



**Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti oceli**  
Bakalářská práce

*Vedoucí práce:*  
Ing. Jiří Votava, Ph.D.

*Vypracoval:*  
Jan Čupa

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: „Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti oceli“ vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....  
podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji Ing. Jiřímu Votavovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, ochotu projevovanou při konzultacích, připomínky a cenné rady, které mi pomohly při zpracování bakalářské práce.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá problematikou tepelného zpracování oceli a jeho vlivem na mechanické vlastnosti oceli. V úvodu práce je zmíněn postup výroby surového železa a oceli. Práce dále uvádí rozdělení ocelí v závislosti na jejich chemickém složení, způsobu výroby a značení dle ČSN. Popsány jsou také jednotlivé strukturní fáze a některé přeměny slitin železa. Další kapitola uvádí přehled druhů tepelného zpracování, přičemž součástí popisu jednotlivých druhů je zpravidla jejich vliv na vlastnosti oceli. Závěrečná část práce se věnuje poruchám krystalické mřížky, které mohou v průběhu procesu vznikat.

## **Klíčová slova**

ocel, kalení, žíhání, popouštění, austenit, martenzit, poruchy

## **ABSTRACT**

Bachelor thesis deals with the heat treatment of steel and its influence on the mechanical properties of the steel. In the introduction is the procedure to production of raw iron and steel. Thesis shows the distribution of steel, depending on their chemical composition, method of production and labeling according to Czech National Standards. Thesis also describes structural phases and some transformations of iron alloys. The next chapter provides an overview of the heat treatment methods and part of the description of each species is usually their influence on the properties of steel. The final part of thesis deals with the lattice defects, that may arise during the process.

## **Keywords**

hardening, annealing, tempering, austenite, martensite, defects

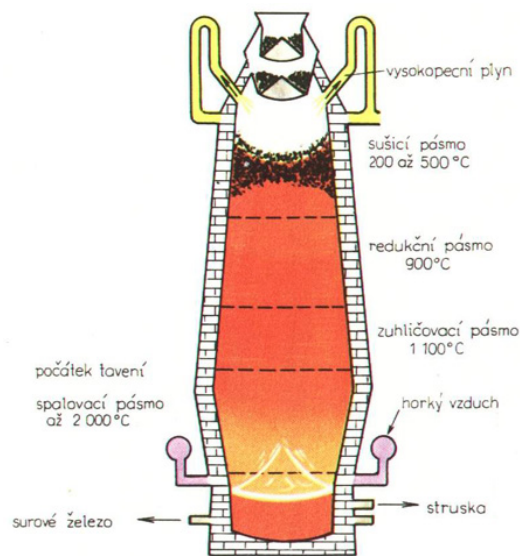
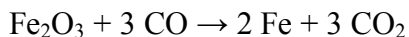
## OBSAH

1	ÚVOD.....	9
2	CÍL.....	10
3	ROZDĚLENÍ OCELÍ .....	11
3.1	Rozdělení ocelí podle způsobu výroby .....	11
3.2	Oceli ke tváření .....	11
3.2.1	Rozdělení tvářených ocelí do tříd .....	13
3.2.2	Číselné označování a rozdělení ocelí ke tváření.....	13
3.2.3	Rozdělení podle obsahu uhlíku.....	15
3.3	Oceli na odlitky.....	15
3.3.1	Rozdělení dle způsobu použití.....	16
3.3.2	Číselné označování a rozdělení slitin železa na odlitky.....	16
4	STRUKTURNÍ FÁZE A PŘEMĚNY SLITIN ŽELEZA .....	17
4.1	Metastabilní soustava železo – karbid železa .....	17
4.2	Precipitační rozpad tuhých roztoků.....	18
4.3	Austenitizace.....	19
4.4	Přeměny austenitu .....	20
4.4.1	Perlitická přeměna.....	20
4.4.2	Bainitická přeměna.....	20
4.4.3	Martenzitická přeměna .....	21
5	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN ŽELEZA.....	22
5.1	Ohřev .....	23
5.2	Ochlazování .....	25
5.3	Žihání.....	26
5.3.1	Žihání bez překrytalizace .....	27
5.3.2	Žihání s překrytalizací .....	30
5.4	Kalení .....	31
5.4.1	Kalitelnost, zakalitelnost, prokalitelnost .....	31
5.4.2	Kalící teplota.....	32
5.4.3	Kalící prostředí.....	33
5.4.4	Způsoby kalení.....	35
5.5	Popouštění.....	39

5.5.1	Popouštění při nízkých teplotách (napouštění).....	40
5.5.2	Popouštění při vysokých teplotách (anizotermické zušlechťování) .....	40
6	PORUCHY KRYSTALICKÉ MŘÍŽKY .....	41
6.1	Bodové poruchy .....	41
6.2	Čárové poruchy .....	42
6.3	Plošné poruchy.....	43
7	ZÁVĚR .....	44
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	45
9	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	46
10	SEZNAM TABULEK .....	47

# 1 ÚVOD

Ocel je slitinou železa a uhlíku (do 2,14% C), která pro své jedinečné mechanické a technologické vlastnosti zůstává dodnes jedním z nejdůležitějších technických materiálů pro stavbu strojů, nástrojů apod. Základní surovinou pro výrobu oceli je surové železo. Výroba surového železa probíhá ve vysoké peci (Obr. 1), kde dochází k redukci oxidů železa v železné rudě oxidem uhelnatým a uhlíkem:



**Obr. 1 Schéma vysoké pece [10]**

Výslednými produkty vysoké pece jsou surové železo a struska, která obsahuje zejména  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Struska se pak používá např. při výrobě cementu.

Surové železo má vysoký obsah uhlíku a obsahuje rovněž křemík, mangan, síru a fosfor. Pokud má být vyrobena ocel – tedy slitina s relativně nízkým obsahem uhlíku a nečistot, musí se obsahy těchto prvků v železe snížit. To se provádí procesem, který nazýváme zkujňování surového železa (přeměna na tvárnou a kujnou ocel). Zkujňování spočívá v reakci roztaveného surového železa (obvykle ve směsi s ocelovým odpadem) s kyslíkem v kyslíkovém konvertoru. Jako struskotvorná přísada se používá vápno ( $\text{CaO}$ ). Nad roztavenou lázeň se fouká kyslík a nečistoty se mění na oxidy, které buď unikají ve formě plynů ( $\text{CO}_2$ ), nebo reagují s vápnem a shromažďují se ve strusce. Po zkujnění má ocel poměrně vysoký obsah kyslíku, proto je následně nutné provést dezoxidaci, při níž se do roztavené lázně přidává např. hliník, který převádí v tavenině rozpuštěný kyslík na tuhý oxid hlinitý odcházející do strusky. [7]

## 2 CÍL

Cílem bakalářské práce je rešeršní přehled problematiky tepelného zpracování a jeho vlivu na mechanické vlastnosti oceli. Vypracování je podřízeno bodům uvedeným v zadání.

Úvodní část je věnována stručnému popisu výroby surového železa a výroby oceli. Tento proces představuje prvotní zpracování železné rudy, což má zásadní vliv na výslednou kvalitu veškerých ocelových výrobků. Obsahem následující kapitoly je dílčí rozdělení ocelí, a to dle způsobu výroby i podle obsahu uhlíku. Uvedena je stručná charakteristika jednotlivých tříd tvářených ocelí a jejich využití pro konkrétní aplikace. Dle chronologického postupu je následně zařazen popis jednotlivých strukturních fází i některé fázové přeměny během tepelného zpracování. Této problematice je věnován širší prostor z důvodu rozsáhlé škály možností tvorby výsledných fázových struktur během výroby ocelových součástí. Zevrubně jsou popsány vybrané druhy tepelného zpracování a ochlazovacích prostředí, která hrají v procesu jednu z klíčových rolí. Součástí charakteristik jednotlivých druhů tepelného zpracování je zpravidla jejich vliv na vlastnosti oceli. V závěru předložené práce je zpracována problematika poruch a nedokonalostí krystalové mřížky. Tyto vady mají zásadní vliv především na mechanické vlastnosti ocelí i litin.

Na základě jednotlivých kapitol lze získat ucelený přehled o výrobě, značení a tepelném zpracování nejen běžných konstrukčních ocelí, ale rovněž vysoce legovaných materiálů, které jsou naprosto nepostradatelné nejen ve strojírenské výrobě.



### 3 ROZDĚLENÍ OCELÍ

#### 3.1 Rozdělení ocelí podle způsobu výroby

Většina ocelí je dodávána z oceláren jako tvářené polotovary (tyče různých profilů, pásy, trubky různých profilů, plechy různých povrchů, kolejnice, dráty). Pro výrobu tvářených polotovarů se používaly tzv. ingoty, vzniklé odlitím oceli do kovových forem (kokil). Ingot se následně tvářel válcováním nebo kováním na potřebné polotovary. Odlévání ingotů pro válcování je dnes z větší části nahrazeno plynulým odléváním (kontilitím). [8]

Tab. 1 Rozdělení ocelí podle výroby [9]

Oceli	tvářené	nástrojové	uhlíkové	
			legované	
			rychlořezné	
		obvyklých jakostí		
	konstrukční	ušlechtilé	uhlíkové	
			legované	
na odlitky	uhlíkové			
	legované			

#### 3.2 Oceli ke tváření

Dle normy ČSN EN 10020 označujeme jako oceli ke tváření materiály, ve kterých je největší hmotnostní podíl železa, obsah uhlíku je nižší než 2,14% (hranice mezi ocelí a litinou) a jsou zde i další přísadové prvky.

Oceli ke tváření se rozdělují podle účelu použití a stupně legování na konstrukční a nástrojové a obojí dále na nelegované a legované, viz Tab. 1.

- Nelegované oceli - mají nízký obsah jednotlivých prvků uvedených v Tab. 2, vychází se z minimálních obsahů předepsaných pro jednotlivé prvky. Pokud je u dané oceli pro některý prvek předepsána maximální hodnota, pak se pro rozdělení používá 70% této hodnoty.
- Legované oceli - Jako legované označujeme oceli, jejichž obsahy jednotlivých prvků minimálně v jednom případě dosahují nebo překračují meze, uvedené v Tab. 2 a jejich poznámkách pro prvky, případně kombinace prvků.

**Tab. 2 Rozdělení ocelí na nelegované a legované, dle obsahu prvků [5]**

značka	název	obsah	značka	název	obsah
Al	hliník	0,10	Ni	nikl <sup>1)</sup>	0,30
B	bór	0,0008	Pb	olovo	0,40
Bi	bizmut	0,10	Se	selen	0,10
Co	kobalt	0,10	Si	křemík	0,50
Cr	chróm <sup>1)</sup>	0,30	Te	telur	0,10
Cu	měď <sup>1)</sup>	0,40	Ti	titan <sup>2)</sup>	0,05
La	lanthanoidy (hodnoceno jednotlivě)	0,05	V	vanad <sup>2)</sup>	0,10
Mn	mangan	1,65	W	wolfram	0,10
Mo	molybden	0,08	Zr	zirkon <sup>2)</sup>	0,05
Nb	niob	0,06		ostatní	0,05

Výše uvedená tabulka znázorňuje rozdělení ocelí dle obsahu prvků v hmotnostních procentech.

<sup>1)</sup>Jsou-li pro oceli předepsány dva, tři nebo čtyři prvky označené touto poznámkou a jejich určující obsahy jsou nižší než uvedené v tabulce, pak je pro rozdělení nutné vzít v úvahu dodatečně mezní obsah, který činí 70% součtu mezních obsahů těchto dvou, tří nebo čtyř prvků.

<sup>2)</sup>Pravidlo uvedené v poznámce 1 platí stejně i pro prvky označené poznámkou 2.

<sup>3)</sup>Pokud je pro obsah Mn udána pouze nejvyšší hodnota, platí jako mezní obsah 1,80 hm. procenta. [5]

### **Hlavní skupiny jakosti nelegovaných ocelí podle ČSN EN 10020**

Norma rozděluje nelegované oceli do tří hlavních skupin jakosti:

- Oceli obvyklých jakostí
- Nelegované jakostní oceli
- Nelegované ušlechtilé oceli

### **Hlavní skupiny jakostních legovaných ocelí podle ČSN EN 10020**

- Legované jakostní oceli
- Legované ušlechtilé oceli

### 3.2.1 Rozdělení tvářených ocelí do tříd

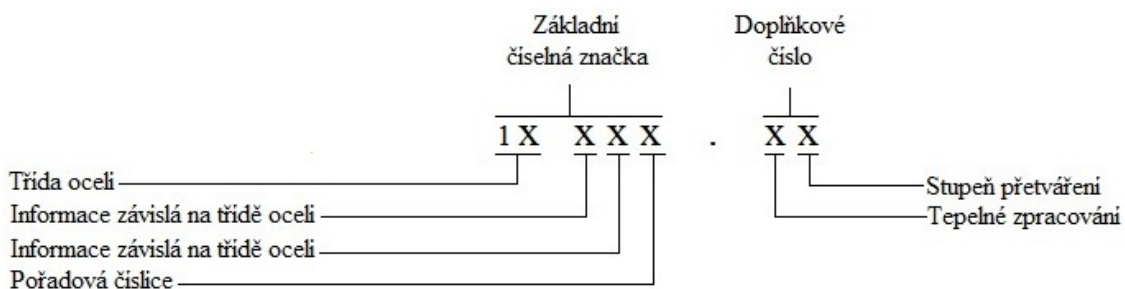
Oceli ke tváření jsou zařazeny do devíti tříd a rozděleny dle Tab. 3.

Tab. 3 Rozdělení ocelí do tříd [6]

Třída oceli	oceli podle		Charakteristika ocelí
	použití	stupně legování	
10	kon- strukční	nelegované (uhlíkové)	předepsané hodnoty mechanických vlastností, chemické složení není předepsáno
11			předepsané hodnoty mechanických vlastností a obsah C, P, S, popř. (P+S) a dalších prvků
12			předepsaný obsah C, Mn, Si, P, popř. (P+S) a dalších prvků
13		nizkolegované	legovací prvky: Mn, Si, V
14			legovací prvky: Cr, Al, Mn, Si
15			legovací prvky: Mo, Mn, Cr, V, W, Si
16		nizkolegované a středně legované	legovací prvky: Ni, Cr, V, Mn, W, Mo,
17	středně legované a vysokolegované	legovací prvky: Cr, Ni, Mo, V, Al, Ti, Mn, W	
19	nástro- jové	uhlíkové	předepsaný obsah C, Mn, Si, P, S, v úzkých mezích
		legované (nizko, středně, vysoko)	legovací prvky: Cr, V, Ni, Mo, Si, W, Al, Co

### 3.2.2 Číselné označování a rozdělení ocelí ke tváření

Číselné označování ocelí ke tváření dle ČSN EN 10020 (42 0002) je složeno ze základní číselné značky a doplňkového čísla, odděleného tečkou.



Obr. 2 Schéma číselného značení ocelí ke tváření [1]

Základní číselná značka je pětimístné číslo, přičemž první číslice je 1, ta značí ocel tvářenou.

První číslice ve spojení s druhou značí třídu oceli. Zatímco třetí a čtvrtá číslice mají význam různý, v závislosti na třídě oceli. Pátá číslice má význam pořadový. Doplnkové číslo se skládá z jedné nebo dvou číslic, první doplnková číslice vyjadřuje stav oceli v závislosti na tepelném zpracování a druhá doplnková číslice udává stupeň přetváření daný výrobou polotovaru. Označení oceli se čte (např. běžná ocel 11 375.01): „jedenáct tři sta sedmdesát pět tečka nula jedna“.

**Tab. 4 Význam první doplnkové číslice [1]**

První doplnková číslice za číselnou značkou oceli	Konečný stav oceli (druh výsledného tepelného zpracování)
1X XXX.0	tepelně nezpracovaný
1X XXX.1	normalizačně žíhaný
1X XXX.2	žíhaný (s uvedením druhu žíhání)
1X XXX.3	žíhaný na měkko
1X XXX.4	kalený nebo kalený a popuštěný při nízkých teplotách, po rozpouštěcím žíhání (jen u austenitických ocelí)
1X XXX.5	normalizačně žíhaný a popuštěný
1X XXX.6	zušlechťený na dolní pevnost obvyklou u příslušné oceli
1X XXX.7	zušlechťený na střední pevnost obvyklou u příslušné oceli
1X XXX.8	zušlechťený na horní pevnost obvyklou u příslušné oceli
1X XXX.9	stavy po tepelném zpracování, které nelze označit číslicemi 1 až 8

**Konstrukční uhlíkové oceli** jsou nejběžnějšími konstrukčními materiály. Ve strojírenství se užívají oceli třídy 11 a 12, ve stavebnictví oceli třídy 10 (výztuže do betonu, kolejnice, méně důležité konstrukční součásti bez nosných svarů).

*Oceli třídy 11* nejsou převážně určeny k tepelnému zpracování. Jsou dodávány v nejrozmanitějším sortimentu hutních polotovarů. Mezi běžně užívané oceli tř.11 patří:

- se zaručenou svařitelností: 11 375 na málo namáhané součásti (podpěrky, páky, táhla, výztuhy, víka, svařované konstrukce, rámy, bubny); 11 353 (jen trubky); 11 523 (svařované: díly strojů, rámy, části tepel. energetických zařízení).
- s poněkud vyšší pevností, obtížně svařitelné: 11 500, 11 600 (čepy, kolíky, pera, spojovací šrouby a matice, kladky, řemenice, ozubená kola, hřídele, pístnice, apod.).
- se zlepšenou obrobiteľností: 11 109, 11 110 drobné součásti soustružené na automatech (čepy, kolíky, šrouby, tlačítka, podložky, zátky).

*Oceli třídy 12* mají přesněji určeno chemické složení. Přesný obsah uhlíku umožňuje jejich tepelné zpracování. Mezi běžně užívané oceli této třídy patří oceli:

- k zušlechťování: 12 050, 12 060 na součásti s vyšší pevností (táhla, hřídele, zalomené hřídele, páky, ozubená kola, vřetena, lamely spojek, kladky, čepy, atd.).
- k cementování a kalení: 12 010, 12 020 na součásti s povrchem odolným proti opotřebení (pastorky, ozubená kola, lamely spojek, vačky, čelisti, dorazy, atd.).
- s vysokou mezí pružnosti: 12 081, 12 090 (pružiny všech druhů).

**Konstrukční legované oceli třídy 13 až 16** se užívají pro velmi namáhané součásti (klikové hřídele, ojnice, torzní tyče, valivá ložiska, ozubená kola).

*Oceli třídy 17* jsou speciální, často až vysokolegované. Patří mezi ně oceli korozivzdorné (lékařské nástroje, měřidla, kalibry, nože, součásti potravinářského, chemického, zdravotnického zařízení), žáruvzdorné (lopatky parních turbín, kotlové trubky, ventily spalovacích motorů) a antimagnetické. [8]

**Nástrojové oceli třídy 19** jsou oceli určené k výrobě nástrojů:

- ručních - zednické a kamenické nářadí, srpy, kleště, klíče, šroubováky, nože, aj.
- řezných - např. výstružníky, tvarové nože, nože, frézy, vrtáky, protahováky.
- tvářecích - průtlačníky, nástroje pro tažení, tlačení a ohýbání apod.
- forem (lisovacích, licích) - např. pro tváření plastů a pryže.
- a měřidel - např. kalibry, základní měřky, šablony, kroužky na závity, pravítka.

### 3.2.3 Rozdělení podle obsahu uhlíku

- Nízkouhlíkové (obsah C do 0,25%) – Patří sem oceli na konstrukce. Do 0,1% nejsou určeny k tepelnému zpracování, ale mohou se žíhat. Do 0,3% oceli k cementování.
- Středněuhlíkové (obsah C od 0,25 do 0,6%) – Se středním obsahem uhlíku 0,4 až 0,6% oceli k zušlechťování a povrchovému kalení.
- Vysokouhlíkové (obsah C nad 0,6%) – Velmi dobře kalitelné (s vysokou prokalitelností). Jsou to např. oceli nástrojové a rychlořezné. [6]

## 3.3 Oceli na odlitky

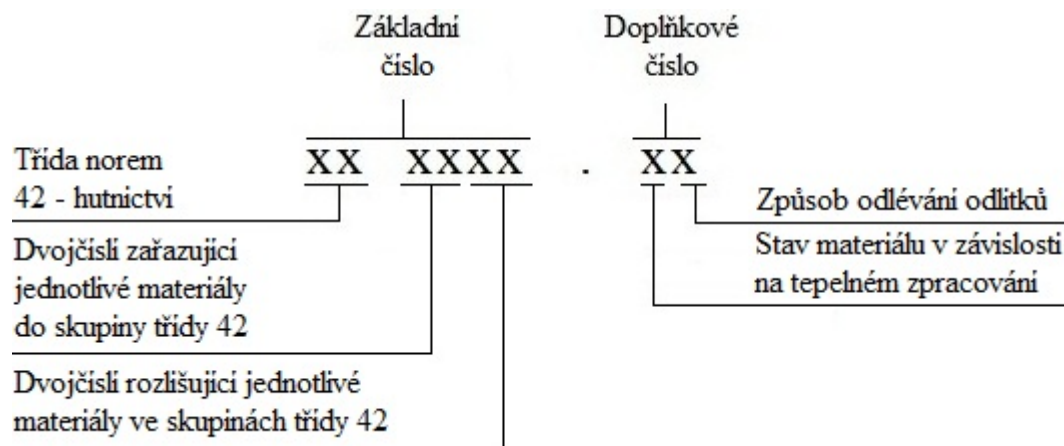
V současné době neexistuje pro oceli na odlitky ekvivalent normy pro rozdělení ocelí ke tváření EN 10020.

### 3.3.1 Rozdělení dle způsobu použití

- Nelegované a legované oceli na odlitky pro všeobecné použití
- Oceli pro odlitky tlakových nádob
- Korozivzdorné oceli pro všeobecné použití
- Žárovzdorné oceli na odlitky a slitiny pro všeobecné použití
- Materiál pro odstředivě lité výrobky

### 3.3.2 Číselné označování a rozdělení slitin železa na odlitky

Číselné označení slitin železa na odlitky (Výběr z ČSN 42 0006) je tvořeno základním šestimístným číslem, k němuž bývá za tečkou připojováno dvoumístné doplňkové číslo, obdobně jako u ocelí ke tváření. [6]



Obr. 3 Schéma číselného značení slitin železa na odlitky [6]

Tab. 5 Rozdělení slitin železa na odlitky [6]

Druhé dvojčíslí	Druh slitiny
23	tvárné litiny
24	šedé litiny a zvláštní slitiny železa na odlitky
25	bílé, tvrzené a temperované litiny
26	uhlíkové oceli na odlitky
27	nízkolegované a střednělegované oceli na odlitky odlévané do pískových forem
28	nízkolegované a střednělegované oceli na odlitky odlévané jiným způsobem než do pískových forem a slitiny pro trvalé magnety
29	vysokolegované oceli na odlitky

## 4 STRUKTURNÍ FÁZE A PŘEMĚNY SLITIN ŽELEZA

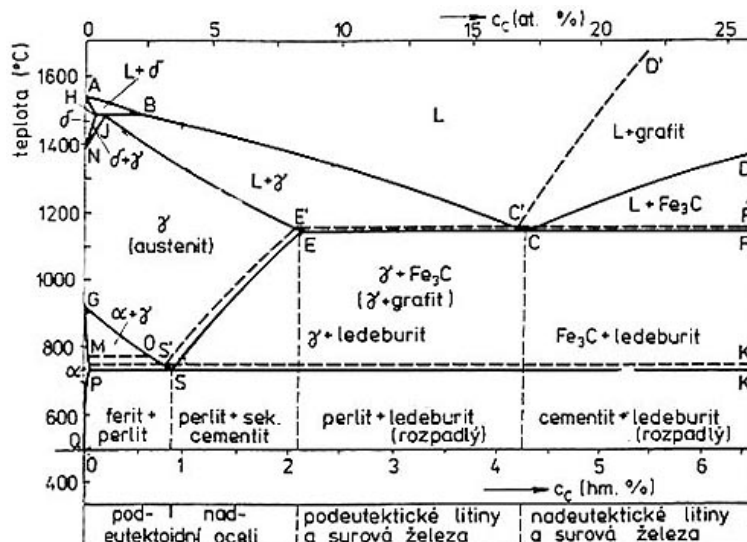
Uhlík s železem tvoří intersticiální tuhé roztoky s omezenou rozpustností uhlíku. Po překročení rozpustnosti uhlíku v tuhém roztoku se uhlík vylučuje jako samostatná fáze.

Při nízkých obsazích tvoří uhlík intersticiální sloučeninu  $\text{Fe}_3\text{C}$  (karbid železa). Tato sloučenina není stabilní a může se rozkládat na grafit a železo. Soustava Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  se označuje jako metastabilní a podle této soustavy tuhnou a chladnou zejména oceli.

Jestliže je uhlík vyloučen jako grafit, jedná se o soustavu stabilní, která má svůj význam zejména při posuzování změn při tuhnutí a chladnutí litin a surových želez. [5]

### 4.1 Metastabilní soustava železo – karbid železa

Na Obr. 4 je rovnovážný diagram železo-uhlík stabilní i metastabilní soustavy. Důležité teploty a koncentrace jsou označeny velkými písmeny. U stabilní soustavy jsou tato písmena opatřena apostrofem, např. C'. [5]



Obr. 4 Rovnovážný diagram Fe -  $\text{Fe}_3\text{C}$  [5]

#### V metastabilní soustavě se vyskytují tyto fáze:

Intersticiální tuhý roztok uhlíku: v  $\text{Fe}_\alpha$  se nazývá *ferit*, v  $\text{Fe}_\gamma$  se nazývá *austenit*, v  $\text{Fe}_\delta$  se nazývá *ferit  $\delta$*  (delta ferit). Dále je zde *cementit* ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) - intersticiální sloučenina železa a uhlíku. *Ledeburit* je eutektikum v metastabilní soustavě, při eutektické teplotě se skládá z krystalů austenitu a cementitu. *Perlit* je eutektoid v metastabilní soustavě, a je směsí feritu a cementitu. Rozeznáváme perlit lamelární a perlit zrnitý.

Tuhnutí slitin železa podle diagramu začíná při teplotách určených křivkou A-B-C-D (likvidus) a končí při teplotách určených křivkou A-H-J-E-F (solidus). Slitiny

s obsahem uhlíku nižším než je koncentrace bodu E (2,14% C) se řadí mezi oceli, s obsahem vyšším než je uvedená hranice mezi litiny.

Bod S (0,765% C) rozděluje oceli na: eutektoidní (obsah uhlíku 0,765 %), podeutektoidní s obsahem uhlíku nižším než uvedeným a nadeutektoidní, jejichž obsah uhlíku je vyšší než 0,765%.

Bod C (4,3% C) obdobně rozděluje litiny a surová železa, přičemž slitina s obsahem uhlíku 4,3% je nazývána eutektická. S obsahem nižším je to podeutektická a s vyšším obsahem uhlíku pak nadeutektická.

S rostoucím obsahem uhlíku v metastabilní soustavě roste i obsah cementitu, křehké a tvrdé fáze (700 až 800 HV). Tím se zvyšuje tvrdost a pevnost a zároveň klesá houževnatost a zhoršují se plastické vlastnosti. Houževnatost a plastické vlastnosti jsou ovlivněny i způsobem vyloučení cementitu. Je-li cementit vyloučen na hranicích zrn (sekundární a terciální), pak je pokles houževnatosti výrazný i při nižším obsahu uhlíku. Perlitická struktura dosahuje vyšší houževnatosti při malé mezilamelární vzdálenosti cementitu. Sferoidizace (sbalení) lamel cementitu způsobuje v perlitické struktuře snížení pevnosti a tvrdosti a zvýšení houževnatosti. [5]

## 4.2 Precipitační rozpad tuhých roztoků

Precipitace je podmíněna existencí přesyceného tuhého roztoku, který se při zvýšených teplotách začne rozpadat. Ke kontinuální precipitaci dochází v tuhých roztocích ocelí (ferit, austenit, martenzit). V případě martenzitu a zbytkového austenitu vzniká nerovnovážený přesycený stav během martenzitické přeměny, následně při popouštění dojde ke kontinuální precipitaci. V ostatních případech přesycení způsobuje snížení rozpustnosti některých legur v tuhém roztoku při snižování jeho teploty.

V případě polymorfních ocelí dochází ke kontinuální precipitaci i za pokojové teploty. Proces se nazývá jako *stárnutí oceli*, jeho vlivem dochází ke zvýšení pevnosti, tvrdosti a meze kluzu, zmenšuje se prodloužení a zúžení, klesá vrubová houževnatost. Nepříznivé důsledky stárnutí ocelí jsou patrné zejména u nízkouhlíkových ocelí (obsah C do 0,2%), protože při vyšším obsahu uhlíku jsou nepříznivé změny vlastností feritu překryty účinkem perlitu. Rychlost stárnutí se zvyšuje se zvyšující se teplotou. Na průběh stárnutí má vliv stupeň přesycení feritu uhlíkem a dusíkem a rozsah a rozložení mřížkových poruch (zejména dislokací). Zdrojem dislokací bývá plastická deformace za studena.



### **Rozlišujeme dva základní druhy stárnutí oceli:**

- a) po zakalení (precipitační)
- b) po tváření za studena (deformační)

Stárnutí může vést ke křehnutí oceli, což se projevuje nejvíce u součástí pracujících za zvýšených teplot a v tepelně ovlivněných oblastech svaru. Stárnutí může vést i ke zvýšené citlivosti na mezikrystalovou korozi. Rychleji stárnou oceli hrubozrné. Stárnutí lze zabránit u nízkouhlíkových ocelí snížením obsahu dusíku a uhlíku ve feritu.

U nepolymorfních, vysocelegovaných ocelí feritických a austenitických má precipitační rozpad velký význam, a to v kladném i záporném smyslu. Precipitace karbidů vede ke zkřehnutí a snížení odolnosti vůči mezikrystalové korozi. Na druhou stranu může v některých případech docházet k velmi výraznému zpevnění (vytvrditelné austenitické oceli), které je způsobeno přítomností legujících prvků. [5]

### **4.3 Austenitizace**

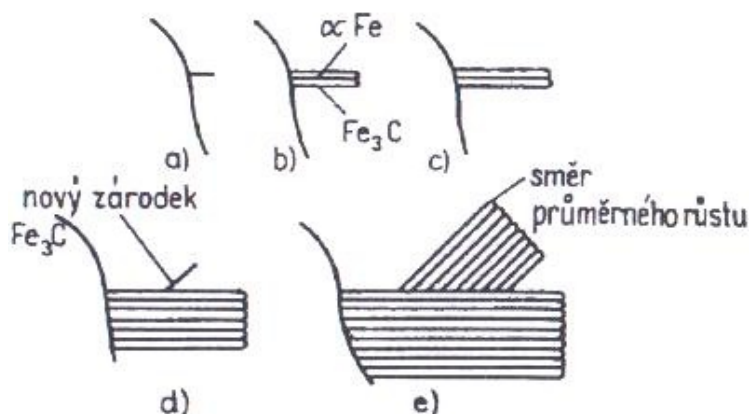
Rovnovážná struktura uhlíkových ocelí je za pokojové teploty tvořena směsí feritu a perlitu (podeutektoidní oceli) nebo perlitu a cementitu (nadeutektoidní oceli). Tyto struktury lze s ohledem na složení perlitu označit společným názvem feriticko-cementitické. Tuto strukturu mají rovněž oceli slitinové, s výjimkou bohatě legovaných austenitických, feritických a martenzitických.

Austenitizace je základním procesem při všech postupech překrytizačního tepelného zpracování daných ocelí. Spočívá v ohřevu nad kritické teploty a přeměně feriticko-cementitické struktury na austenitickou. Důležitými pochody jsou tvorba a homogenizace austenitu a následný růst austenitického zrna. Austenitizace probíhá v rozmezích teplot  $Ac_1$  až  $Ac_3$  nebo  $Ac_1$  až  $Ac_m$  (viz. Obr. 9). Začíná přeměnou perlitu v austenit a je následována postupnou přeměnou feritu (sekundárního cementitu) v austenit při zvyšování teploty nad  $Ac_1$ . Jedná se o difuzní přeměnu, která probíhá tvorbou zárodků a jejich růstem. Průběh austenitizace je ovlivněn nejen teplotou a rychlostí ohřevu, ale i výchozí strukturou a složením oceli. Nejrychleji probíhá přeměna u ocelí se strukturou jemného sorbitu, pomaleji v případě jemného perlitu a nejpomaleji u hrubého zrnitého perlitu. Rostoucí obsah uhlíku urychluje průběh procesu. Přísady karbidotvorných prvků naopak proces zpomalují. [5]

## 4.4 Přeměny austenitu

### 4.4.1 Perlitická přeměna

Perlitická přeměna začne probíhat, pokud je ochlazován austenit pod teplotu  $A_{c1}$  do asi  $550^{\circ}\text{C}$ . Jedná se o přeměnu difuzní (pohybovat se mohou atomy uhlíku i železa). Nejdříve se na hranicích zrn austenitu vytvoří zárodek lamely cementitu (Obr. 5a), v důsledku toho dojde v okolí k úbytku C, což vytváří předpoklady pro nukleaci lamel feritu na vzniklé lamele cementitu (Obr. 5b).



Obr. 5 Schéma nukleace a růstu perlitických nodulí [5]

Na Obr. 5c již jsou plně vzrostlé lamely feritu s nukleovanými lamelami cementitu. Obr. 5d pak zobrazuje vzniklou noduli, na níž se tvoří zárodek odlišně orientovaného cementitu. Na Obr. 5e jsou pak dvě nodule, přičemž ta novější dosud ve stadiu růstu. [5]

### 4.4.2 Bainitická přeměna

Začne probíhat, pokud rychle ochladíme austenit pod teplotu  $550^{\circ}\text{C}$ , aby neproběhla perlitická přeměna. Přeměna je částečně difuzní, protože atomy železa se nemohou pohybovat, pouze atomy uhlíku.

Při ochlazení austenitu nad teploty mezi  $550$  až  $350^{\circ}\text{C}$  vznikne tzv. *horní bainit*. Nejprve na hranicích zrn austenitu začne vznikat lamelka feritu, na které důsledkem difuze vznikají destičky cementitu. Tento proces se opakuje, dokud se celý objem austenitu nepřemění na horní bainit.

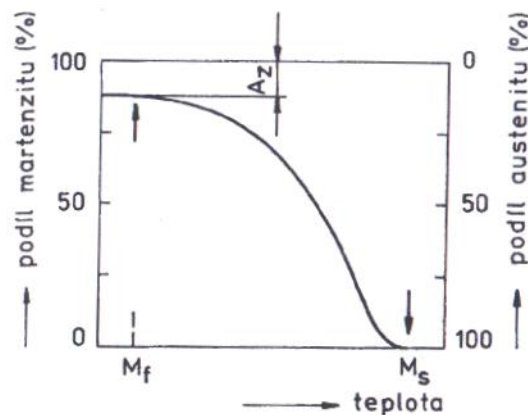
Při ochlazení austenitu na teploty mezi  $350$  až  $200^{\circ}\text{C}$  se přemění austenit tzv. *dolní bainit*. Na hranicích zrn austenitu nejprve začne vznikat lamela feritu. Následně začnou na lamelách feritu nukleovat zrna cementitu (Obr. 6).



Obr. 6 Struktura bainitu [4]

#### 4.4.3 Martenzitická přeměna

Martenzitická transformace začne probíhat při velmi rychlém ochlazení austenitu pod  $200^{\circ}\text{C}$ . Jedná se o bezdifuzní přeměnu, která proběhne tzv. smykovým mechanismem, kdy přestanou platit původní vazby mezi atomy. Dojde ke změně krystalické mřížky a vzniku nových vazeb. Austenit se během procesu přeměny na přesycený tuhý roztok uhlíku v  $\text{Fe}\alpha$ , tzv. *martenzit*. Martenzit je velmi tvrdou strukturou, avšak jeho vznik je doprovázen vznikem velkých vnitřních pnutí. [2]



Obr. 7 Martenzitická křivka [4]

Na Obr. 7 je znázorněn průběh martenzitické transformace. Na počátku transformace, v bodě  $M_S$  je podíl austenitu 100%. Při ochlazení se pak většina austenitu přemění na martenzit. Část struktury se na martenzit nepřemění a zůstane tak zbytkový austenit, jehož podíl je označen  $A_Z$ . Konec martenzitické transformace je označen  $M_f$ .

Podíl vzniklého martenzitu závisí na mnoha aspektech, např. na obsahu uhlíku (viz. Obr. 11), přičemž se zvyšujícím se podílem martenzitu se zvyšuje tvrdost. Což má za následek snížení schopnosti materiálu snášet napětí způsobená plastickou deformací. Zbytkový austenit pak může u některých zakalených ocelí zlepšovat tvárnost a houževnatost. [4]

## 5 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN ŽELEZA

Ocel, která projde procesem kování nebo válení za tepla je v tzv. surovém stavu, v němž nejsou jednoznačně určeny její vlastnosti a který je zpravidla nedostačující pro další použití. V surovém stavu používáme pouze oceli nízkouhlíkové, a to v méně důležitých případech. Vzhledem k tomu, že u ocelí při ohřevu dochází k překrystalizaci (změně krystalické mřížky), je možné tepelným zpracováním významně měnit její strukturu a vlastnosti.

Tepelným zpracováním tedy nazýváme proces, při němž se řízeně využívají fázové a strukturní přeměny v tuhém stavu a jenž má za cíl dosáhnout požadovaných mechanických, technologických a dalších užitečných vlastností, ať už výrobků, či polotovarů. Z elementárního pohledu spočívá v podstatě ve třech krocích, jimiž jsou ohřev materiálu, výdrž na teplotě a následné ochlazování. Přičemž velmi záleží na teplotě ohřevu, době výdrže a rychlosti ochlazování.

Tepelné zpracování slitin železa lze rozdělit na:

- Tepelné zpracování (dále TZ)
- Chemicko – tepelné zpracování (CHTZ)
- Tepelně – mechanické zpracování (TMZ)

Při tepelném zpracování je zpravidla využíváno řízených změn teploty (TZ), dále změn chemického složení povrchových vrstev a teploty (CHTZ) nebo změn teploty a následků plastických deformací (TMZ). U technologií TZ se bere v potaz konkrétní velikost a tvar zpracovávaných součástí, požadavky na kvalitu povrchu (oduhlíčení, okujení apod.), dále rozměrovou a tvarovou stabilitu, včetně jejich integrity. Během tepelného zpracování může vzniknout vnitřní pnutí, jež dosáhne takové úrovně, že dojde k plastické deformaci, která způsobí vznik trhlin.

Při tepelném zpracování můžeme dosáhnout rovnovážné nebo nerovnovážné struktury, což závisí na rychlosti ochlazování.

Je-li rychlost ochlazování nižší než kritická, dosahujeme u oceli rovnovážného strukturního stavu. Toho lze dosáhnout TZ, jež označujeme jako žíhání.

Naopak velmi nerovnovážný stav vzniká (při rychlosti nadkritické) v důsledku martenzitické, případně bainitické přeměny, jež je součástí dalšího typu TZ, jímž je

kalení. Po kalení často následuje popouštění, které snižuje stupeň nerovnovážnosti zakaleného materiálu. Vznik nerovnovážné struktury je však ovlivněn více faktory, závisí zejména na chemickém složení (obsah uhlíku, chromu, niklu, manganu atd.). [5]

**Tab. 6 Přehled hlavních způsobů tepelného zpracování [5]**

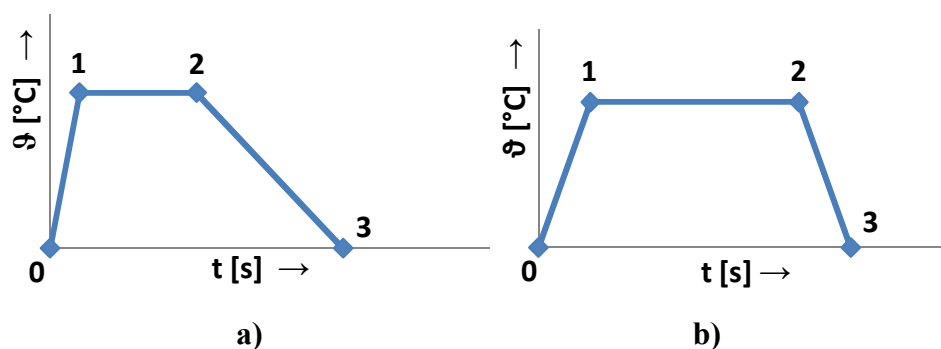
TZ	žihání	bez překrytalizace	ke snížení pnutí
			rekrytalizační
			na měkko
			protivložkové
			rozpouštěcí
			na odstranění křehkosti po moření
	s překrytalizací	homogenizační	
		normalizační	
		izotermické	
		kombinované	
	kalení	martenzitické	do studené lázně (přímé, lomené, přerušované)
			do teplé lázně (termální)
se zmrazováním			
povrchové kalení			
bainitické		do studené lázně	
	do teplé lázně (izotermické zušlechťování)		
popouštění	při nízkých teplotách	napouštění	
	při vysokých teplotách	(anizotermické) zušlechťování	
CHTZ	vytvoření tvrdých povrchových vrstev	sycení povrchu nekovy	cementování
			nitridování
			nitrocementování
			karbonitridování
TMZ	využití účinků plastické deformace a fázové přeměny	deformace před fázovou přeměnou	deformace austenitu před martenzitickou přeměnou (nízkoteplotní - NTMZ, vysokoteplotní - VTMZ)
		deformace během izotermické fázové přeměny	deformace během perlitické, popř. bainitické přeměny

## 5.1 Ohřev

Nedílnou součástí TZ je ohřev, k tomu slouží zpravidla:

- průmyslové pece
- lázně roztavených solí, kovů nebo slitin

V průmyslových pecích (komorové, šachtové, vozové) se využívá buď vzdušné atmosféry (elektrické pece) nebo atmosféry tvořené zplodinami vznikajícími při hoření (plynové pece). Nežádoucím jevem v atmosféře pece je oxidace (tvorba okují) a oduhličování, tyto procesy jsou způsobeny vzdušným kyslíkem. Z toho důvodu je v kusové výrobě využíváno různých nátěrů a zábalů. Dokonalejším (avšak i nákladnějším) způsobem je využití ochranných atmosfér plynů (inertní směs CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O, inertní plyny - N, Ar) nebo ohřevu ve vakuu (10<sup>-4</sup> až 10<sup>-8</sup> Pa). U menších předmětů, obvykle z legovaných ocelí, je ohřev zajištěn prostřednictvím lázni roztavených solí (dusičnany, dusitany, chloridy), roztavených kovů (Pb) nebo slitin (Pb – Sn). [5]



Obr. 8 Průběh tepelného zpracování [autor]

a) Pomalé ochlazování, b) rychlé ochlazování

|01| – ohřev, |12| – výdrž, |23| – ochlazování

Při ohřevu slitiny obsahující segregát, dochází v momentu překročení segreganční teploty k rozpouštění segregátu na tuhý roztok. To vyžaduje určitou dobu, která závisí na míře překročení segreganční teploty. Čím více překročíme segreganční teplotu, tím rychleji dojde k homogenizaci tuhého roztoku. Při ohřevu nad kritické teploty  $Ac_1$ ,  $Ac_3$ , proběhne fázová přeměna, tzv. *austenitizace* (viz. kap. 4.3). Při překročení teploty  $Ac_1$ , dojde k přeměně perlitu na austenit a v rozmezí  $Ac_1$  a  $Ac_3$  se i ferit přemění na austenit.

Tyto děje však neproběhnou okamžitě, avšak časový interval ve kterém proběhnou, bude tím kratší, čím vyšší bude překročení teploty fázové přeměny.

Při dosažení teploty  $Ac_1$  vznikají u *eutektoidních ocelí* austenitická zrna na zárodcích z lamel perlitického feritu a cementitu. Cementit se rozpouští ve vzniklém austenitu druhotně. Při malém překročení teploty  $Ac_1$  nebo při krátkých časech dochází ke vzniku nehomogenního austenitu s dosud nerozpuštěnými lamelami cementitu. Až

v okamžiku zásadního překročení teploty  $A_{c1}$  nebo po delší době vzniká homogenní austenit.

U *podeutektoidních ocelí* dochází nejdříve k přeměně perlitu na nehomogenní austenit a teprve poté dojde k přeměně feritu na austenit. Avšak i v tomto případě musí být značně překročena teplota  $A_{c3}$  nebo je nutná dostatečně dlouhá výdrž na teplotě, aby došlo ke vzniku homogenního austenitu.

V případě *nadeutektoidních ocelí* je průběh přeměny v podstatě stejný jako u *podeutektoidních ocelí*, pouze teplota  $A_{c3}$  je nahrazena teplotou  $A_{cm}$  a ferit nahrazen sekundárním cementitem.

U *legovaných ocelí* dochází při austenitizaci po rozpuštění cementitu ještě k rozpouštění karbidů legujících prvků. Až poté vznikne homogenní austenit. Z toho důvodu mohou být u vysokolegovaných ocelí austenitizační teploty vyšší než u ocelí nelegovaných. Změny struktury však nekončí překrytací nebo rozpouštěním segregátu. Při dalším zvyšování teploty a prodlužování výdrže na teplotě dochází k růstu zrna. Navzdory tomu, že po překrytací vzniká jemnozrnný austenit, při setrvání na teplotách nad  $A_{c3}$  u ocelí tzv. hrubozrnných dochází k rychlému zhrubnutí zrna. U ocelí jemnozrnných naopak dojde k zhrubnutí austenitického zrna až při podstatně vyšších teplotách.

Velikost austenitického zrna je ovlivněna zejména výrobou a z menší části tvářením za tepla a předchozím tepelným zpracováním. Je velmi důležitá u legovaných ocelí, má velký vliv na některé vlastnosti. Jemnější zrno znamená horší tvárnost a obrobiteľnosť, avšak vyšší tažnosť, zúžení, houževnatost a menší vnitřní pnutí, ale i nižší tvrdost, výrazně menší prokalitelnost, apod. Jemnozrnnost může vést k nežádoucímu zhoršení jmenovaných vlastností (tvárnost, prokalitelnost, atd.), ale nadměrná hrubozrnnost vždy vede ke zhoršení vlastností v nepřijatelné míře. [2]

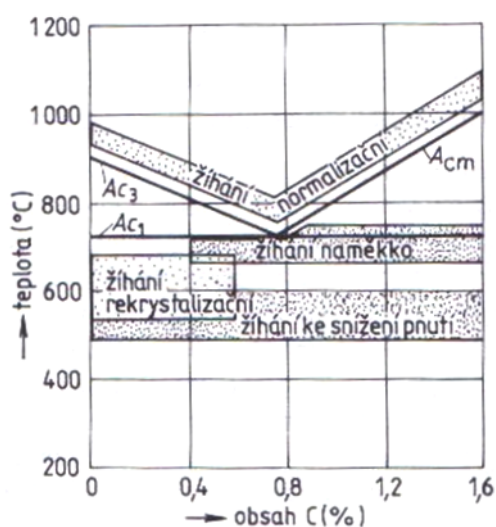
## 5.2 Ochlazování

Rychlosti ochlazování bývají v praxi výrazně vyšší než předpokládá rovnovážný diagram. Difuzní pochody jsou tím více či méně brzděny a slitiny se nacházejí zpravidla v nestabilním stavu, tzn. ve stavu, který neodpovídá rovnovážnému diagramu. Nestabilní stav slitin má však výhodné vlastnosti, kterých často využíváme. Pokud zvýšíme rychlost ochlazování nad jistou kritickou mez, je možné difuzní pochody zcela potlačit. [2]

### 5.3 Žihání

Podstatou žihání je dosáhnout struktur, tvořených rovnovážnými fázemi. Roli zde hraje rovnoměrný ohřev součásti na žihací teplotu, která se různí dle způsobu žihání (viz. Obr. 9). Následuje výdrž na teplotě a po ní pomalé ochlazování, jehož rychlost zpravidla odpovídá rychlosti ochlazování na klidném vzduchu.

Ve většině případů jde u žihání o snahu vytvořit jemnozrnnou strukturu s dobrou tvárností, houževnatostí a neméně důležitou obrobiteľností. Při použití vhodných způsobů lze dosáhnout vyšší úrovně homogenity, odstranit nežádoucí prvky a snížit vnitřní pnutí.



Obr. 9 Oblasti žihacích teplot v rovnovážném diagramu Fe – Fe<sub>3</sub>C [2]

Žihání může být v technologickém postupu:

- přípravná operace
- tzv. mezižihání (které zařazujeme vprostřed procesu např. pro lepší obrobiteľnost nebo obnovu plasticity při tváření za studena).
- finální operace tepelného zpracování, která stanovuje vlastnosti daného materiálu výrobku či polotovaru.

Postupy žihání se pro polymorfní oceli dělí na žihání:

- bez překrytalizace
- s překrytalizací [5]



### 5.3.1 Žihání bez překrystalizace

Tyto způsoby žihání se pohybují pod teplotou  $Ac_1$  u polymorfních ocelí, u nichž dochází ke strukturním změnám (např. sferoidizace a koagulace karbidů, zotavení, rekrytalizace nebo i růst feritických zrn, segregace), přičemž rozsah fázových přeměn lze považovat za nevýznamný (s výjimkou rozpouštění terciálního cementitu nebo jiných minoritních fází).

V případě nepolymorfních vysocelegovaných ocelí jde vždy o žihání bez překrystalizace. Jak roste teplota, dochází k rozpouštění karbidů a dalších vytvrzujících fází ve feritu nebo austenitu těchto ocelí. [5]

#### *a) Žihání ke snížení pnutí*

Jeho účelem je snížit nebo odstranit vnitřní pnutí, k jehož vzniku dochází v součástech při předchozích technologických operacích. Například v důsledku místního ohřevu při svařování, při tváření za studena (rovnání), při třískovém obrábění nebo při nerovnoměrném ochlazování tvarově složitých a rozměrných součástí (odlitek, výkovků). Proces sestává z ohřevu na teplotu mezi 500 až 650 °C, výdrže na dané teplotě po dobu 1 – 10 h (dle velikosti a tvaru součásti), následované pomalým ochlazováním (aby nevzniklo nové vnitřní pnutí) v peci na teplotu 250 až 300 °C, po němž se součást dochládí na vzduchu. K dosažení rovnoměrného ohřevu je vhodné využívat peci s nucenou cirkulací atmosféry. [5]

#### *b) Žihání na měkko*

Účelem tohoto typu žihání je zejména zlepšení obrobiteľnosti a snížení tvrdosti při dosažení struktury s převažujícími globulárními karbidy. Používá se nejčastěji pro nástrojové oceli, ale i u některých konstrukčních a legovaných ocelí.

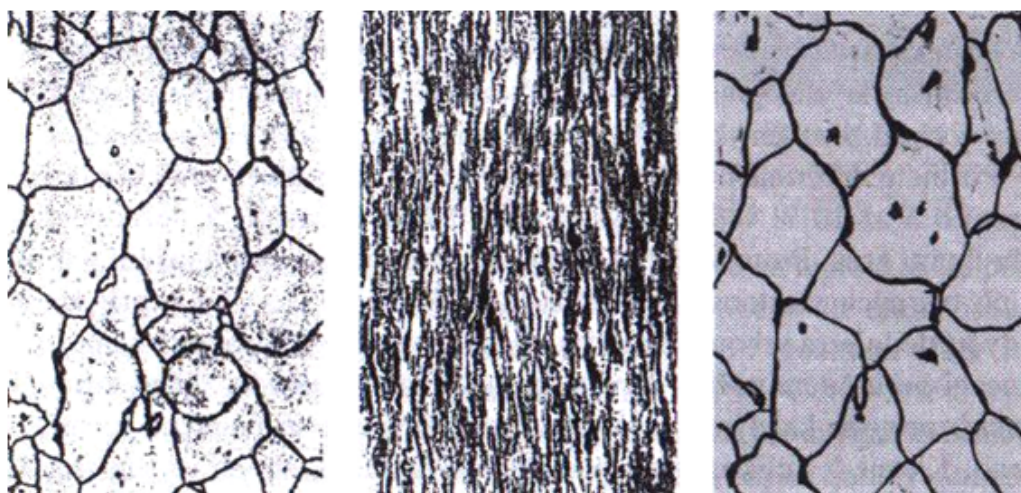
Žihání pondeutektoidní oceli spočívá v ohřevu na teplotu těsně pod  $Ac_1$ , následuje výdrž na teplotě (2 až 8 i více hodin v závislosti na druhu oceli) a pomalé ochlazování v peci na teplotu mezi 450 až 550 °C, při rychlosti ochlazování nižší než 50 °C·h<sup>-1</sup>. Pakliže není požadavek na snížení vnitřních pnutí, dochlazuje se na vzduchu. Při žihací teplotě se vlivem povrchového napětí lamely cementitu a dalších karbidů sbalí do kuliček, čímž vznikne globulární (zrnitý) perlit. Struktura globulárního perlitu má dobrou obrobiteľnost. Je též výhodná pro kalení, poněvadž před kalením dojde při

ohřevu nad  $Ac_1$  popř.  $Ac_3$  k dokonalému rozpuštění karbidů v austenitu a vznikne homogenní austenit.

U ocelí nadeutektoidních a některých legovaných bývá ohřev těsně nad  $Ac_1$ , popř. kolem  $Ac_1$ . Ochlazování probíhá pomaleji než u prvního uvedeného případu. [2]

### *c) Rekrystalizační žihání*

Rekrystalizace je proces obnovení deformovaných zrn beze změny krystalografické mřížky, přičemž dochází ke zjemnění zrna a odstranění zpevnění, způsobeného předchozím tvářením za studena. Používá se v průběhu tváření za studena jako mezioperační žihání, zpravidla u ocelí s nízkým obsahem uhlíku. Skládá se z ohřevu na teplotu rekrystalizace (oblast 550 až 700 °C), výdrže závisující na zpracovávaném polotovaru (desítky sekund až po 1 i více hodin) a ochlazování, na jehož rychlosti již tolik nezáleží. Žihací teplota a doba výdrže závisí na stupni deformace a původní a požadované velikosti zrna. Platí, že čím vyšší je stupeň deformace, tím nižší je rekrystalizační teplota. Teplota nesmí překročit  $Ac_1$ , jinak dojde k překrytalizaci. K zabránění oxidace povrchu se žihání provádí zpravidla v ochranné atmosféře. [2]



**Obr. 10 Rekrystalizační žihání – struktury [2]**

Na Obr. 10 vlevo je struktura ocelového pásu (z hlubokotažné oceli s obsahem 0,06 % C) válcovaného za tepla, na hranicích zrn feritu jsou vyloučené karbidy (500krát zvětšeno). Uprostřed obrázku je ocelový pás válcovaný za studena. Zrna feritu jsou tvářením velmi protažena (100krát zvětšeno). Vpravo je prostřední pás, avšak po rekrystalizačním žihání, zrna feritu stejnoměrná a zjemněná vlivem uvedeného tepelného zpracování (1000krát zvětšeno).

V některých případech může docházet ke zhrubnutí zrna. Např. zmenšujeme – li průřez o 5 až 10% při malých deformacích za studena. V takovém případě se použije pro obnovení tvárnosti normalizační žíhání. I v případech, kdy opakujeme rekrytalizační žíhání vícekrát po sobě, musíme po určitém počtu opakování zařadit normalizační žíhání (neboť zrna je vlivem procesu již příliš jemné), abychom obnovili tvárnost za studena. Příkladem je hluboké tažení na více tahů při výrobě ocelových nábojnic. [2]

#### ***d) Protivločkové žíhání***

Tento typ žíhání má za cíl zabránit vzniku vnitřních trhlin v oceli, které jsou pro svůj specifický tvar nazývány vločkami. Vločky jsou zpravidla způsobeny tlakem vodíku, který je uvnitř polotovaru. Z toho důvodu se výkovky nebo vývalky přímo z tvářecí teploty umísťují do vychlazovací pece, kde zvolna chladnou. Pomalé ochlazování umožňuje vodíku difundovat ven z materiálu. Platí, že čím je výrobek větší, tím více obsahuje vodíku a tím se zvyšuje doba potřebná k ochlazení. Při tuhnutí (ochlazení) klesá rozpustnost vodíku v oceli a mění se koncentrace vodíku. Vodík se soustřeďuje ve zbývající tavenině, proto je jeho množství nejvyšší uprostřed ingotu, neboť střed ztuhne až na závěr.

U hotových materiálů, které nejsou dále tvářeny, musí být ochlazování velmi pomalé a nesmí se ukončit při teplotách vyšších než 150 °C. Doba potřebná k žíhání velmi rozměrných výkovků z ocelí náchylných k vločkovitosti je pak několik dní až týden.

Na vzniku vloček se však podílejí i pnutí, vznikající při tvářením, ochlazením a fázové přeměně. Ke vzniku vloček jsou náchylné zejména oceli chromniklové a chromové. Největší pnutí vznikají při martenzitické přeměně (viz. kap. 4.4.3). [3]

#### ***e) Žíhání pro odstranění křehkosti po moření***

Moření je proces, při němž se odstraňují z povrchu ocelových součástí okuje. Avšak během moření dochází k nežádoucí difuzi uvolňovaného vodíku do kovu, což má za následek křehnutí. Difuze vodíku do oceli je vzhledem k podmínkám moření omezená, přesto se při procesu nějaká část uvolní. Odstranit vodík z kovu je pak možné žíháním při teplotách 300 až 500 °C po dobu 1 až 4 hodin. [5]

### ***f) Rozpouštěcí žíhání***

Má za účel rozpustit v tuhém roztoku nepolymorfních ocelí minoritní fáze (karbidy, nitridy). Rychlost ochlazování volíme tak, abychom potlačili opětovné vyloučení těchto fází. Tím zůstane zachována homogenní struktura o veliké tvárnosti, houževnatosti a odolnosti vůči korozi. Žihací teploty bývají u nepolymorfních ocelí až 1100 °C. Ochlazování se uskutečňuje proudem vzduchu, případně pomocí lázni (olej, voda), to závisí na velikosti a složitosti součásti.

U ocelí polymorfních se ohřevem na teploty pod  $A_{c1}$  a následným rychlým ochlazením odstraní nežádoucí důsledky stárnutí ocelí. [5]

### **5.3.2 Žíhání s překrystalizací**

Proces žíhání probíhá nad teplotou  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$  nebo  $A_{cm}$ . Nebo kombinovaně. Nad teplotou  $A_{c3}$  se žihají podeutektoidní oceli. A oceli nadeutektoidní při teplotách nad  $A_{cm}$  nebo v oblasti mezi  $A_{c1}$  a  $A_{cm}$ . Při tomto žíhání dochází k úplné nebo téměř úplné přeměně výchozí struktury feriticko – cementitické na austenit. [2]

#### ***a) Homogenizační (difuzní) žíhání***

Z názvu je zřejmé, že tento druh žíhání se provádí s účelem maximálně homogenizovat chemické složení, čehož se dosahuje difuzí. Proces spočívá v ohřevu vysoko nad  $A_{c3}$  a  $A_{cm}$ , mezi teploty 1000 až 1250°. Výdrž na teplotě závisí na hrubosti dané struktury, může být 6 i více hodin. Poté následuje pomalé ochlazování. Výhodné je spojit žíhání s ohřevem k tváření, přičemž se pouze prodlouží výdrž na dané tvářecí teplotě o 2 až 4 hodiny.

Avšak vysokoteplotní dlouhodobý ohřev má za následek výraznou oxidaci, oduhlíčení povrchu a zhrubnutí austenitického zrna. Zjemnění se pak dosahuje tvářením za tepla, po němž následuje rekrystalizace nebo normalizace.

#### ***b) Normalizační žíhání (normalizace)***

Účelem je zjemnění hrubého austenitického zrna. Vhodné je zvláště pro uhlíkové a nízkolegované oceli. Normalizace se využívá zpravidla u výkovků, svařenců a odlitků.

Podeutektoidní oceli ohříváme 30 až 50 °C nad  $A_{c3}$ , ochlazení pak probíhá na vzduchu (normalizace) nebo pozvolně v peci (normalizační žíhání), které udržuje vnitřní pnutí co nejnižší.

Nadeutektoidní oceli se normalizačně žíhají pouze výjimečně. Pokud ano, slouží k odstranění karbidického síťoví na hranicích zrn, které je způsobeno pomalým ochlazováním po tváření. Probíhá tedy ohřevem 30 °C nad  $A_{cm}$ , následuje rychlé ochlazení pod 700 °C, poté probíhá ochlazování pomalu, aby nedošlo k zakalení a vzniku vnitřních pnutí.

Normalizační žíhání může tedy také snížit vnitřní pnutí, snížit pevnost a zlepšit plastické vlastnosti oceli.

#### ***c) Izotermické žíhání***

Účelem je zlepšit obrobiteľnosť, tváriteľnosť a jakost povrchu. Ohřev bývá obvykle 30 až 50 °C nad  $A_{c3}$ , resp.  $A_{cm}$ , následuje výdrž na teplotě a ochlazení. Čím vyšší je teplota izotermické přeměny, tím déle přeměna trvá a tím nižší je tvrdost materiálu.

U ocelí nadeutektoidních se využívá k žíhání na měkko. [3]

#### ***d) Kombinované žíhání***

Bývá složeno z normalizačního žíhání, po němž bezprostředně následuje žíhání bez překrytality (žíhání na měkko nebo ke snížení pnutí). Využívá se často u vysokouhlíkových nebo legovaných ocelí namísto žíhání s ochlazováním v peci. [5]

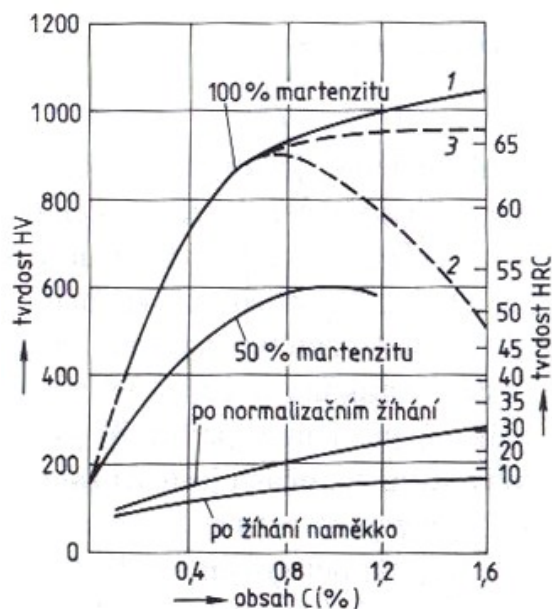
## **5.4 Kalení**

Je druhem tepelného zpracování, které se provádí za účelem zvýšení tvrdosti. Skládá se z ohřevu nad  $A_{c3}$ , resp.  $A_{c1}$ , výdrže na dané teplotě a rychlého ochlazení, které potlačí rovnovážné přeměny. Rychlé ochlazení způsobí přeměnu austenitu na bainit nebo martenzit. Podle toho rozlišujeme kalení martenzitické a bainitické. [3]

### **5.4.1 Kalitelnost, zakalitelnost, prokalitelnost**

- *Kalitelnost* je schopnost oceli dosáhnout kalením zvýšené tvrdosti. Za dobře kalitelné považujeme nelegované oceli s obsahem uhlíku vyšším než 0,35%, za nekalitelné pak při obsahu nižším než 0,2 % C.
- *Zakalitelnost* je schopnost oceli dosáhnout při nadkritické ochlazovací rychlosti maximální tvrdosti.

- *Prokalitelnost* je schopnost oceli dosáhnout do určité hloubky kalením tvrdosti, jež odpovídá kalitelnosti dané oceli při 50% obsahu martenzitu. Prokalitelnost se pak určuje zkouškami prokalitelnosti. [2]



Obr. 11 Tvrdost nelegovaných ocelí v závislosti na obsahu uhlíku [2]

1 – maximální teoretické hodnoty po kalení, 2 – po kalení z teploty nad  $A_{cm}$  (martenzit a zbytkový austenit), 3 – po kalení z teploty nad  $A_{c1}$ .

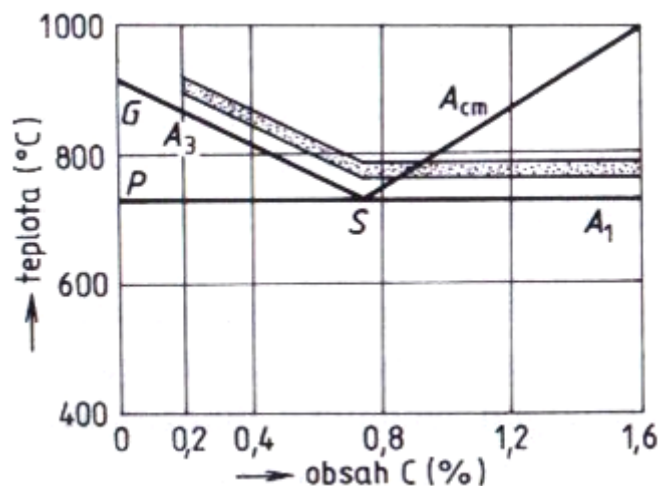
Obr. 11 znázorňuje tvrdost nelegované oceli ve stavu kaleném a žíhaném v závislosti na obsahu uhlíku. Můžeme vidět, že tvrdost se zvyšuje se zvyšujícím se obsahem uhlíku.

#### 5.4.2 Kalicí teplota

Správná kalicí teplota (viz. Obr. 12) se u podeutektoidních ocelí pohybuje cca 20 °C nad  $A_{c3}$ . V případě nadeutektoidních ocelí je to přibližně 20 °C nad  $A_{c1}$ . U legovaných nadeutektoidních ocelí s vysokým podílem karbidotvorných prvků, je teplota dána rozpustností karbidů, např. pro rychlořezné oceli až 1320 °C.

Dojde – li u podeutektoidních ocelí k velkému snížení kalicí teploty, projeví se to výskytem feritu v martenzitu, což vede ke snížení tvrdosti. Při menším snížení kalicí teploty nebo při krátké výdrži na teplotě nedojde ve struktuře k dostatečné homogenizaci austenitu, což vede ke vzniku troostitu, který také snižuje tvrdost.

Naopak překročení správné kalicí teploty nebo příliš dlouhá doba výdrže se projeví vznikem hrubého martenzitu, který je výrazně křehčí než jemný martenzit. Také se zvýší množství zbytkového austenitu, což vede ke snížení tvrdosti. [3]



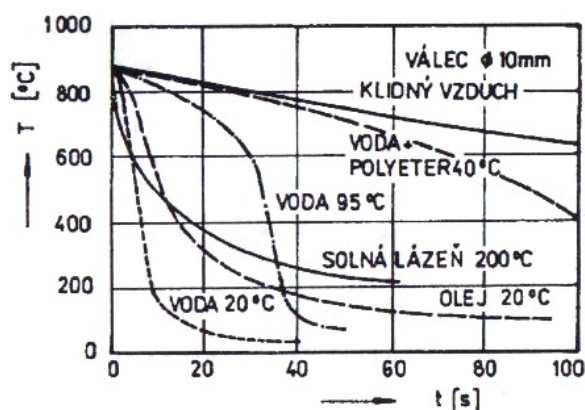
Obr. 12 Kalicí teploty v diagramu Fe – Fe<sub>3</sub>C [2]

### 5.4.3 Kalicí prostředí

Kalení má za cíl dosáhnout martenzitické struktury v předem dané části průřezu, kde musí být ochlazovací rychlost nadkritická. Nejvhodnějším ochlazovacím prostředím je takové, které umožňuje ochlazování rychlostí mírně nad úrovní kritické rychlosti. Protože příliš velká rychlost ochlazování vede k nežádoucímu zvýšení vnitřních prnutí.

**Základními typy kalících prostředí jsou:**

- Voda
- Olej
- Vzduch
- Lázně roztavených kovů



Obr. 13 Křivky ochlazování středu ocelového válce [5]

Na Obr. 13 jsou zobrazeny křivky ochlazování středu ocelového válce. Podle těchto křivek můžeme snadno porovnávat rychlosti ochlazování v jednotlivých prostředích.

Účinnost ochlazování závisí zejména na tepelné vodivosti, měrném a výparném teple a také na viskozitě prostředí.

Voda je nejstarším, nejlevnějším a nejpoužívanějším kalícím prostředím. Je to kalící prostředí nehořlavé a intenzivně působící. Nežádoucím jevem je tvoření parního polštáře při ponoření součásti do vody. Ten lze však odstranit pohybem součásti nebo vody. Při zvyšování teploty vody účinnost ochlazování klesá. Ochlazovací účinnost lze však zvýšit pohybem vody, přísadami kyselin ( $H_2SO_4$ ), solí ( $NaCl$ ,  $NaNO$  a  $KNO_3$ ) nebo louhu ( $NaOH$ ). Ochlazovací účinek vody lze regulovat i přidáním ve vodě rozpustných polymerů (polyalkylenglykoly, polyakryláty, polyvinylpyrollidony). S přísadami polymerů je ochlazování pomalejší a rovnoměrnější, nevznikají trhliny, měkká místa a deformace. Roztoky polymerů se však musí chránit před znečištěním a bakteriálním napadením.

Olej je ochlazovací prostředí mírnější než voda. Rychlost ochlazování v olejích je ve srovnání s vodou 3 až 4 krát nižší v perlitické oblasti a až 10 krát nižší v martenzitické oblasti. Ochlazovací účinnost se však se zvyšováním jeho teploty nemění. Problém s parním polštářem je i zde, avšak menší než u vody. Olej se používá zejména pro kalení legovaných ocelí. Nejčastěji se používají minerální oleje s aditivy, s nízkou viskozitou, předeřáté na  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . Méně používané jsou syntetické oleje, které mají delší životnost, lépe splňují kritéria bezpečnosti a méně zatěžují životní prostředí. Nevýhodou olejů je všeobecně zátěž životního prostředí, požadavky na bezpečnost a ochranu zdraví při práci. Olej by měl být také čirý a čistý, proto je třeba jej čistit, neboť během používání se znečišťuje (uhelnatí, pryskyřičnatí).

Vzduch je nejmírnější ochlazovací prostředí, ochlazování probíhá plynule. Používá se při kalení vysokolegovaných tzv. samokalitelných ocelí, např. rychlořezných (19 800). Účinnost lze zvýšit prouděním vzduchu, případně přidáním vody (vodní mlha).

Ve specifických případech se používají teplé lázně, a to pro termální kalení a izotermické zušlechťování. Jedná se o taveniny kovů jako je např. Pb nebo Pb a Sn. Nebo také taveniny solí, případně olejové lázně (do  $250\text{ }^\circ\text{C}$ ). Ochlazovací účinnost roztavených solí je relativně nízká a klesá s jejich teplotou. Lze ji zvýšit cirkulací nebo přidáním vody, a to až do 0,5 %.

Pro hodnocení kalících prostředí je nejdůležitějším hlediskem intenzita ochlazování. V dnešní době je však kladen čím dál větší důraz na fyziologickou nezávadnost,



ekologickou neškodnost, snadnou omyvatelnost a odolnost proti tepelnému zatížení, oxidaci a stárnutí.

V některých případech se používají k chlazení kalící čelisti. Jedná se o ocelové nebo měděné desky s vnitřním chlazením (průtokem vody). Jejich použití je vhodné pro tvarově jednoduché (zpravidla ploché) součásti, kde je požadavek na minimalizaci deformací. [5]

#### **5.4.4 Způsoby kalení**

Způsob kalení, který zvolíme se odvíjí od vlastností, které požadujeme po dané součásti. Závisí i na velikosti, tvaru a druhu oceli. Plynulé ochlazování probíhá ve studené lázni o pokojové teplotě. Pro přetržité kalení se používá dvou prostředí pokojové teploty, avšak s rozdílnou intenzitou ochlazování nebo teplé lázně. Různé varianty ochlazování dokáží snížit vnitřní pnutí, což znamená menší deformace a omezení vzniku trhlin.

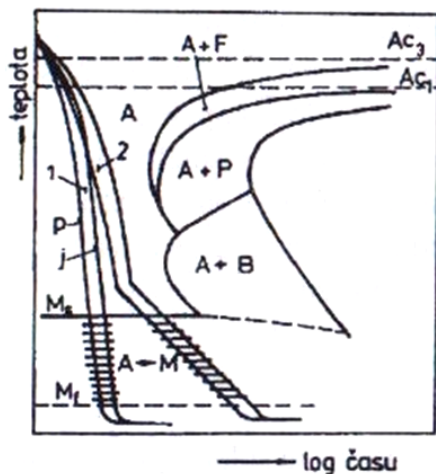
##### ***a) Martenzitické kalení do studené lázně***

Nejpoužívanější a nejjednodušší způsob kalení. Kalicím prostředím je voda, olej nebo vzduch. Proces je technologicky nenáročný a relativně levný. Nevýhodou je vznik velkých vnitřních pnutí (po kalení do vody), která vedou k deformacím a praskání kalených součástí. [5]

##### ***b) Přerušované kalení (lomené)***

Princip spočívá v prudkém ochlazení (v rychlejším kalicím prostředí) těsně nad teplotu  $M_s$ , čímž se zabrání perlitické přeměně. Následuje přemístění součásti do mírnějšího ochlazovacího prostředí, kde dojde k dochlazení a vzniku martenzitu. Kombinace kalicích prostředí mohou být např. voda – olej, olej – vzduch, ve výjimečných případech voda – vzduch.

Tento způsob kalení nachází uplatnění u součástí, které je třeba rychle zchladit, avšak při úplném ochlazení ve vodě nebo oleji praskají (zápustkově kované zalomené hřídele velkých rozměrů) vlivem vzniku velkého vnitřního pnutí. Tohoto způsobu se využívá zejména při kalení velkých nástrojů (zápustek). V každém případě, kdy ochlazení na vzduchu (oleji) nestačí k dosažení požadované tvrdosti a při kalení ve vodě (oleji) předměty praskají, je nezbytné vyzkoušet přerušované kalení. Teplota dosažená v prvním kalicím prostředí se určuje podle doby ochlazování. [3]

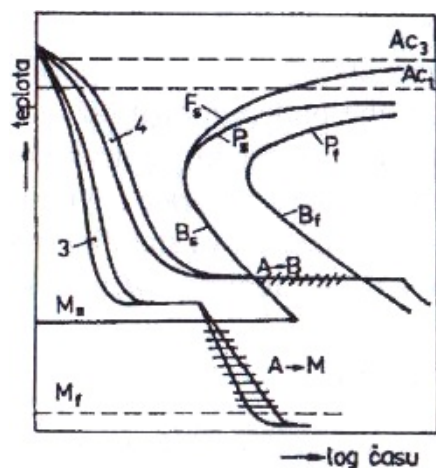


Obr. 14 Znázornění způsobů kalení v diagramu ARA [5]

Na Obr. 14 je porovnání průběhů dvou způsobů kalení. Přičemž křivka č.1 znázorňuje kalení do studené lázně (voda). Křivka číslo 2 označuje průběh lomeného kalení, kde zlom na křivce vyjadřuje okamžik změny ochlazovacího prostředí za prostředí s menší ochlazovací rychlostí. Jednotlivé křivky jsou pak navíc označeny malými písmeny, kde „p“ značí rychlost ochlazování povrchu a „j“ rychlost ochlazování jádra součásti.

### c) Termální kalení

Po ohřevu součásti následuje ochlazování (Obr. 15) v lázni o teplotě těsně nad  $M_s$  (martenzit start), které trvá tak dlouho, dokud nedojde k vyrovnání teplot mezi povrchem a středem součásti. Dostatečnou výdrží na této teplotě se zamezí vzniku teplotních pnutí. Poté je součást před počátkem bainitické přeměny vyjmuta a dochlazena na vzduchu. Termálně se kalí oceli s vhodným tvarem IRA diagramu, zejména vysokolegované (zpravidla nástrojové oceli). [3]



Obr. 15 Znázornění způsobů kalení v diagramu IRA [5]

3 – termální kalení, 4 – izotermické zušlechťování.

#### ***d) Izotermické zušlechťování***

Průběh je obdobný jako u termálního kalení (Obr. 15). Součást se po ohřevu na kalicí teplotu umístí do termální lázně (roztavených solí nebo slitin kovů), která má teplotu v oblasti bainitické přeměny (300 až 400 °C). Zde je součást tak dlouho, dokud neproběhne bainitická přeměna. Následuje ochlazení na vzduchu.

Výhodou procesu je minimální teplotní a strukturní pnutí. Tím se minimalizuje i riziko deformace a praskání součástí. Takto zušlechťované součásti se zpravidla nepopouštějí. Izotermicky se zušlechťují součásti menších průřezů z nízkolegovaných ocelí se střední prokalitelností. Lze využít i pro zušlechťování uhlíkových ocelí, ale pouze do průřezu cca 5 mm kvůli nižší intenzitě ochlazování. Pro vysokolegované oceli se tento způsob nepoužívá z důvodu příliš dlouhého trvání bainitické přeměny v lázni.

#### ***e) Izotermické kalení***

Tento způsob je obdobou izotermického zušlechťování, teplota lázně je v oblasti pod  $M_s$ , výsledná struktura je tvořena směsí martenzitu, bainitu a zbytkového austenitu. Požadovanou martenziticko – bainitickou strukturu je možné získat u ocelí s vhodným tvarem diagramu ARA.

U ocelí nízkolegovaných vysocepevných lze optimální kombinace pevnosti a houževnatosti dosáhnout popouštěním martenziticko – bainitické struktury, v níž podíl bainitu (dolního) nepřesáhne 25 objemových procent. [5]

#### ***f) Kalení se zmrazováním***

Čím vyšší je obsah uhlíku a legujících prvků, tím se snižuje poloha bodů  $M_s$  a  $M_f$  (martenzit finiš). Pokud je poloha bodu  $M_f$  nižší než je obvyklá pokojová teplota, část austenitu se nepřemění a zůstává ve struktuře. Tento tzv. zbytkový austenit má nežádoucí vliv na vlastnosti materiálu, snižuje tvrdost a při pozdější přeměně způsobuje výrazné vnitřní pnutí, což má za následek deformace hotových výrobků a vznik trhlin, a to i po značně dlouhé době od zakalení. Zbytkový austenit lze odstranit zařazením popouštění, což je nejjednodušší způsob.

Kalení se zmrazováním využíváme v případě výrobků, u kterých je vyžadována vysoká tvrdost a které jsou vyrobeny z ocelí, jež tvrdost popouštěním rychle ztrácejí. Po ohřevu na kalicí teplotu a ochlazení ve vodě nebo v oleji je výrobek navíc neprodleně

umístěn do zmrazovací lázně. Většinou stačí lázeň ze směsi lihu a tuhého oxidu uhličitého (-80 °C). Pro vysokolegované oceli se využívá tekutý dusík (-196 °C).

Dojde – li k přerušení ochlazování mezi  $M_s$  a  $M_f$ , dojde k zastavení martenzitické přeměny, která pak pokračuje až po ochlazení na výrazně nižší teploty, než při kterých bylo ochlazování přerušeno. Čím nižší je teplota, při které došlo k přerušení ochlazování a čím delší je doba přerušení, tím hůře se poté dosahuje přeměny austenitu. Když dosáhne teplota a doba přerušení určité hranice, zbytkový austenit se stabilizuje a při dalším ochlazování se již na martenzit nepřemění.

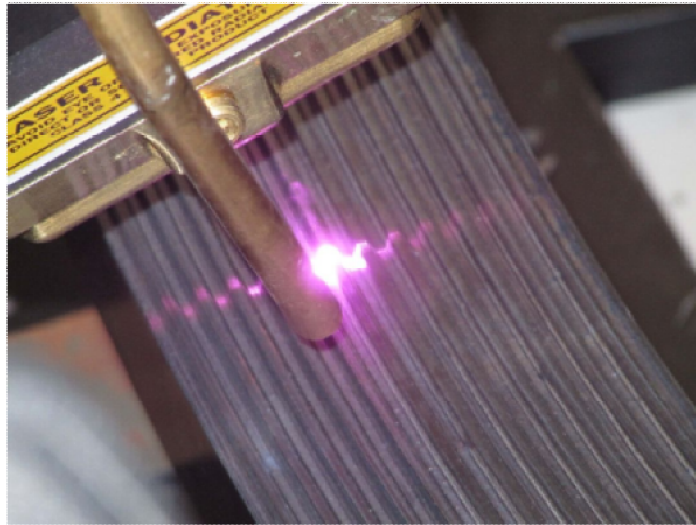
Kalení se zmrazováním se používá pro kalení valivých ložisek, měrek, kalibrů, nástrojů a některých cementovaných součástí. [2]

### ***g) Laserové kalení***

Jedná se o jeden ze způsobů povrchového kalení. Povrchového kalení se využívá za účelem zvýšení tvrdosti povrchu součásti při současném zachování jejího měkkého a houževnatého jádra. Laserové záření dokáže velmi rychle bezkontaktně dodat povrchu velké množství energie. Rychlosti ohřevu i ochlazování se pohybují od  $10^4$  až do  $10^6$  °C·s<sup>-1</sup>. Velikost tepelně ovlivněné oblasti a tvar zpevněné zóny jsou dány dobou působení a hustotou energie dopadajícího svazku. Hloubka zpracované vrstvy se mění podle podmínek ozáření a dle materiálu od 0,2 do 0,8 mm, stopa dosahuje šířky až 5 mm. Hlavní výhodou laserového povrchového zpracování je možnost přesné lokalizace, minimální deformace a stejně tak minimální vnitřní pnutí. Tuto technologii lze použít na všechny běžně kalitelné oceli, ale i na nízkouhlíkové oceli a litiny.

### **Metody zpevnění povrchových vrstev po kalení laserem lze rozdělit do tří skupin:**

- Povrchové kalení (teplota nepřesáhne bod tavení), následované samovolným ochlazením. Výsledkem je jemnozrná struktura o vysoké tvrdosti. Deformace povrchu je zanedbatelná.
- Lokální natavení povrchu, umožňující rozpustit i fáze běžně nerozpuštěné ve zpracovávaném materiálu. Tím lze dosáhnout přesycení vrstvy legujícími prvky. Po ochlazení zůstává přesycený tuhý roztok s velmi jemnou strukturou s vysokou odolností proti opotřebení.
- Nalegování povrchu, při kterém dochází k lokální změně chemického složení v důsledku přímého legování nebo plátování.



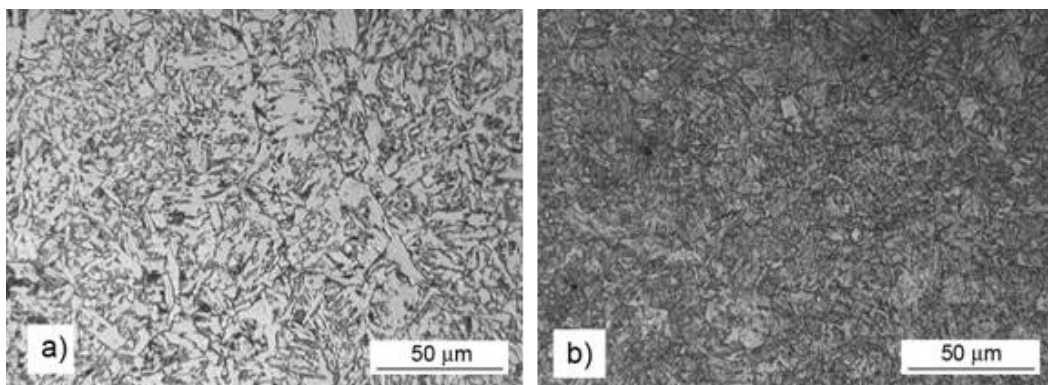
**Obr. 16 Kalení matice laserovým paprskem [14]**

Nevýhodou metody je vyšší pořizovací cena laseru, provozní náklady jsou však díky energetickým úsporám nízké a zařízení lze použít i pro svařování. Využívání laserového zpracování se díky svým pozitivům rozšiřuje. [5]

## 5.5 Popouštění

Spočívá v ohřevu těsně pod  $A_{c1}$ , po němž následuje výdrž na teplotě (zpravidla 2h) a ochlazování vhodnou rychlostí. Zařazuje se ihned po kalení (kalení + popouštění za vysokých teplot = zušlechťování) a jeho účelem je snížení tvrdosti (pevnosti), zvýšení plastických vlastností, meze kluzu, vrubové houževnatosti; u nástrojových ocelí pak odstranění vnitřního pnutí, zvýšení houževnatosti, případně i tvrdosti.

Podle popouštěcí teploty, na které závisí rozsah změn mechanických vlastností rozlišujeme popouštění při nízkých teplotách (napouštění) a při vysokých teplotách (anizotermické zušlechťování). [5]



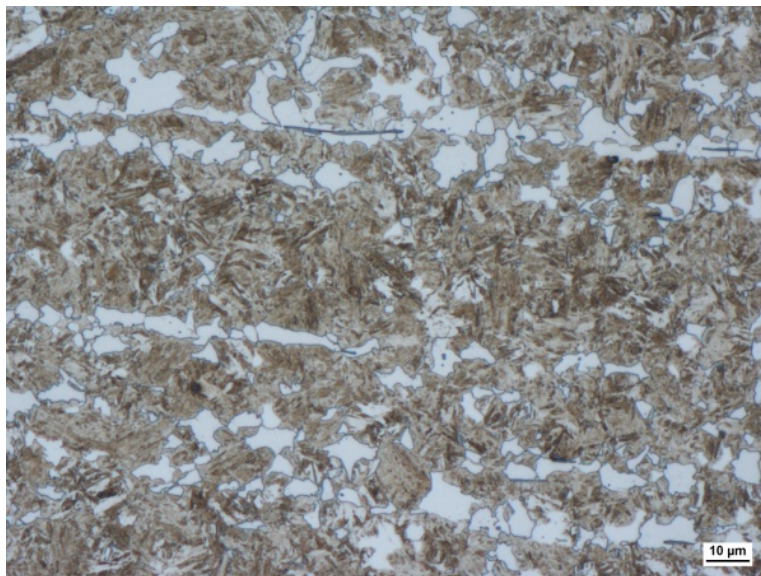
**Obr. 17 Struktura oceli 16420 [11]**

a) Výchozí stav oceli před zušlechťováním, b) stav zušlechtěné oceli

Na Obr. 17a je feriticko - perlitická mikrostruktura oceli 16420 po tváření a normalizačním žhání. Na Obr. 17b je zobrazena tatáž ocel ve stavu zušlechtěném kalením z teploty 850 °C a popouštěním po dobu 1 hodiny při teplotě 500 °C. Struktura je po zušlechtění tvořena popuštěným martenzitem. [11]

### 5.5.1 Popouštění při nízkých teplotách (napouštění)

Probíhá zpravidla v rozmezí 100 až 300 °C, v některých případech i okolo 600 °C (vysokolegované nástrojové oceli). Cílem je zejména snížit vnitřní pnutí a obsah zbytkového austenitu při zachování vysoké tvrdosti. Popouští se nástrojové oceli, valivá ložiska, některé druhy vysocepevných ocelí a součásti po cementaci a povrchovém kalení. Operace probíhá ve vroucí vodě, teplé olejové lázni, v solných lázních, elektrických pecích atd. [5]



Obr. 18 Mikrostruktura martenzitu. Zvětšení 500× [12]

Na Obr. 18 je zachycena struktura tvořená nízkopopuštěným martenzitem, bílé oblasti jsou ferit a šedý protáhlý útvar je sulfidický vměstek (tvořený sloučeninou manganu a síry). Přítomnost vměstků je nežádoucí, jejich nadměrné množství může vést ke zhoršení mechanických vlastností výrobku. Proto existuje řada norem, podle kterých se hodnotí množství vměstků přítomných ve struktuře oceli. A na každou konkrétní oblast ocelových výrobků pak výrobce předepisuje maximální možné množství vměstků. [12]

### 5.5.2 Popouštění při vysokých teplotách (anizotermické zušlechtování)

Používá se k dosažení požadované kombinace pevnostních vlastností, houževnatosti a plasticity. Probíhá zpravidla v rozmezí teplot 400 až 650 °C. [5]



## 6 PORUCHY KRYSTALICKÉ MŘÍŽKY

Vlastnosti kovových krystalů závisí nejen na jejich prostorovém uspořádání a druhu vazby, ale zejména na porušení pravidelnosti uspořádání atomů v krystalické mřížce a chování těchto vad. Každá porucha krystalické mřížky vychyluje atomy z jejich poloh, způsobuje distorzi mřížky a ve svém okolí vyvolává vnitřní pnutí.

**Z topologického hlediska lze vady v krystalech rozdělit dle počtu dimenzí na:**

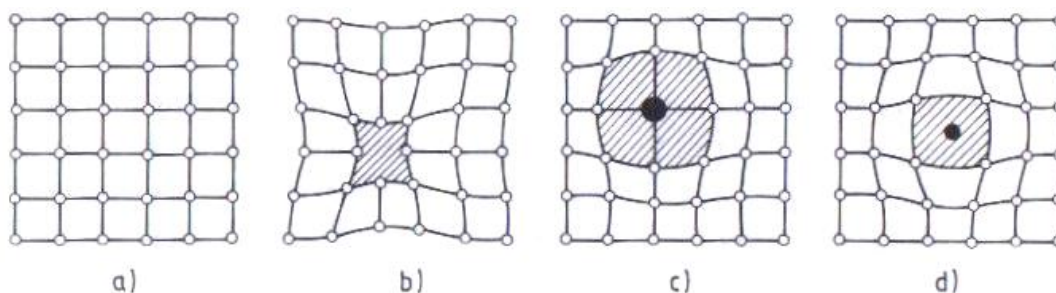
- bodové (bezrozměrné) vady
- čárové (jednorozměrné) vady
- plošné (dvojměrné) vady
- prostorové (trojrozměrné) vady

**Z hlediska účinku na fyzikální vlastnosti lze poruchy dělit na:**

- chemické (kvalitativně odlišné prvky v krystalu, aj.)
- strukturní (veškeré odchylky od správné polohy atomů v mřížce)
- elektrické (zpravidla odchylky v rozložení elektrického náboje a tedy porušení periodicity potenciálu mřížky). [4]

### 6.1 Bodové poruchy

Mezi základní bodové poruchy patří *vakance* a *intersticiály* v čistých kovech. K těm v tuhých roztocích přistupují ještě substituční a intersticiální příměsi. Zmíněné vady mohou tvořit i složitější útvary, které považujeme za bodové poruchy, např. *bivakance*, párová porucha intersticiál – vakance, substituční příměs – vakance. [4]



**Obr. 19 Bodové poruchy krystalické mřížky [2]**

Na Obr. 19a je zobrazena mřížka bez poruch, zbývající obrázky znázorňují jednotlivé typy bodových poruch, jež jsou popsány níže.

*Vakanci* nazýváme neobsazenou uzlovou polohu v krystalické mřížce (Obr. 19b), jejíž součástí je i deformace blízkého okolí.

*Intersticiál* je atom (iont), nacházející se v intersticiální poloze (mimo uzlový bod). Intersticiál rovněž způsobuje deformaci mřížky (viz. Obr. 19d). Z hlediska tvaru jsou podobnými poruchami příměsi (intersticiální, substituční), příklad substituční příměsi je zobrazen na Obr. 19c.

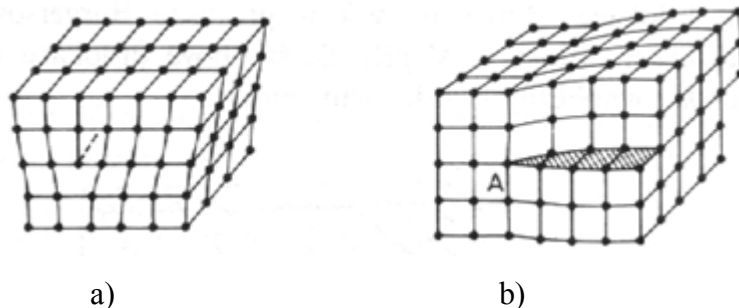
Mechanismus vzniku bodových poruch může být různý. Vakance mohou na povrchu kovu vznikat jako tzv. Schottkyho poruchy přechodem atomu základní mřížky do uzlové polohy na povrchu nebo jako tzv. Frenkelovy poruchy přechodem mřížkového atomu do intersticiální polohy. Vzniká tak párová porucha intersticiál – vakance. Vakance se také mohou v krystalu tvořit již při primární krystalizaci. Jinými zdroji vakancí mohou být např. hranice zrn.

Intersticiály vznikají snadno v krystalech s velkou meziatomovou vzdáleností. Všechny intersticiální polohy nemohou být obsazeny z důvodu elastické deformace okolí poruchy.

Bodové poruchy se mohou pohybovat krystalem. Mechanismem jejich pohybu jsou diskrétní přeskoky z jednoho uzlového bodu do sousedního nebo mezi intersticiálními polohami. [4]

## 6.2 Čárové poruchy

Vznikají přesunutím (dislokováním) určitého množství atomů při skluzovém pohybu vzhledem k sousední vrstvě. Tyto poruchy se nazývají dislokace a dělí se na hranové (viz. Obr. 20a) a šroubové (Obr. 20b). Hranová dislokace způsobuje vznik tlakového napětí nad dislokací a tahového napětí pod dislokací (viz. Obr. 20a). [4]



**Obr. 20 Čárové poruchy krystalické mřížky [13]**

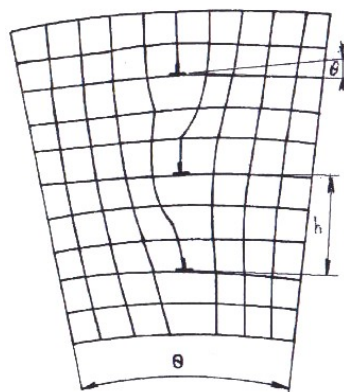
Vznik šroubové dislokace si lze představit tak, že krystal v rovině A (viz. Obr. 20b) rozřízneme a jeho část podle roviny řezu posuneme o určitou vzdálenost.



### 6.3 Plošné poruchy

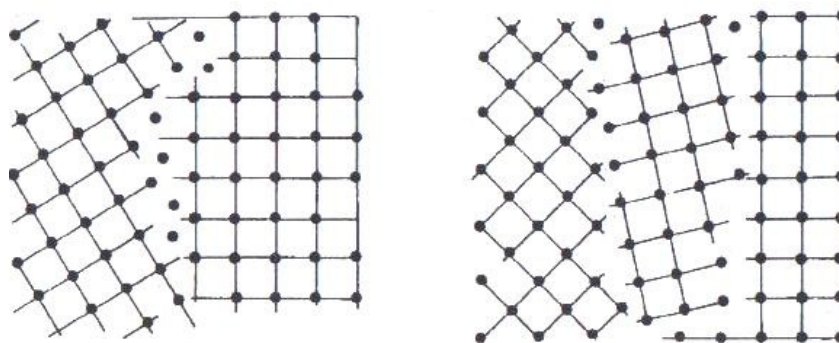
Do plošných poruch (dvourozměrných) řadíme vrstevné chyby, hranice subzrn, hranice zrn.

- a) **Hranice subzrn (skloněná malouhlová hranice)** – Každý krystal je složen z velkého počtu mřížkových bloků. Jednotlivé bloky jsou navzájem odkloněny a pootočený o malé úhly (Obr. 21)



Obr. 21 Hranice subzrn [4]

- b) **Hranice zrn (velkouhlové hranice)** – Jednotlivá krystalická zrna mezi sebou vytvářejí hranice, jejichž tloušťka dosahuje desítky mřížkových parametrů. Krystalické mřížky jsou na hranicích zrn pootočený o úhel větší než 10 až 15°.



Obr. 22 Velkouhlové hranice zrn [4]

Vypracovány jsou dva modely obecných velkouhlových hranic (viz. Obr. 22):

- Model přechlazené taveniny, který předpokládá amorfni charakter velkouhlové hranice
- Model „ostrovů“, který je založený na představě tranzitní mřížky vytvořené z oblasti mřížky s menším odklonem [4]

## 7 ZÁVĚR

Tepelné zpracování je proces, kterým lze s relativně nízkými náklady výrazně měnit strukturu oceli. Výsledná struktura materiálu pak určuje mechanické a technologické vlastnosti. Proces tepelného zpracování má stále své místo ve výrobních postupech, neboť ocelové součásti jsou v mnoha případech vzhledem ke svým vlastnostem a nákladům na výrobu nenahraditelné.

Výchozí struktura ovlivňuje to, jakým způsobem se změní vlastnosti během tepelného zpracování. Významnou roli zde hraje obsah uhlíku. Obecně lze říci, že s rostoucím obsahem uhlíku ve výchozí struktuře roste obsah vzniklého martenzitu, který zvyšuje tvrdost. Avšak vždy záleží na struktuře konkrétní oceli a kalící teplotě.

Je-li součást při tepelném zpracování vystavena působení vzduchu, dochází k oduhličení povrchu, což způsobuje snížení tvrdosti v povrchových vrstvách. To je nežádoucí zejména na funkčních plochách součásti, proto se využívá ochranných atmosfér.

Při rozpadu austenitu na bainit a martenzit dochází zpravidla ke zvýšení tvrdosti, avšak snižuje se plasticita a houževnatost. Rozpad austenitu vyvolaný ohřevem při popouštění vede ke snížení pevnosti a zvýšení houževnatosti a plasticity. Nežádoucí při popouštění je rozvoj popouštěcí křehkosti, což vede ke snížení hodnot vrubové a lomové houževnatosti. Zvyšuje se i náchylnost ke koroznímu praskání.

Pro každý druh tepelného zpracování jsou dle svého specifického složení vhodné, či nevhodné různé druhy ocelí. Například k povrchovému kalení a zušlechťování jsou používány oceli s obsahem uhlíku 0,4 až 0,6%, čímž se dosahuje tvrdého martenzitického povrchu (odolného proti opotřebení) v koexistenci s houževnatým jádrem. Některé nadeutektoidní nástrojové oceli dosahují zakalením vysoké tvrdosti, avšak ztrácejí ji následným popouštěním nebo jsou-li za provozu vystaveny nepřiměřenému ohřevu.

Jelikož skutečný krystal kovu nemá dokonalou stavbu, jsou vlastnosti oceli významně ovlivněny i přítomností poruch v krystalické mřížce. Tyto vady vznikají při tuhnutí roztaveného kovu, tváření za studena, tepelném zpracování, atp. Nepravidelné uspořádání atomů v krystalické mřížce může způsobovat vnitřní pnutí a ovlivňuje např. pevnost a tvárnost, ale i rychlost a dokonalost přeměny. Velmi záleží na koncentraci poruch. Kupříkladu vysoká hustota dislokací může zvyšovat pevnost materiálu.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. Strojírenská technologie 1. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007, 266 s. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [2] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. Strojírenská technologie 1. 3. přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 173 s. ISBN 80-7183-265-0.
- [3] JECH, Jaroslav. Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983, 391 s.
- [4] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003, xii, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [5] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [6] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006, xiv, 914 s. ISBN 80-7361-033-7.
- [7] VOJTĚCH, Dalibor. Materiály a jejich mezní stavy. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010, 204 s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [8] SVOBODA, Pavel. Základy konstruování. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-750-5
- [9] *Značení ocelí* [online]. [cit. 2014-11-1]. Dostupné na: [http://www.ateam.zcu.cz/znaceni\\_oceli.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/znaceni_oceli.pdf)
- [10] *Výroba surového železa* [online]. [cit. 2015-2-10]. Dostupné na: <http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/01zelezo.php>
- [11] *Tepelné zpracování oceli – teorie* [online]. [cit. 2015-2-15]. Dostupné na: [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_tepelne\\_zprac\\_oceli/teorie2.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_oceli/teorie2.htm)
- [12] *Ocelový svět, Kapitola 6 – Výrobky z oceli* [online]. [cit. 2015-2-17]. Dostupné na: <http://ebook.veda-hrou.cz/>
- [13] *Poruchy krystalových struktur* [online]. [cit. 2015-4-9]. Dostupné na: <http://www.xray.cz/krystalografie/str09c.htm>
- [14] *Laserové kalení matice* [online]. [cit. 2015-4-10]. Dostupné na: <http://www.lasertherm.cz/galerie/laserove-kaleni-matice/>

## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma vysoké pece [10].....	9
Obr. 2 Schéma číselného značení ocelí ke tváření [1] .....	13
Obr. 3 Schéma číselného značení slitin železa na odlitky [6] .....	16
Obr. 4 Rovnovážný diagram Fe - Fe <sub>3</sub> C [5].....	17
Obr. 5 Schéma nukleace a růstu perlitických nodulí [5] .....	20
Obr. 6 Struktura bainitu [4].....	21
Obr. 7 Martenzitická křivka [4] .....	21
Obr. 8 Průběh tepelného zpracování .....	24
Obr. 9 Oblasti žíhacích teplot v rovnovážném diagramu Fe – Fe <sub>3</sub> C [2] .....	26
Obr. 10 Rekrytalizační žíhání – struktury [2].....	28
Obr. 11 Tvrdost nelegovaných ocelí v závislosti na obsahu uhlíku [2] .....	32
Obr. 12 Kalící teploty v diagramu Fe – Fe <sub>3</sub> C [2].....	33
Obr. 13 Křivky ochlazování středu ocelového válce [5].....	33
Obr. 14 Znázornění způsobů kalení v diagramu ARA [5] .....	36
Obr. 15 Znázornění způsobů kalení v diagramu IRA [5].....	36
Obr. 16 Kalení matice laserovým paprskem [14] .....	39
Obr. 17 Struktura oceli 16420 [11] .....	39
Obr. 18 Mikrostruktura martenzitu. Zvětšení 500× [12].....	40
Obr. 19 Bodové poruchy krystalické mřížky [2] .....	41
Obr. 20 Čárové poruchy krystalické mřížky [13] .....	42
Obr. 21 Hranice subzrn [4] .....	43
Obr. 22 Velkoúhlové hranice zrn [4].....	43

## 10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozdělení ocelí podle výroby [9] .....	11
Tab. 2 Rozdělení ocelí na nelegované a legované, dle obsahu prvků [5] .....	12
Tab. 3 Rozdělení ocelí do tříd [6] .....	13
Tab. 4 Význam první doplňkové číslice [1] .....	14
Tab. 5 Rozdělení slitin železa na odlitky [6] .....	16
Tab. 6 Přehled hlavních způsobů tepelného zpracování [5] .....	23