ocelí nám dochází ke křehnutí. Jeho příčinou jsou změny v hranici austenitických zrn, ve kterých dochází ke vzniku karbidů.



### 3 ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI

Tvrdot lze definovat jako odpor materiálu, který vzniká proti vnikanému tělesu do něj. Mírou tvrdosti je konkrétní velikost plastické deformace. V technické praxi se významně uplatňuje pro její jednoduchost, opakovatelnost. Další výhodou představuje to, že v mnoha případech lze měření provádět buď přímo na výrobku a jeho polotovarech, nebo na zkušebních tělesech vyrobených a určených pro jiné druhy mechanických zkoušek.

Obecně se dají zkoušky rozdělit podle principu a to na vrypové, vnikající a odrazové. Dle toho, jak nám působí síly zátěžové, známe zkoušky statické, dynamické a cyklické. Dle velikosti pozorování pak známe makroskopické a mikroskopické, tedy makro a mikrotvrdost.

Nejpoužívanějším druhem jsou z hlediska působení zkoušky statické, které by se daly popsat vtlačováním tělesa do materiálu a následně stanovení tvrdosti podle obtisku a jeho charakteristických rozměrů, které v něm zanechá. Statické zkoušky můžeme rozdělit podle tvaru zkoušeného tělesa. Nejčastěji používané jsou zkoušky dle Brinella, Rockwella, Vickerse a Knoopu.

Výsledná tvrdost, kterou dostaneme po těchto zkouškách, nejde charakterizovat pouze jednoznačnými fyzikálními veličinami, protože výsledek závisí na velikosti elastických vlastnostech a to zejména pružnosti materiálů v tahu a ve smyku, dále na plastických vlastnostech, meze kluzu a charakteru deformačního zpevnění a nakonec na velikosti působící síly.

Tvrdot materiálu též závisí na velikosti zrna, jemnozrné materiály mají daleko vyšší hodnoty tvrdosti v důsledku vyššího odporu zrn vůči vnikajícímu tělesu do zkoušeného materiálu. Dalším faktorem může být také teplota, která má vliv na roztažnost, tedy na pevnosti vazeb mezi atomy nebo též množství cizích příměsí, případně také velikost vnitřního pnutí [5,8,9].

#### 3.1 Mikrotvrdost

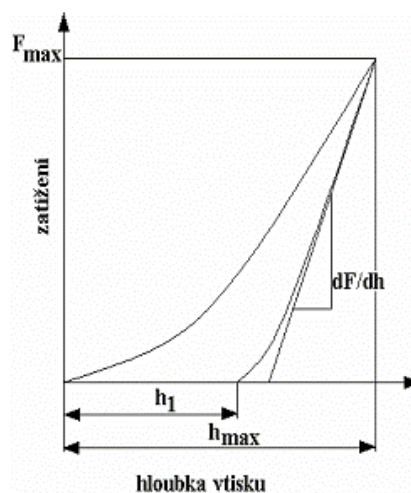
V těchto případech použijeme jako vtlačované těleso diamantový jehlan tvaru Vickerse nebo Knoopu. Hodnoty zatěžovaných sil pro tyto případy se pohybují v intervalu 1g až 1000g. Jestliže nám tedy tyto síly klesají dohází ke změně velikosti vtisku a přesnost měření nám klesá. Použití mikrotvrdosti je vhodné pro malé nebo tenké součásti, měř mě-

ření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkušební vzorku, měření mikrotvrdosti strukturálních složek a fází, hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování atd.

### 3.2 Nanotvrdost

Pokud, dostatečným způsobem snížíme zátěžové síly, dostaneme se do oblasti nanotvrdosti. Zde se velikost měření provádí pomocí získání závislosti velikosti působícího zatížení na hloubce vtisku. Tyto zatížení jsou velmi malá a klesají až na velikost 1nN a hloubky vtisku se pohybují v hodnotách 0,1 nm. Záznam již zmíněné závislosti je využíván při měření velmi tenkých vrstev, povlaků, filmů, a také strukturálních složek ve slitinách. V řadě případů je získaný záznam využíván k měření dalších mechanických veličin, např. základních mechanických vlastností včetně modulu pružnosti v tahu, lomové houževnatosti křehkých materiálů atd.

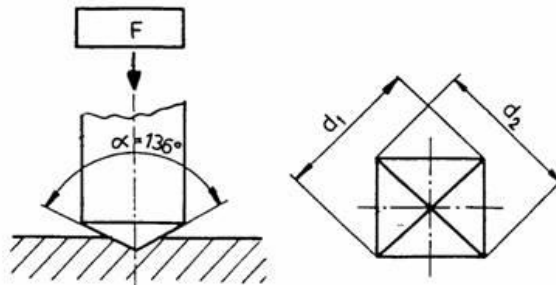
Při měření nanotvrdosti se využívá řada tělísek vyrobených z různých materiálů, nejčastěji se užívá diamantu pro jeho tvrdost a vysoký pružný modul. Nejčastěji se využívá trojbokého jehlanu, v němž je zachován poměr hloubky a plochy vtisku. Jeho výhodou je oproti Vickrse možnost broušení špičky, jehož délka hrotu může být 0,5 mikronů, případně se může vybrousit do bodu. Dalším způsobem je použití kuličky, která má proti předchozímu jehlanu výhodu v nárůstu zatížení nejprve v rozsahu plastické deformace. Je zde tedy možnost identifikace přechodu od elastické k plastické deformaci a tedy určení meze kluzu. Výroba kulového indentoru je však náročná, proto se používá spíše trojbokého jehlanu [9].



Obr. 33.: Zobrazení závislosti síly a deformace při nanotvrdosti

### 3.3 Vickersova metoda

Podstatou zkoušky je diamantové vnikající těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a daným vrcholovým úhlem  $126^\circ$  mezi protilehlými stěnami je vtlačováno do povrchu zkušební tělesa. Následně je odměřena úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení zkušební tělesa (obr. 34). Následně vyjádříme poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku.



Obr. 34.: Princip vickersovy metody

Veškeré zkoušky tvrdosti jsou předepsány normou. Vickersova metoda je dána evropskou normou ČSN EN ISO 6507-1 a její způsob použití má tři různé případy (viz tabulka). Pro její měření používáme zátěž, která je daná v kilogramech a zatěžující sílu danou v newtonech. Pro zkoušené tělísko nebo vrstva musí mít minimálně splňovat hodnotu 1,5 násobku délky úhlopříčky vtisku [9].

Oblast zkušebního zatížení, $F$ N	Symbol tvrdosti	Předchozí označení (ISO 6507-1:1982)
$F \geq 49,03$	$\geq \text{HV } 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až $< \text{HV } 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až $< \text{HV } 0,2$	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Tab. 1.: Hodnoty zkušebního zatížení dle Vickerse

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

Kde  $d$  je aritmetický průměr dvou délek úhlopříček  $d_1, d_2$  v mm (obr. 34)

$F$  je zkušební zatížení v newtonech

$0,102$  je konstanta  $9,80662^{-1}$

### 3.3.1 Označení tvrdosti

Tvrdot podle Vickerse se označuje symbolem HV, za nímž následuje číslice charakterizující velikost zkušebního zatížení a doba působení zkušebního zatížení v sekundách, liší-li se od předepsané doby 10 až 15s. Například zápis 640 HV 30 tvrdost Vickerse při zatížení 294,2 N po dobu zatížení 10 až 15 s. Zápis 640 HV 30/20 znamená, že doba potřebná pro zkoušku je 20 s.

### 3.3.2 Průběh zkoušky

Zkušební těleso musí být uloženo na tuhé podložce, tak aby se během zkoušky nepohnulo. Vnikající těleso (indentor) se zatlačuje do zkušebního tělesa zkušebním zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu (tab. 2). Doba od počátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí být menší než 2 s a větší než 8 s. Tato doba nesmí u zkoušky u tvrdosti při nízkém zatížení a zkoušky mikrotvrdosti nesmí překročit 10 s a současně nesmí rychlost zatěžování překročit 0,2 mm/s. Doba plného zkušebního zatížení musí být v rozmezí 10 až 15 s.

Jednotlivé vtisky musí být umístěné tak aby byla splněna podmínka, že vzdálenost středů dvou sousedních vtisků musí být nejméně 3násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku (pro ocel, měď a slitiny mědi) a nejméně 6násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. Vzdálenosti středů každého vtisku od okraje zkušebního vzorku musí být nejméně 2,5násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku (pro ocel, měď a slitiny mědi) a nejméně 3násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin.

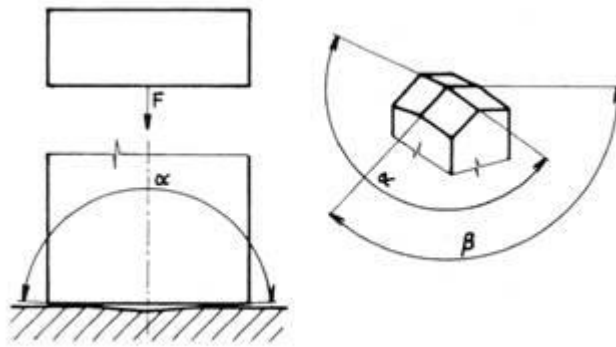
Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2942
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

Tab. 2.: Hodnoty zkušebního zatížení dle Vickerse

### 3.4 Metoda knoop

Podstatou zkoušky je diamantové vnikající těleso ve tvaru jehlanu s kosočtverečnou základnou s předepsanými úhly protilehlých stran vtlačováno do povrchu zkušebního tělesa. Následně je měřena delší úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení zkušebního zatížení  $F$  (obr. 1). Zkouška tvrdosti dle Knoopa pro kovové materiály je předepsána mezinárodní normou ČSN ISO 4545, a zahrnuje zkušební zatížení do 9,807 N včetně [9].

Tvrdot je zde následně vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku, jenž se uvažuje jako jehlan s kosočtverečnou základnou a s vrcholovými úhly rovnající se úhlům vnikajícího tělesa:



Obr. 35.: Princip metody Knoop

$$HK = 0,102 \cdot \frac{F}{d^2 \cdot c} = 0,102 \cdot \frac{F}{0,07028 \cdot d^2} = 1,451 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Kde  $d$  je aritmetický průměr dvou délek úhlopříček  $d_1, d_2$  v mm (obr. 35)

$F$  je zkušební zatížení v newtonech

$c$  je vnikající konstanta ( $c = 0,07028$ )

$0,102$  je konstanta  $9,80662^{-1}$

### 3.4.1 Označení tvrdosti

Tvrdość dle Knoop se označuje symbolem HK, za nímž následuje číslice charakterizující velikost zkušebního zatížení a doba působení zkušebního zatížení v sekundách, liší-li se od předepsané doby 10 až 15 s. Rozdíl mezi popisy je analogický s Vickersovou metodou hodnocení.

### 3.4.1 Průběh zkoušky

Těleso, které zkoušíme, musí být umístěno nehybně na tuhé podložce. Do zkoušeného tělesa nám vniká indetektor a zatlačuje se do něj. Zatěžující síla je daná dle tabulky a směřuje kolmo na jeho povrch. Doba, po kterou je těleso zatíženo nesmí překročit 10 s a rychlost indetektoru se musí pohybovat v rozmezí 10 až 15 s.

Jednotlivé vtisky indektoru musí splňovat podmínku vzdálenosti středů dvou vtisků a její hodnota musí být rovna nejméně trojnásobku kratší úhlopříčky vtisku (platí u oceli, mědi a jejich slitin) nebo nejméně 6násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. Vzdálenost středů každého vtisku od okraje zkušební vzorku pak musí být 2,5násobek kratší úhlopříčky vtisku (pro ocel, měď a slitiny mědi) a nejméně 3násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin [9].

<b>Zkouška tvrdosti dle Knoop</b>	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HK 0,01	0,09807
HK 0,02	0,1961
HK 0,025	0,2452
HK 0,05	0,4903
HK0,1	0,9807
HK 0,2	1,961
HK 0,3	2,942
HK 0,5	4,903
HK 1	9,807

*Tab. 3.: Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti dle Knoop*

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 4 PRAKTICKÁ ČÁST

### 4.1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo měření mikrotvrdosti u vybraných typů kovových materiálů, které byly tepelně nebo chemicko-tepelně zpracovány, popřípadě byly ve stavu tepelně nezpracovaném. Měření mikrotvrdosti bylo realizováno na mikrotvrdoměru Affri DM – 2D, v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství FT UTB ve Zlíně.

### 4.2 Metodika práce

#### 4.2.1 Navržené zkušební tělesa

Navrženo bylo devět kusů zkušebních těles tepelně a chemicko-tepelně zpracovaných ocelí ČSN 411353, ČSN 412060 a ČSN 414220. Navržená zkušební tělesa byla očíslována a následně vybroušena a leštěna (tab. 4). U připravených zkušebních těles byly následně měřeny hodnoty mikrotvrdosti na 10 místech rovnoměrně rozložených po ploše zkušebních těles. Měření bylo prováděno vždy při zatížení 10g, 25g a 50g a počet měření byl 10.

Tab. 4.: Materiály pro zkušební tělesa

Číslo vzorku	Oceli dle ČSN	Druh zpracování
1.	41 1353	Cementováno
2.	41 2060.0	Nezpracováno
3.	41 2060.6	Zušlechťeno
4.	41 2060.4	Popouštěno, kaleno
5.	41 4220.0	Nezpracováno
6.	41 4220	Cementováno
7.	41 4220	Nitridováno
8.	41 4220.4	Kaleno
9.	41 4220.6	Zušlechťeno

#### 4.2.2 Zkušební zařízení pro měření mikrotvrdosti

**Digitální mikrotvrdoměr AFFRI DM2D (Obr. 36.)**

*Tab. 5.: Parametry mikrotvrdoměru AFFRI DM2D*

Zkušební zařízení vyhovuje požadavkům	ISO 6507-2
Metoda zatěžování	Automatické zatěžování, uvolnění zkušebního zatížení
Změna čočky objektivu	Automatická
Digitální okulár	Ručně ovládané zaostřování rýhy
Vnitřní rozlišení digitálního okuláru	0,1 $\mu$ m
Rozlišení digitálního displeje:	0,03 $\mu$ m
Zvětšení čočky objektivu pro měření	40x
Zvětšení čočky objektivu pro pozorování	10x
Digitální zvětšení	až 600x
Postup pro měření vtisku	Ruční otáčení měřicího okuláru
Stůl pro vzorky	110x110mm
Maximální zkušební síla	1kg
Maximální výška vzorku	90mm
Celkové rozměry	490x250x395mm (výška x šířka x hloubka)
Hmotnost	40kg
Pracovní prostředí PC	software MICRONESS firmy TSI system

#### Zkušební laboratoř

Experimentální část byla realizována v laboratořích ústavu výrobního inženýrství FT UTB ve Zlíně.



Obr. 36.: Digitální mikrotvrdoměr AFFRI DM2D

## 4.3 Tepelné a chemicko-tepelné zpracování zkušních těles

### 4.3.1 Cementování

Cementování je nasycování povrchu nízkouhlíkové oceli uhlíkem a následné zakalení. Při tomto procesu dochází k vytváření vrstvy obohacené o uhlík až na eutektoidní nebo mírně nadeutektoidní koncentraci. Podle druhu prostředí, z něhož difunduje uhlík do oceli, rozlišujeme 3 způsoby cementování (v tuhém prostředí, v tekutém prostředí, v plynném prostředí). Již nacementovaná součást získá teprve po zakalení v povrchové vrstvě tetragonální martenzit o vysoké tvrdosti, který se popouštěním (na 200°C) transformuje na kubický martenzit. Výsledný povrch materiálu je tvrdý a odolný vůči opotřebení při zachování houževnatosti základního materiálu pod touto vrstvou. Cementuje se nad teplotou  $A_{C3}$  (850° - 950°). Tvrdost vrstvy dosahuje 50 až 60HRC. Kalení se provádí buď z přímo cementační teploty, jednoduchým kalením po novém ohřevu nebo dvojitým kalením (zjemnění zrna).[2]

### 4.3.2 Nitridování

Při nitridaci dochází k sycení povrchu oceli dusíkem v plynném nebo kapalném prostředí. Povrch je tvořen velice tvrdými nitridy legujících prvků. Nitridace se provádí při teplotě 500-600°C. Ke zlepšení nitridační vrstvy se používají speciální oceli obsahující hliník, jehož nitridy hliníku nejsou tak křehké, jako nitridy železa a legujících prvků. [2]

### 4.3.3 Karbonitridace

Během karbonitridaci dochází k obohacování povrchové vrstvy dusíkem a v malých množstvích uhlíkem. Je to chemicko-tepelné zpracování pro zlepšení odolnosti proti opotřebení a trvalé pevnosti. Při použití následné intenzivní oxidační ochlazovací lázně se dosáhne černého vzhledu a zlepšení korozní odolnosti a odolnosti proti opotřebení. Existují dvě odlišné technologie pro karbonitridaci: Tenifer a Arcor. [2]

### 4.3.4 Povrchové kalení

Povrchové kalení se provádí tak, že se materiál rychle ohřeje na kalící teplotu (u tohoto vzorku to je 930°C) a ihned se ochladí proudem vodní sprchy. Jelikož, je ohřev součásti je rychlý, nestačí se součást ohřát v celém průřezu, ale pouze na povrchu. V jádru tak nedochází k překrystalizaci a zůstává měkké a houževnaté. Zakalená vrstva je tenká (1 – 3 mm, podle velikosti součásti) a její struktura je tvořena martenzitem a zbytkovým austenitem. Po zakalení mohou v součásti vznikat značná pnutí, proto se po kalení provádí popouštění za nízkých teplot (160°C).[2]

### 4.3.5 Zušlechťení

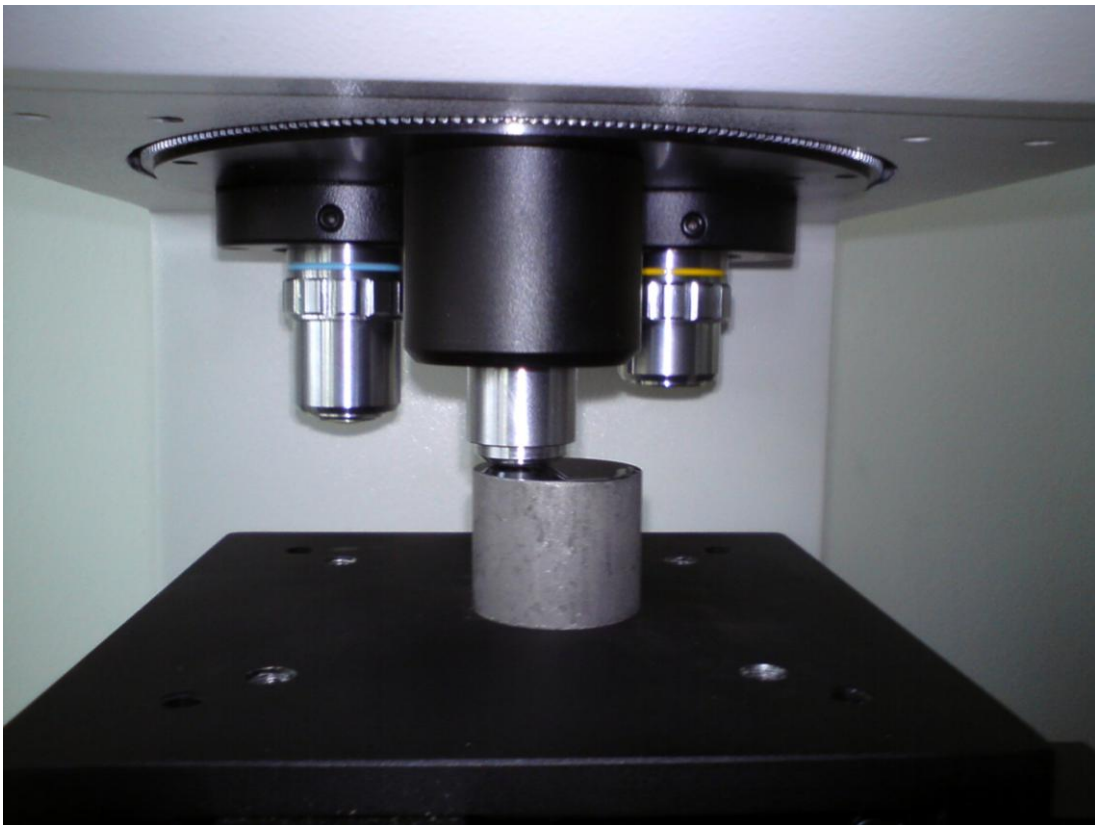
Zušlechťování oceli je martenzitické kalení s následujícím popouštěním na teplotu 350 až 650°C, při nichž se původní martenzit rozpadá na tzv. přechodové struktury – troostit (směs perlitu a martenzitu), osmondit, sorbit, což je velmi jemný perlit a ferit. Je to velmi časté tepelné zpracování součástí (např. hřídelí, čepy, ozubená kola). Rozpad austenitu popisují transformační diagramy IRA a ARA. [2]

#### 4.4 Postup přípravy zkušebních těles a provedení zkoušky

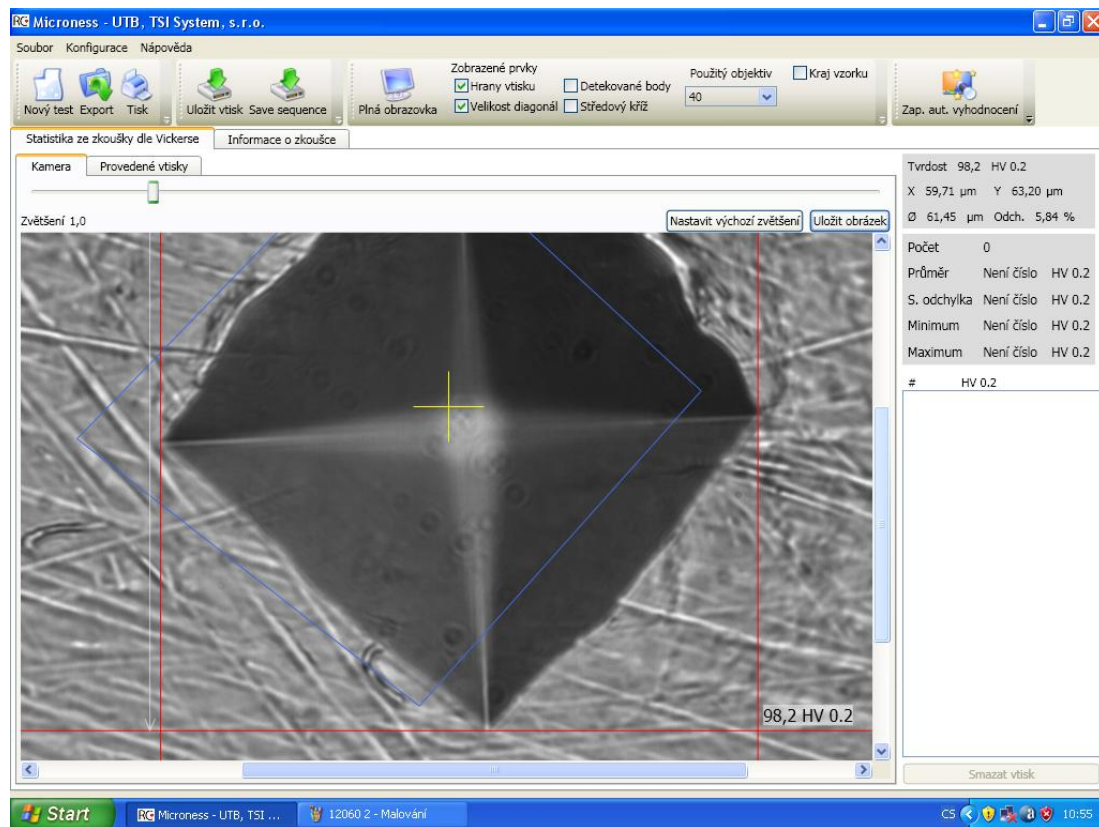
- 1) Vybrané typy kovových materiálu byly připraveny ve tvaru zkušebních těles na brusce MTH (Obr. 37) při postupném užití brusných archů o drsnosti HR600, HR800, HR1200 a HR2000.
- 2) Vyleštěné zkušební tělesa byla pečlivě osušena a opatřena konzervačním prostředkem, za účelem zabránění koroze.
- 3) Na počítači, který je propojen s mikrotvrdoměrem (Obr. 36) byly nastaveny vstupní parametry (typ zkušební metody, měřící zatížení, velikost zvětšení mikroskopu).
- 4) Ručně byla nastavena vzdálenost mezi okulárem mikroskopu a povrchem vzorku (zabránění kontaktu vzorku a poškození stroje).
- 5) Aby byl vtisk po provedení zkoušky mikrotvrdosti velmi dobře čitelný a výsledky měření byly dle platné normy bylo provedeno zaostření povrchu zkušebního tělesa.
- 6) Došlo ke kontrole zda, nominální hodnota zátěže v softwarovém vybavení odpovídá stejné hodnotě zátěže nastavené na měřícím stroji.
- 7) Byla provedena zkouška mikrotvrdosti, kdy doba zátěže byla nastavena na 15 vteřin (Obr. 38).
- 8) Nyní došlo na doostření a automatické vyhodnocení dle softwaru pracujícího s mikrotvrdoměrem.
- 9) V případě, že software chybně vyhodnotil vtisk, byla hodnota získána vizuálním nastavením konců úhlopříček vtisku (Obr. 39).
- 10) Jednotlivé hodnoty byly zapsány a pořízena fotografická dokumentace.



*Obr. 37.: Metalografická bruska MTH*



*Obr. 38.: Průběh zkoušky na mikrotvrdoměru*



Obr.

39.: Vyhodnocování mikrotvrlosti v softwaru MICRONESS

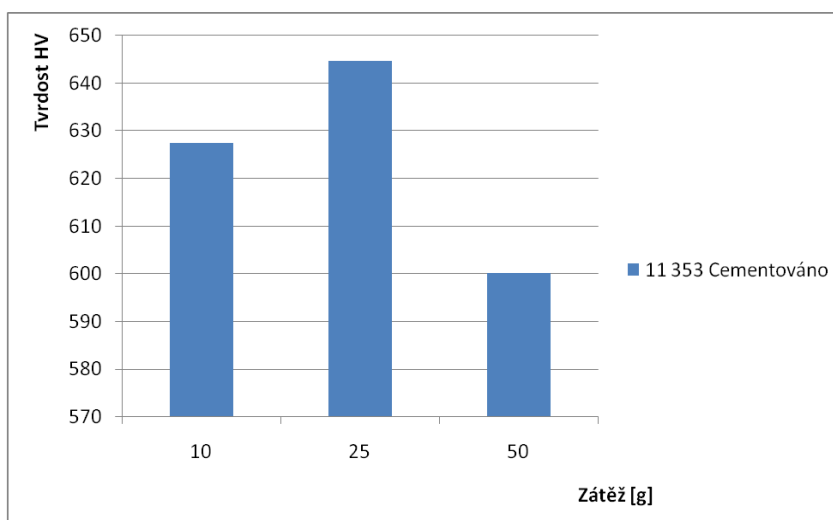
## 5 MIKROTVRDOST ZKUŠEBNÍCH TĚLES

### 5.1 Ocel 11 353 cementována

Materiál 11 353 představuje konstrukční ocel obvyklé jakosti s nezaručeným chemickým složením avšak uvedenou maximální hodnotou obsahu uhlíku, fosforu, síry (C= max. 0,18 %, P= max. 0,05 %, S= max. 0,05 %, P+S = max. 0,09 %). Její přibližná hodnota pevnosti v tahu je 330 MPa. Použití je hlavně v oblasti výroby bezešvých trubek, trubkových konstrukcí staticky namáhaných součástí, potrubích pro vedení oleje, vzduchu, páry nebo plynu. Tuhnutí probíhá v metastabilním  $Fe_3C$  diagramu podeutektoidních ocelí a výslednou strukturou pro maximální hodnotu uhlíku je kombinace feritu a perlitu, tedy feritu, perlitu a terciálního cementitu.

Tab. 6.: Naměřené hodnoty vzorku cementovaného materiálu 11 353

Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV
10	622,4	25	654,8	50	610,1
10	622,8	25	635,4	50	596,4
10	638,4	25	638,6	50	598,4
10	623,7	25	644,4	50	595,6
10	629,9	25	649,5	50	650,8
<b>Arit. průměr</b>	627,44	<b>Arit. průměr</b>	644,54	<b>Arit. průměr</b>	600,13
<b>Směr. odchylka</b>	6,83	<b>Směr. odchylka</b>	7,88	<b>Směr. odchylka</b>	6,75
<b>Nejistota měření</b>	4,28	<b>Nejistota měření</b>	4,93	<b>Nejistota měření</b>	5,13



Obr. 40.: Porovnání hodnot mikrotvrdości cementovaného materiálu 11 353



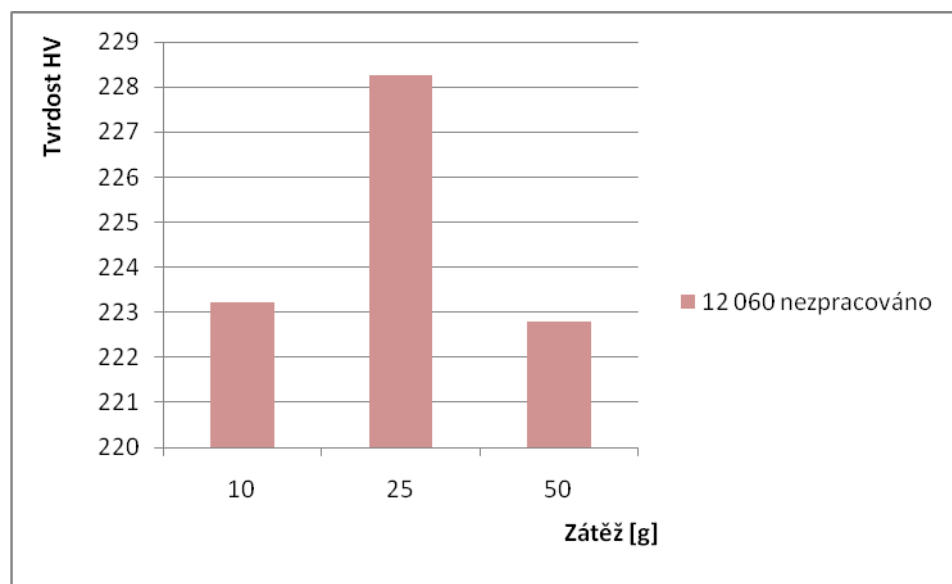
Z výsledků měření je patrné, že nejvyšší hodnota mikrotvrdosti byla u oceli 11 353 naměřena při zatížení 25g a to 644,54HV. Nejmenší hodnoty byla naměřena při zatížení 50g a to 600,1HV (Tab.6, Obr. 40.).

## 5.2 Ocel 12 060 základní materiál (nezpracována)

Materiál ČSN-EN-412060 představuje konstrukční uhlíkovou ocel legovanou s nezaručenými vlastnosti ale intervaly hodnot uhlíku, manganu, křemíku, chromu, niklu a mědi (C= 0,52 až 0,6 %, Mn= 0,5 až 0,8 %, Si= 0,17 až 0,37 %, Cr= až 0,25 %, Ni= až 0,3 %, Cu= 0,3 %). Teplotní hodnoty přeměn v metastabilním Fe<sub>3</sub>C diagramu jsou A<sub>c1</sub> = 715°C, A<sub>c3</sub>= 755°C ,A<sub>r3</sub>= 690°C a A<sub>r1</sub>= 670°C. Jedná se o ocel doporučenou pro zušlechťení. Použití tohoto materiálu je na výrobu turbokompresorů, hřídelí, ozubených kol, vřeten, spojek, lamel, šrouby nebo jiné spojovací části. V metastabilním Fe<sub>3</sub>C diagramu je při svém obsahu uhlíku v podeutektoidních ocelí a výslednou strukturou pro maximální hodnotu uhlíku je kombinace feritu a perlitu, tedy feritu, perlitu a terciálního cementitu.

Tab. 7.: Naměřené hodnoty vzorku nezpracovaného materiálu 12 060

Hodnoty zátěže [g]	Tvrdost HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdost HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdost HV
10	226	25	168	50	208,8
10	221,3	25	211,6	50	236,2
10	213,1	25	242,1	50	219,2
10	237	25	240,2	50	227,5
10	218,7	25	219,1	50	222,2
<b>Arit. průměr</b>	223,22	<b>Arit. průměr</b>	228,25	<b>Arit. průměr</b>	222,78
<b>Směr. odchylka</b>	9	<b>Směr. odchylka</b>	15,23	<b>Směr. odchylka</b>	10,13
<b>Nejistota měření</b>	5,67	<b>Nejistota měření</b>	11,58	<b>Nejistota měření</b>	6,35



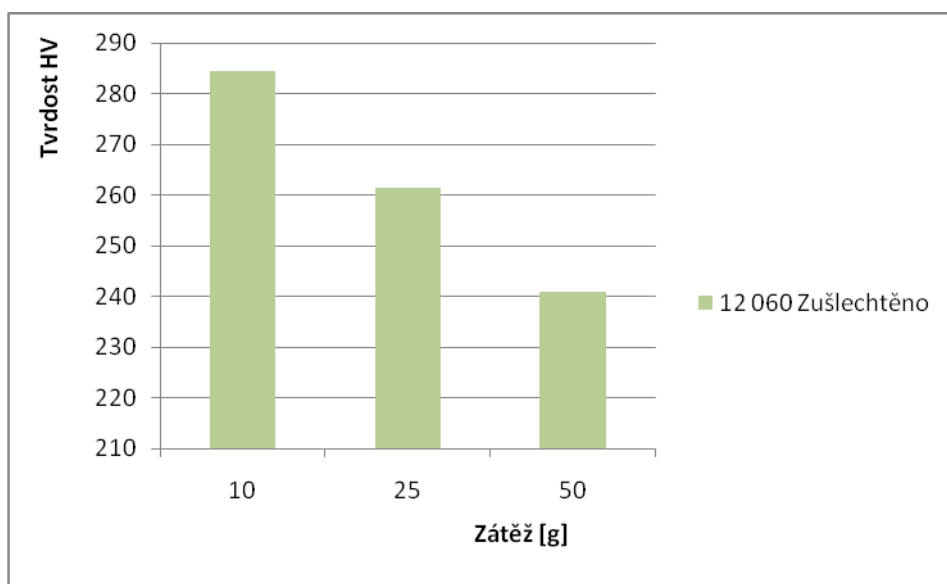
Obr. 41.: Porovnání hodnot mikrotvrdości nezpracovaného materiálu 12 060

Z výsledků měření pro materiál 12 060 nezpracovaný vyplývá, že nejvyšší hodnota mikrotvrdości byla zjištěna při zatížení 25g a to 228,25HV, zatímco nejmenší naměřená hodnota činila 222,78 HV při zatížení 50g (Tab.7, Obr. 41).

### 5.3 Ocel 12 060 zušlechtěna

Tab. 8.: Naměřené hodnoty vzorku zušlechtěného materiálu 12 060

Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV
10	290	25	254,1	50	218,8
10	266,7	25	264,4	50	236,2
10	297,5	25	257,6	50	245
10	271,2	25	267,5	50	243,5
10	296,7	25	263,1	50	238,9
Arit. průměr	284,42	Arit. průměr	261,34	Arit. průměr	240,9
Směr. odchylka	14,5	Směr. odchylka	5,4	Směr. odchylka	4,07
Nejistota měření	9,08	Nejistota měření	3,38	Nejistota měření	3,09



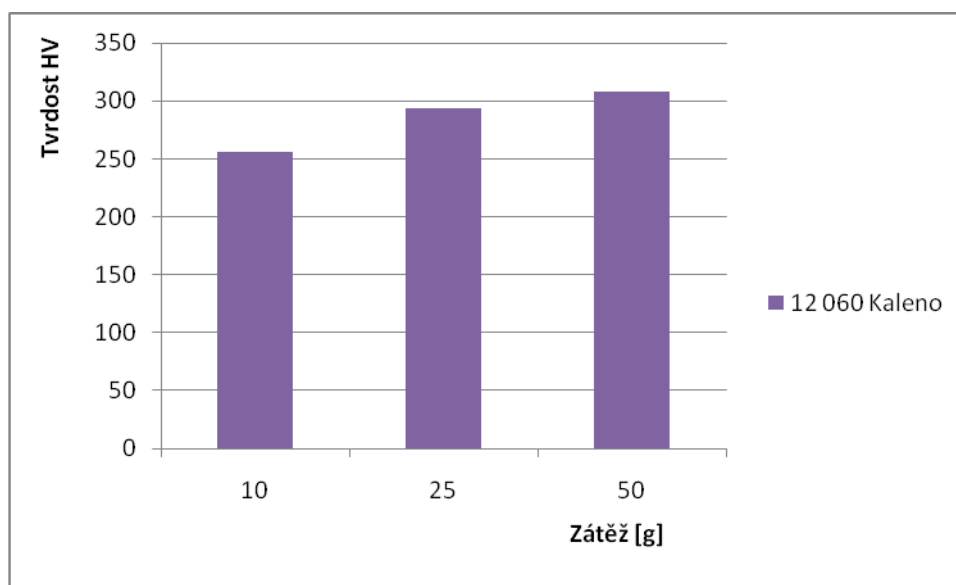
Obr. 42.: Porovnání hodnot mikrotvrdości zušlechtěného materiálu 12 060

Z naměřených výsledků vyplývá, že nejvyšší naměřená hodnota mikrotvrdości 284,42HV byla naměřena při zatížení 10g. Naopak nejmenší naměřená hodnota mikrotvrdości byla změřena při zatížení 50g a to 240,9 HV (Tab. 8, Obr. 42).

## 5.4 Ocel 12 060 kalena

Tab. 9.: Naměřené hodnoty vzorku kaleného materiálu 12 060

Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV
10	249,4	25	249	50	305
10	254,1	25	250,1	50	298,5
10	257,3	25	328	50	300,1
10	255,5	25	359	50	315,5
10	261,6	25	284	50	321,2
Arit. průměr	255,58	Arit. průměr	294,02	Arit. průměr	308,06
Směr. odchylka	4,46	Směr. odchylka	48,56	Směr. odchylka	9,9
Nejistota měření	2,79	Nejistota měření	30,4	Nejistota měření	6,2



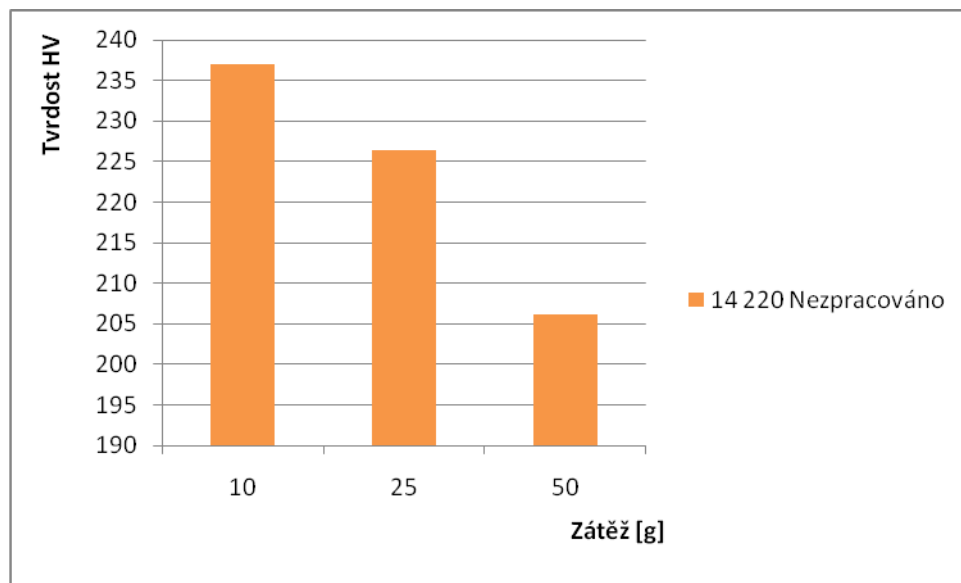
Obr. 43.: Porovnání hodnot mikrotvrdości kaleného materiálu 12 060

Nejvyšší naměřená hodnota mikrotvrdości pro kalenou ocel 12060 byla 308,06HV při zatížení 50g. Nejmenší hodnota byla naopak naměřena při zatížení 10g a to 255,58 HV (Tab. 9, Obr. 43).

## 5.5 Ocel 14 220 základní materiál (nezpracována)

Tab. 10.: Naměřené hodnoty vzorku nezpracovaného materiálu 14220

Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV
10	235,1	25	290,9	50	203,9
10	263,3	25	218,7	50	194,8
10	237	25	229	50	196,4
10	215,8	25	233,5	50	197,9
10	234,1	25	224,6	50	237,9
Arit. průměr	237,06	Arit. průměr	226,45	Arit. průměr	206,18
Směr. odchylka	16,98	Směr. odchylka	6,32	Směr. odchylka	18,06
Nejistota měření	10,63	Nejistota měření	4,8	Nejistota měření	11,31



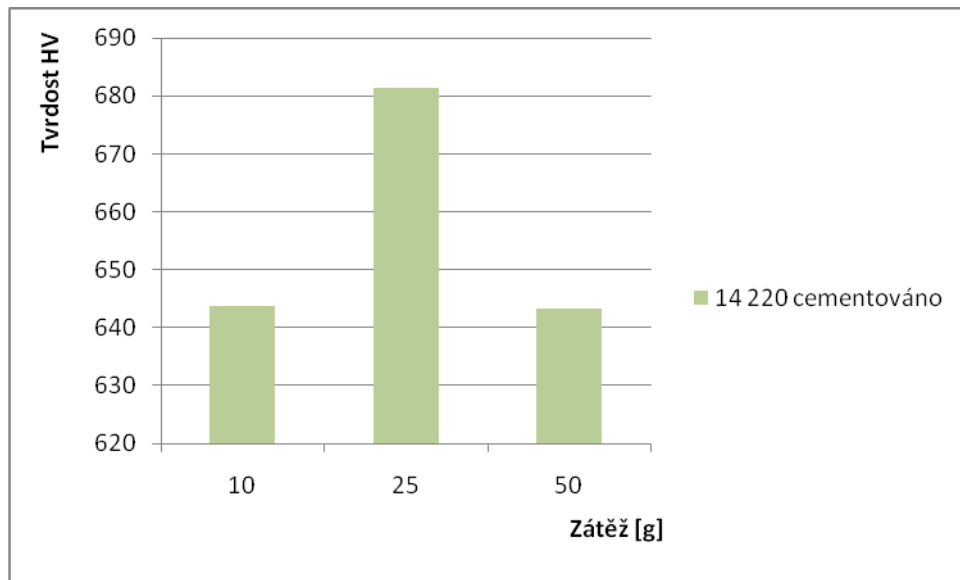
Obr. 44.: Porovnání hodnot mikrotvrdości nezpracovaného materiálu 14 220

Nejvyšší hodnota mikrotvrdości u materiálu 14220 byla naměřena při zatížení 10g a to 237,06HV, zatímco nejmenší hodnota byla dosažena při zatížení 50g v podobě 206,8HV (Tab. 10, Obr. 44).

## 5.6 Ocel 14 220 cementována

Tab. 11.: Naměřené hodnoty vzorku cementovaného materiálu 14220

Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV
10	623,6	25	600,8	50	588,2
10	629,1	25	768	50	660,8
10	678,5	25	709	50	681
10	494,5	25	660,4	50	629,4
10	496,9	25	669	50	656,5
<b>Arit. průměr</b>	643,733	<b>Arit. průměr</b>	681,44	<b>Arit. průměr</b>	643,18
<b>Směr. odchylka</b>	30,24	<b>Směr. odchylka</b>	61,95	<b>Směr. odchylka</b>	35,82
<b>Nejistota měření</b>	31,1	<b>Nejistota měření</b>	38,79	<b>Nejistota měření</b>	22,42



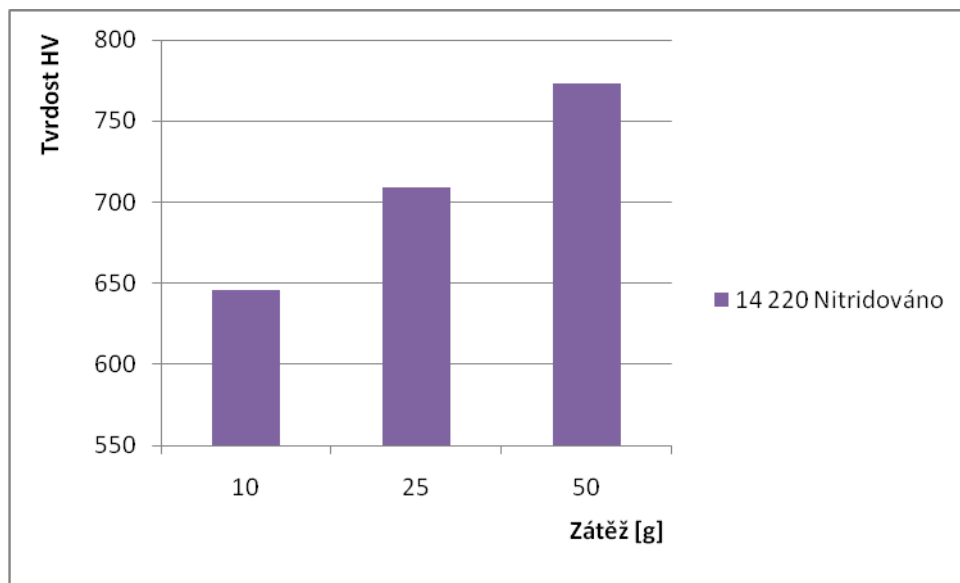
Obr. 45.: Porovnání hodnot mikrotvrdości cementovaného materiálu 14 220

U cementované oceli 14220 byla nejvyšší hodnota mikrotvrdości naměřena při zatížení 25g, kde její hodnota dosáhla úrovně 681,44HV. Nejmenší hodnota pak byla zjištěna při zatížení 50g a to 643,18HV (Tab. 11, Obr. 45).

## 5.7 Ocel 14 220 nitridovaná

Tab. 12.: Naměřené hodnoty vzorku nitridovaného materiálu 14220

Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV
10	647,4	25	718,9	50	775,3
10	640,7	25	660,7	50	777,5
10	650,1	25	706,7	50	762,3
10	651,4	25	716,4	50	772,2
10	639,6	25	694,5	50	780,2
Arit. průměr	645,84	Arit. průměr	709,125	Arit. průměr	773,5
Směr. odchylka	5,4	Směr. odchylka	11,08	Směr. odchylka	6,91
Nejistota měření	3,38	Nejistota měření	8,42	Nejistota měření	4,33



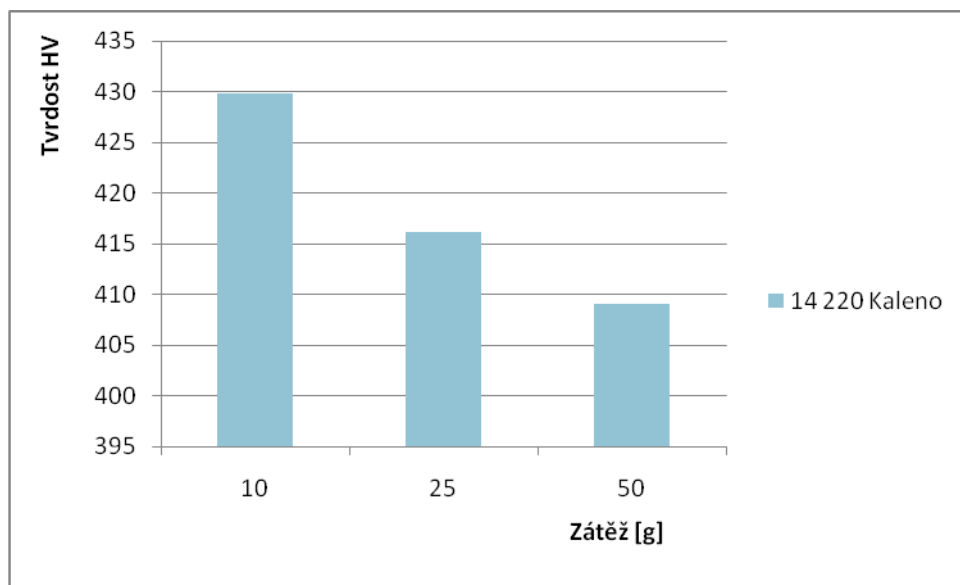
Obr. 46.: Porovnání hodnot mikrotvrdości nitridovaného materiálu 14 220

U nitridované oceli 14 220 byla naměřena nejvyšší hodnota mikrotvrdości při zatížení 50g a to 773,5HV. Nejmenší hodnoty bylo dosaženo při zatížení 10g, kdy mikrotvrdość dosáhla hodnoty 645,84HV (Tab. 12, Obr. 46).

## 5.8 Ocel 14 220 kalena

Tab. 13.: Naměřené hodnoty vzorku kaleného materiálu 14220

Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV
10	456,6	25	417,2	50	396,2
10	442,1	25	414,7	50	419,6
10	418,2	25	416,4	50	427,9
10	404,5	25	425,8	50	405,4
10	427,5	25	406,8	50	396,5
Arit. průměr	429,78	Arit. průměr	416,18	Arit. průměr	409,12
Směr. odchylka	20,31	Směr. odchylka	6,78	Směr. odchylka	14,16
Nejistota měření	12,71	Nejistota měření	4,24	Nejistota měření	8,87



Obr. 47.: Porovnání hodnot mikrotvrdości kaleného materiálu 14 220

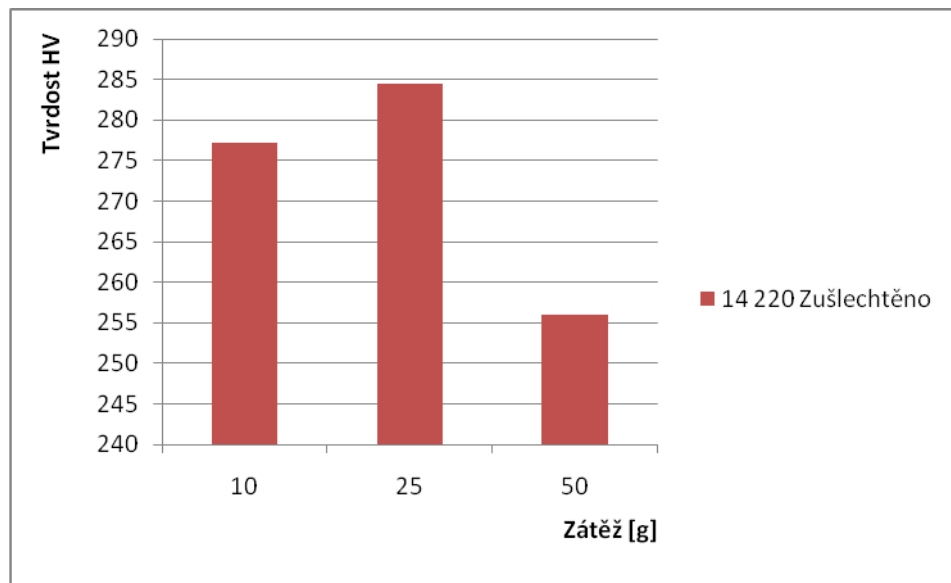
Maximální hodnota u kalené oceli 14220 byla naměřena 429,78 HV při zatížení 10g. Nejmenší hodnota pak byla zjištěna 409,12 HV při zatížení 50g (Tab. 13, Obr. 47).



## 5.9 Ocel 14 220 zušlechtěna

Tab. 14.: Naměřené hodnoty vzorku zušlechtěného materiálu 14220

Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV	Hodnoty zátěže [g]	Tvrdość HV
10	278,2	25	274,4	50	253,7
10	274,5	25	280,1	50	251,6
10	261,6	25	290,9	50	258,7
10	280,9	25	291,6	50	256,8
10	275,5	25	285,5	50	259,2
Arit. průměr	277,275	Arit. průměr	284,5	Arit. průměr	256
Směr. odchylka	2,88	Směr. odchylka	7,31	Směr. odchylka	3,27
Nejistota měření	2,19	Nejistota měření	4,58	Nejistota měření	2,05



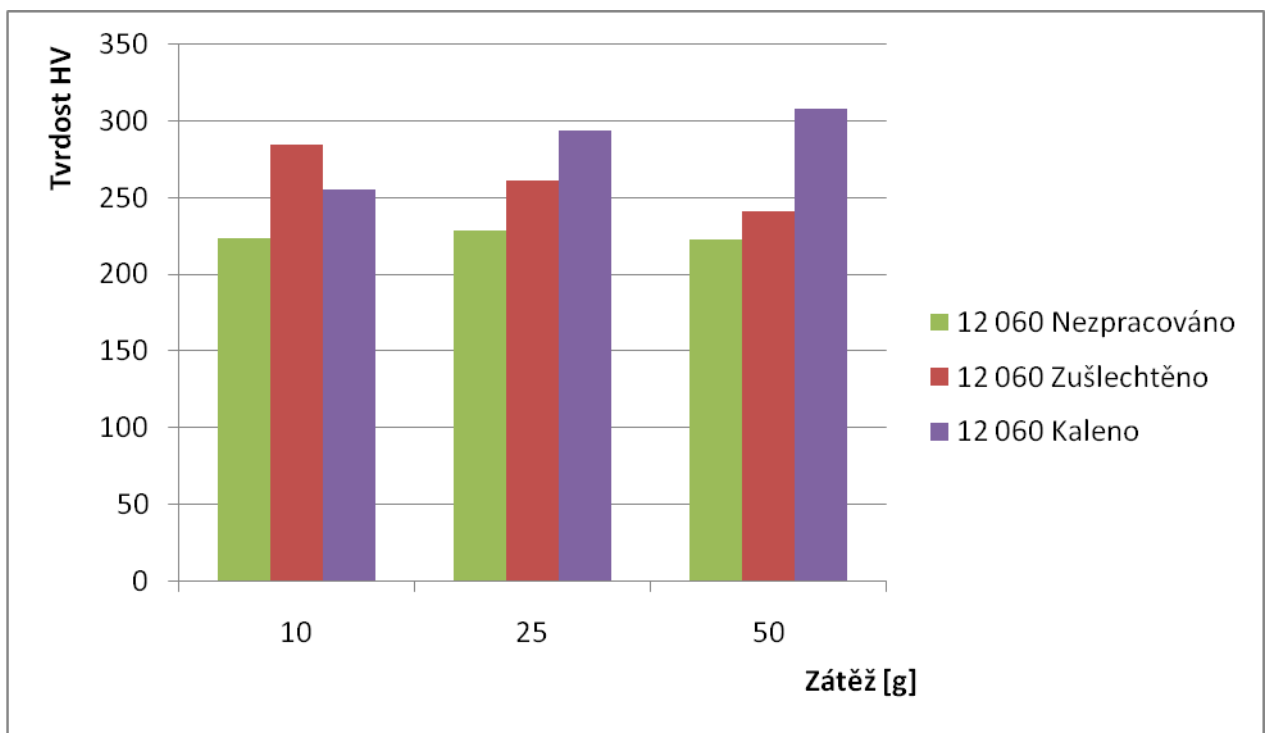
Obr. 48.: Porovnání hodnot mikrotvrdości zušlechtěného materiálu 14 220

Minimální hodnota zušlechtěného materiálu 14 220 byla naměřena 256HV při zatížení 50g. Maximální hodnota zušlechtěného materiálu 14 220 byla naměřena 284,5HV při zatížení 25g (Tab. 14, Obr. 48).

## 6 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Bakalářská práce se zabývá měřením mikrotvrdomosti u vybraných typů materiálů (zkušebních těles). Měření bylo prováděno v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství na mikrotvrdoměru Affri DM 2D. Pro měření mikrotvrdomosti byla zvolena tři zatížení 10g, 25g a 50g. Měření bylo prováděno 15x rovnoměrně na ploše zkušebního tělesa (Obr. 38). Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány a vyhodnoceny.

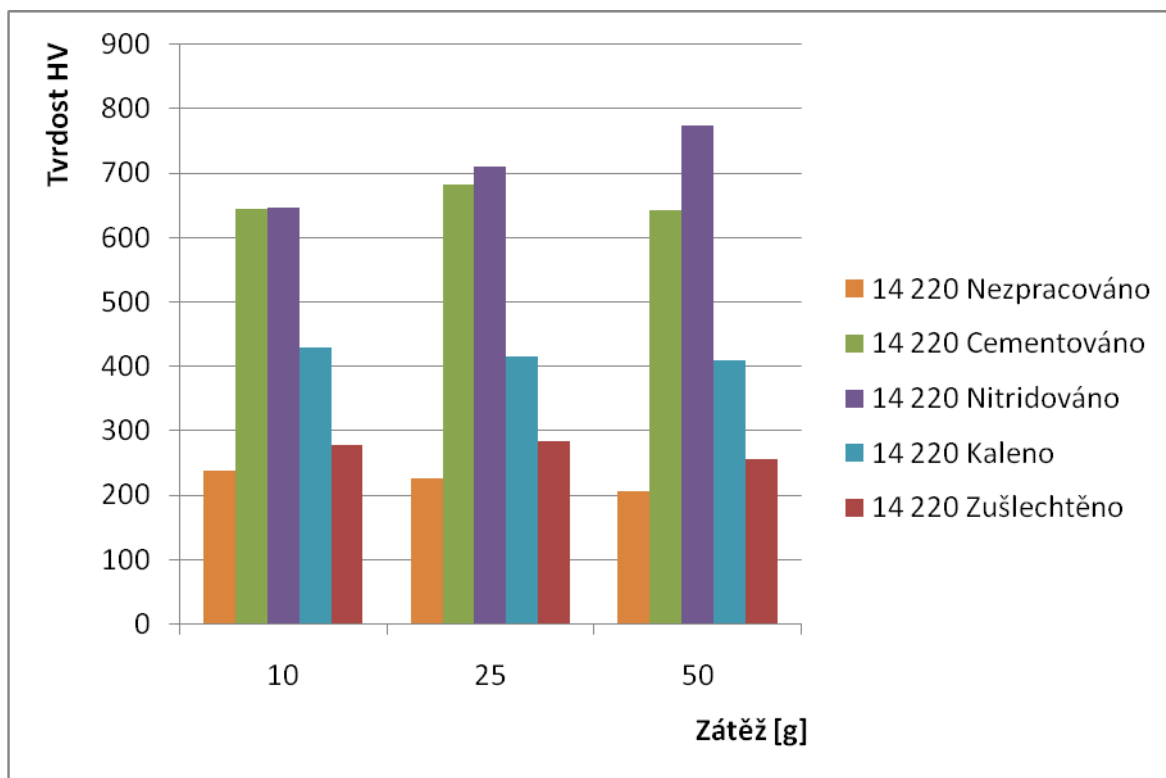
### 6.1.1 Porovnání mikrotvrdomosti u ocelí 12 060



Obr. 49.: Porovnání hodnot mikrotvrdomosti ocelí 12 060 při zatížení 10g, 25g a 50g

Při porovnání mikrotvrdomosti u materiálu 12 060 se potvrdil předpoklad, že materiál základní, který nebyl tepelně zpracován, dosáhl nejmenších hodnot mikrotvrdomosti (Obr. 49.). Naopak u zkušebních těles materiálu 12 060, na kterých bylo realizováno tepelné zpracování, je pozorovatelná vyšší hodnota tvrdosti. Za tento patrný nárůst mikrotvrdomosti může u kaleného a zušlechtěného zkušebního tělesa dosažení bainitické struktury.

### 6.1.2 Porovnání mikrotvrlosti u ocelí 14 220

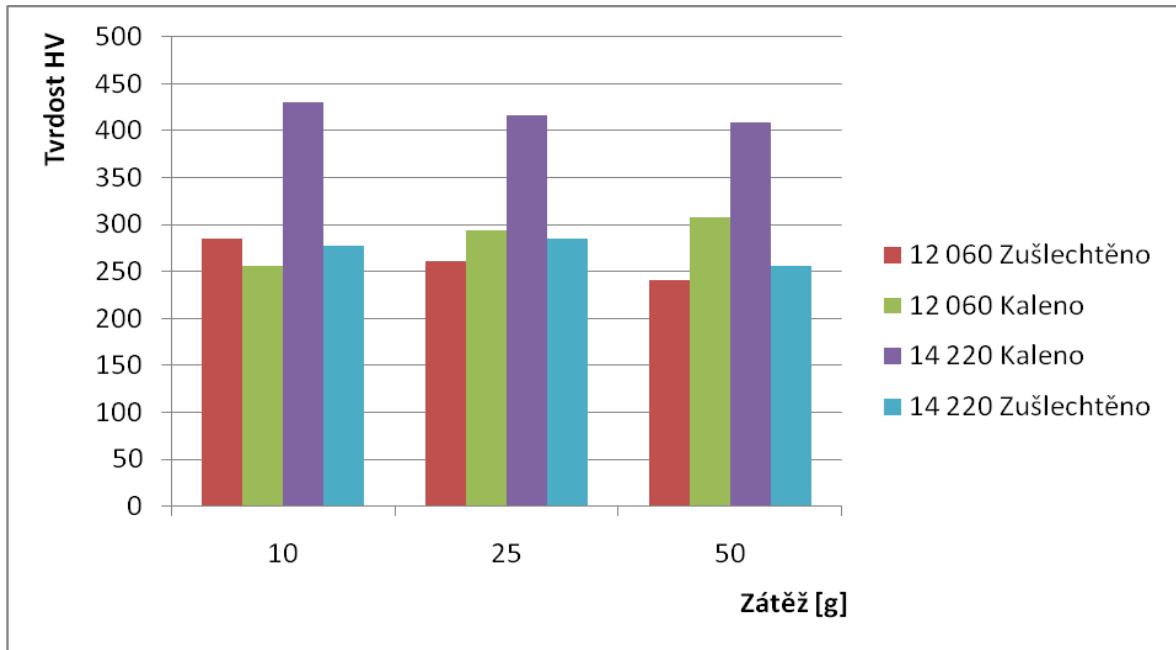


Obr. 50.: Porovnání hodnot mikrotvrlosti ocelí 14 220 při zatížení 10g, 25g a 50g

Při hodnocení mikrotvrlosti u materiálu 14220 bylo zjištěno, že nejmenších hodnot bylo dosaženo u materiálu základního, tepelně nezpracovaného. Pokud byl materiál tepelně zpracován (kalen, zušlechtěn) došlo k nárůstu hodnot mikrotvrlosti, jak je patrné z obrázku 50. Zmiňované zvýšení hodnot mikrotvrlosti bylo způsobeno změnou struktury, kdy bylo dosaženo bainitické, případně martenzitické struktury. Tyto struktury vykazují vysokou tvrdost, porovnáním se strukturními složkami základního tepelně nezpracovaného materiálu.

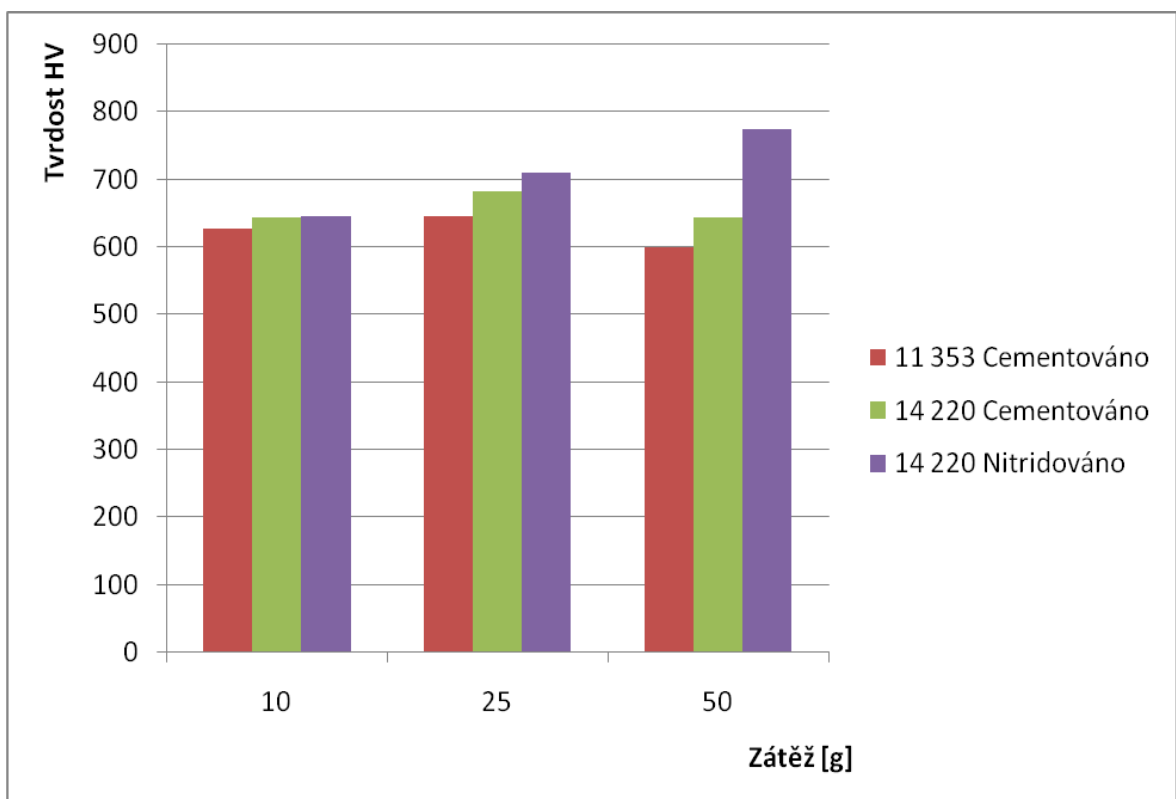
Nejvyšších hodnot, bylo dosaženo u chemicko – tepelného zpracování (cementace, nitridace). Zde byly hodnoty mikrotvrlosti naměřeny nejvyšší, což bylo způsobeno strukturou tvořenou velmi tvrdými nitridy a tvrdou martenzitickou strukturou (Obr. 50). Zajímavé bylo také zjištění, že v případě tepelného zpracování zkušebních těles nastal se zvyšujícím se zatížením pokles hodnot mikrotvrlosti. U chemicko – tepelného zpracování tomu bylo naopak (Obr. 50).

### 6.1.3 Vyhodnocení tepelně zpracovaných ocelí 12 060 a 14 220



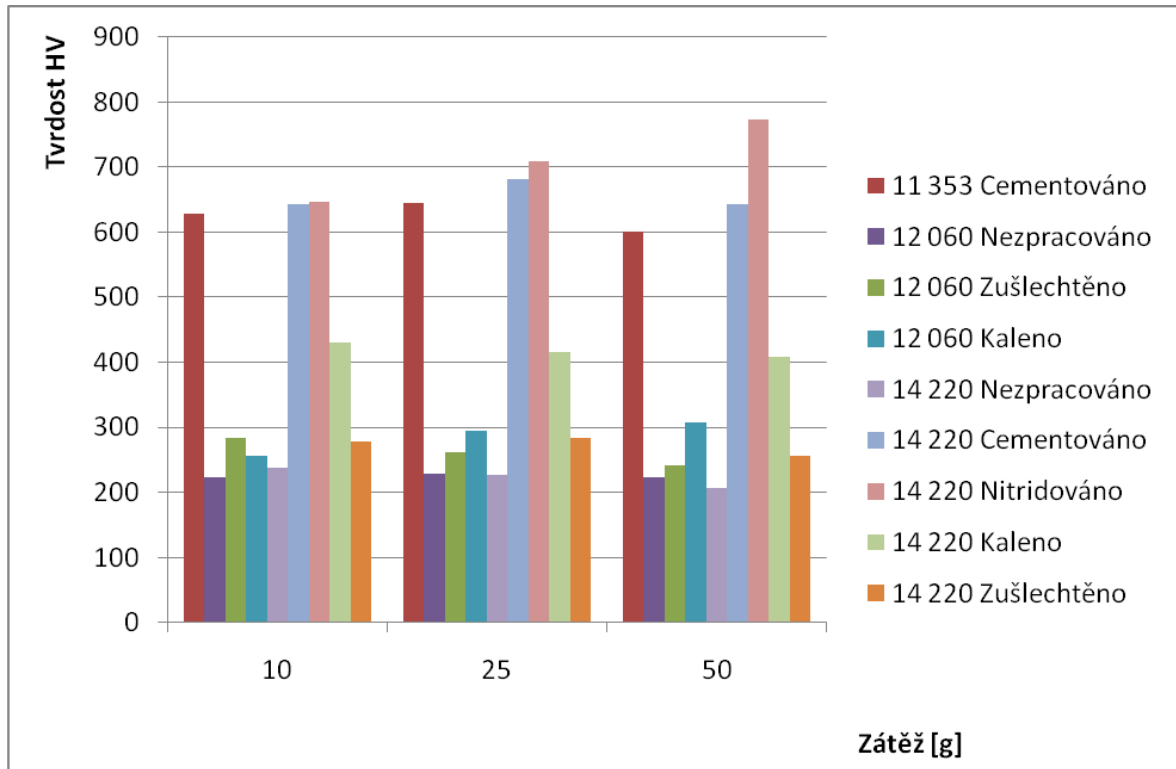
Obr. 51.: Porovnání hodnot mikrotvrlosti všech tepelně zpracovaných ocelí

### 6.1.4 Vyhodnocení Chemicko-tepelně zpracovaných ocelí 11 353 a 14 220



Obr. 52.: Porovnání hodnot mikrotvrlosti všech chemicko-tepelně zpracovaných ocelí

### 6.1.5 Vyhodnocení všech zadaných vzorků materiálů



Obr. 53.: Porovnání hodnot mikrotvrlosti všech zadaných zkušebních vzorků ocelí

Při měření mikrotvrlosti se potvrdil předpoklad hodnot tvrdosti u základního materiálu a materiálů, jehož struktura byla modifikována tepelným nebo chemicko - tepelným zpracováním. Z výsledků měření vyšlo najevo, že výrazná podíl na velikost hodnot mikrotvrlosti bude mít obsah uhlíku. Dále bylo zjištěno, že nejmenších hodnot mikrotvrlosti bylo dosaženo při měření základních tepelně neovlivněných struktur zkušebních těles (materiál 12 060 a 14 220 (Obr. 53). Vyšší hodnoty vykazovaly materiály, které byly tepelně zpracovány tj. zušlechtěny a kaleny (Obr. 51). Zde byly naměřeny nejvyšší hodnoty u kalených zkušebních těles s porovnáním se zušlechtěnými. Nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo u chemicko – tepelného zpracování (Obr. 52,53). Zde vytvořené struktury dosáhly nejvyšší hodnot mikrotvrlosti. To bylo způsobeno vznikem velmi tvrdých martenzitických struktur se strukturami tvořenými velmi tvrdými nitridy.

## ZÁVĚR

Bakalářské práce řeší problém měření mikrotvrlosti u vybraných typů kovových materiálů, které byly tepelně nebo chemicko-tepelně zpracovány, popřípadě byly ve stavu tepelně nezpracovaném. Měření mikrotvrlosti bylo realizováno na mikrotvrdoměru Affri DM – 2D, v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství FT UTB ve Zlíně.

Pro měření mikrotvrlosti byla zvolena zatížení 10g, 25g, 50g a doba zatížená byla 15s. Měření byla opakována 5x na různých místech plochy zkušebního tělesa a pro tři již zmíněná zatížení. Naměřené výsledky byly graficky zpracovány a vyhodnoceny.

Z výsledků měření vyplynulo, že nejmenších hodnot mikrotvrlosti bylo dosaženo u základního materiálu (tepelně nezpracovaného, 14220, 12060). Zde byla zjištěna struktura perlitická, vykazující malé hodnoty mikrotvrlosti. Vyšších hodnot bylo dosaženo u materiálů, které byly tepelně zpracovány (kalení, zušlechťování). Zde byly zjištěny hodnoty menší u zušlechtěných materiálů, které jsou reprezentovány bainitickou strukturou. Naopak zakalené struktury (martenzit) vykazovaly nárůst hodnot mikrotvrlosti. Nejvyšší hodnoty mikrotvrlosti byly zjištěny u materiálů po chemicko – tepelném zpracování (nitridace, cementace). Takto vytvořené struktury (martenzit, tvrdé nitridy) vykazovaly nejvyšší nárůst hodnot mikrotvrlosti. Jako zajímavé se jeví velikost zatěžující síly při zkoušce mikrotvrlosti. Při zvyšujícím se zatížení docházelo k mírnému poklesu hodnot mikrotvrlosti u materiálů tepelně zpracovaných, zatímco u zkušebních těles chemicko – tepelně zpracovaných tomu bylo naopak.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [3] Macek, K. *Nauka o materiálu*, Praha: ČVUT, 1999
- [2] Macek, K. *Tepelné zpracování kovových materiálů*, Praha: ČVUT, 2008
- [3] Skálová, J. *Nauka o materiálech*, Západočeská univerzita Plzeň, 2000
- [4] Horáček, J. *Nauka o materiálu*, Praha: TF ČZU, 2000
- [5] Strojírenské materiály dostupné z <http://tzs.kmm.zcu.cz/nok.htm>
- [6] Materiály dostupné z <http://www.ulozto.cz/hledej?q=metalografie>
- [7] Materiály dostupné z <http://www.ulozto.cz/hledej?q=nauka+o+materialu>
- [8] Studentská podpora výuky Nauka o materiálu z  
[ftp://nw-central.utb.cz/DATA/COMMON/BOARD/Nauka\\_o\\_materialu/](ftp://nw-central.utb.cz/DATA/COMMON/BOARD/Nauka_o_materialu/)
- [9] Internetová podpora pro studenty VUT z  
<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/index.htm>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<i>LOM</i>	světelná mikroskopie
<i>TEM</i>	transmisní elektronová mikroskopie
<i>REM</i>	rastrovací elektronová mikroskopie
<i>STM</i>	řadový tunelový mikroskop
<i>AMF</i>	mikroskop atomárních sil
$Al_2O_3$	korund (oxid hlinitý)
$Cr_2O_3$	oxid chromitý
$Fe_3C$	sloučenina karbidu železa (cementit)
<i>Fe-C</i>	sloučenina železa a uhlíku
$Mo_2C$	karbid dimolybdenu
$V_4C_3$	karbid vanadu
$\alpha$	modifikace železa
$\gamma$	modifikace železa
$\delta$	modifikace železa
$A_{ci}$	čára teplotního rozmezí pro stabilní a metastabilní diagramy
$M_s$	křivka počátku vzniku martenzitu
$M_f$	křivka konce přeměny martenzitu
$d$	aritmetický průměr délek úhlopříčky [mm]
$c$	konstanta vnikajícího tělesa
$F$	síla [N]
$s$	sekunda
$g_n$	gravitační konstanta [ $m^2/s$ ]
<i>HB</i>	brinelova tvrdost
<i>HV</i>	vickersova hodnota tvrdosti



<i>HK</i>	knoopova hodnota tvrdosti
<i>ISO</i>	mezinárodní organizace pro normalizaci
<i>ČSN</i>	české technické normy

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.: Zvýšení kontrastu u hranice zrn .....	15		
Obr. 2.: Fyzikální jevy vyvolané interakcí vzorku a elektronů.....	15		
Obr. 3.: REM technologie u fosfátovaného šroubu při zvětšení 220x, 2300x 15000x .....	16		
Obr. 4.: TEM technologie u identifikace fází a hranic zrn .....	16		
Obr. 5.: Detail interakce mezi hrotem a povrchem.....	17		
Obr. 6.: Schéma průběhu metalografického výbrusu.....	18		
Obr. 7.: Feritická struktura	Obr. 8.: Austenitická struktura.....	23	
Obr. 9.: Perlitická struktura	Obr. 10.: Terciální cementit .....	23	
Obr. 11.: Ledeburitická struktura	Obr. 12.: Příklad kuličkového grafitu .....	23	
Obr. 13.: Bainitická struktura	Obr. 14.: Martenzit.....	24	
Obr. 15.: Sorbitická struktura.....		24	
Obr. 16.: Peritektická reakce	Obr. 17.: Eutektická transformace .....	26	
Obr. 18.: Eutektoidní transformace .....		26	
Obr. 19.: Metastabilní $Fe_3C$ diagram.....		27	
Obr. 20.: Rovnovážní stabilní diagram (vyznačen čárkovaně).....		28	
Obr. 21.: Perlit	Obr. 22.: Rozpad perlitu	Obr. 23.: Transformace.....	30
Obr. 24.: Zbylé zrno	Obr. 25.: Stopy austenitu	Obr. 26.: Finální fáze.....	30
Obr. 27.: a) částice karbidu, b) zrno feritu, c) vznik austenitu, d) růst austenitu, .....			30
Obr. 28.: Schéma izotermického rozpadu austenitu (IRA) oceli.....			31
Obr. 29.: Diagram anizotrotermického rozpad austenitu (ARA) eutektoidních oceli. ....			33
Obr. 30.: Oblast teplot žhání v $Fe-Fe_3C$ diagramu: .....			34
Obr. 31.: Způsoby kalení do studené lázně.....			37
Obr. 32.: Schéma průběhu tepelně mechanického zpracování:.....			39
Obr. 33.: Zobrazení závislosti síly a deformace při nanotvrdosti .....			42
Obr. 34.: Princip vickersovy metody .....			43
Obr. 35.: Princip metody Knoop .....			46
Obr. 36.: Digitální mikrotvrdoměr AFFRI DM2D .....			51
Obr. 37.: Metalografická bruska MTH.....			54
Obr. 38.: Průběh zkoušky na mikrotvrdoměru.....			54
Obr. 39.: Vyhodnocování mikrotvrdosti v softwaru MICRONESS.....			55
Obr. 40.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti cementovaného materiálu I1 353.....			56

<i>Obr. 41.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti nezpracovaného materiálu 12 060 .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 42.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti zušlechtěného materiálu 12 060 .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 43.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti kaleného materiálu 12 060 .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 44.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti nezpracovaného materiálu 14 220 .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 45.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti cementovaného materiálu 14 220 .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 46.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti nitridovaného materiálu 14 220 .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 47.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti kaleného materiálu 14 220 .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 48.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti zušlechtěného materiálu 14 220 .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 49.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti ocelí 12 060 při zatížení 10g,25g a 50g .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 50.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti ocelí 14 220 při zatížení 10g,25g a 50g .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 51.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti všech tepelně zpracovaných ocelí .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 52.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti všech chemicko-tepelně zpracovaných ocelí ....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 53.: Porovnání hodnot mikrotvrdosti všech zadaných zkušebních vzorků ocelí .....</i>	<i>69</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1.: Hodnoty zkušební zátěží dle Vickerse.....</i>	43
<i>Tab. 2.: Hodnoty zkušební zátěží dle Vickerse.....</i>	45
<i>Tab. 3.: Zkušební zátěží pro zkoušku tvrdosti dle Knoop ..... 47</i>	47
<i>Tab. 4.: Materiály pro zkušební tělesa ..... 49</i>	49
<i>Tab. 5.: Parametry mikrotvrdoměru AFFRI DM2D..... 50</i>	50
<i>Tab. 6.: Naměřené hodnoty zkušební těleso materiálu 11 353 - cementováno..... 56</i>	56
<i>Tab. 7.: Naměřené hodnoty vzorku nezpracovaného materiálu 12 060 ..... 57</i>	57
<i>Tab. 8.: Naměřené hodnoty vzorku zušlechtěného materiálu 12 060 ..... 59</i>	59
<i>Tab. 9.: Naměřené hodnoty vzorku kaleného materiálu 12 060 ..... 60</i>	60
<i>Tab. 10.: Naměřené hodnoty vzorku nezpracovaného materiálu 14220 ..... 61</i>	61
<i>Tab. 11.: Naměřené hodnoty vzorku cementovaného materiálu 14220..... 62</i>	62
<i>Tab. 12.: Naměřené hodnoty vzorku nitridovaného materiálu 14220 ..... 63</i>	63
<i>Tab. 13.: Naměřené hodnoty vzorku kaleného materiálu 14220 ..... 64</i>	64
<i>Tab. 14.: Naměřené hodnoty vzorku zušlechtěného materiálu 14220 ..... 65</i>	65