

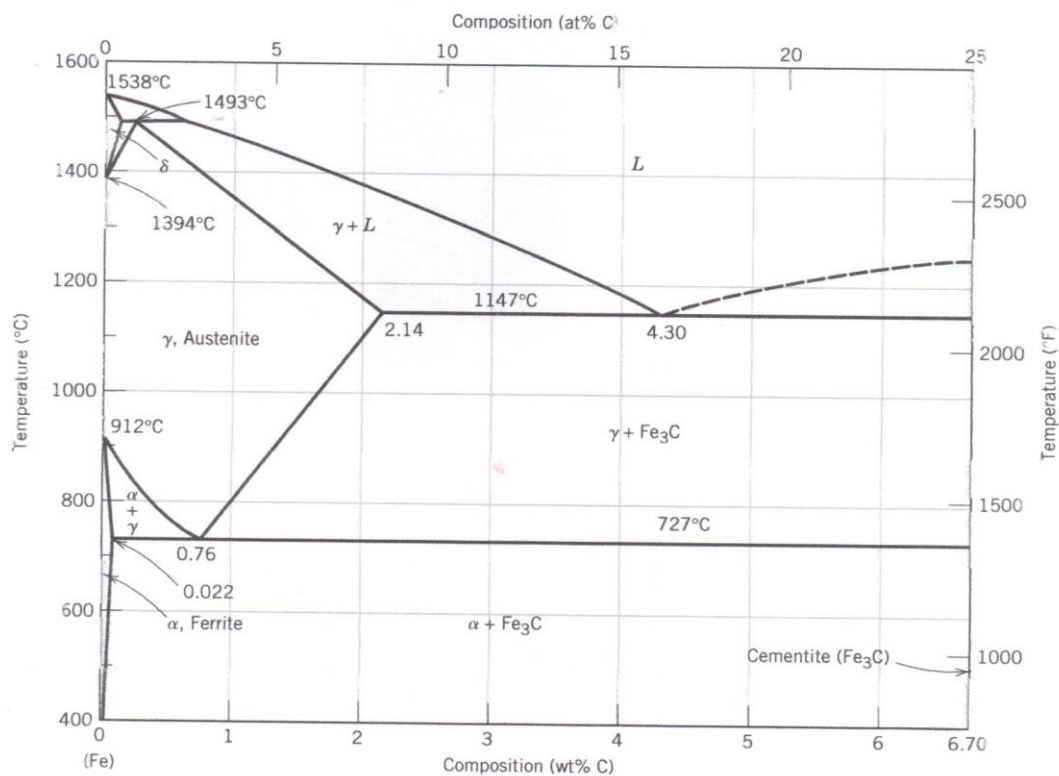
## Metalografická analýza slitin Fe-C

Pravděpodobně nejdůležitějším binárním systémem je soustava Fe-C. Oceli a litiny jsou primárními konstrukčními materiály ve všech technologicky pokročilých kulturách. Tato úloha je věnována fázovému diagramu tohoto systému a vývoji možných mikrostruktur v podeutektoidních ocelích.

1a-b

### Fázový diagram Fe-C

Část fázového diagramu Fe-C je na obrázku 9.24. Čisté železo při ohřevu prodělává dvě změny krystalické struktury, než dojde k jeho tání. Za pokojové teploty je stabilní ferit ( $\alpha$ -Fe, s BCC strukturou), mění se na austenit ( $\gamma$ -Fe, s FCC strukturou) při 912 °C. Austenit je stabilní do 1394 °C, kdy se mění na BCC fázi železa známou jako  $\delta$ -ferit, který nakonec taje při 1538 °C. Osa složení v Obr.9.24 končí při 6.70 vah. % C; při této koncentraci uhlíku se tvoří sloučenina cementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), která je representována svislou čarou ve fázovém diagramu.



**Figure 9.24** The iron-iron carbide phase diagram. [Adapted from *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd edition, Vol. 1, T. B. Massalski (Editor-in-Chief), 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.]

Převzato z: Callister W.D., Rethwish D.G.: *Materials Science and Engineering. An Introduction.* 8 ed., Wiley, USA, pro účely výuky.

Fázový diagram Fe-C je tak rozdělen na dvě části: část bohatou železem a druhou (není na obrázku) pro složení 6.70 až 100 vah. % C (čistý grafit). Protože prakticky všechny ocele a litiny mají obsah uhlíku menší než 6.70 vah. % C, budeme se zabývat pouze tímto systémem, Fe-Fe<sub>3</sub>C, kde Fe<sub>3</sub>C je uvažován jako složka. Konvenčně je výhodnější vyjádřit složení slitin ve vah. % C než ve vah. % Fe<sub>3</sub>C. Pak 6.70 vah. % C odpovídá 100 vah. % Fe<sub>3</sub>C.

Uhlík je intersticiální nečistota v železe a tvoří tuhý roztok jak v  $\alpha$ -feritu tak v  $\delta$ -feritu a také v  $\gamma$ -austenitu, jak je vidět v jednofázových polích ve fázovém diagramu v Obr. 9.24. Maximální rozpustnost v BCC  $\alpha$ -feritu je pouze 0.022 vah. % C při 727 °C. Tato malá rozpustnost uhlíku se vysvětluje tvarem a velikostí intersticiálních BCC poloh, které jsou příliš malé pro atomy uhlíku. Přesto, že je koncentrace uhlíku v  $\alpha$ -feritu malá, uhlík významně ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti. Konkrétně,  $\alpha$ -ferit je měkký, feromagnetický do 768 °C a má hustotu 7.88 g/cm<sup>3</sup>. (Fáze  $\alpha$ -ferit mezi teplotami 768 °C a 912 °C (nemagnetická) byla dříve chybně označována jako fáze  $\beta$ -ferit.) Austenit ( $\gamma$ -austenit) není stabilní pod 727 °C, jak je vidět v Obr.9.24. Maximální rozpustnost uhlíku v FCC mřížce  $\gamma$ -austenitu je 2.14 vah. % C při 1147 °C, což je přibližně 100-krát více než v BCC mřížce  $\alpha$ -feritu. (Austenit je paramagnetický.)

$\delta$ -ferit je prakticky stejný jako  $\alpha$ -ferit, jen teplotní interval stability je jiný. Vzhledem k tomu, že je  $\delta$ -ferit stabilní pouze při relativně vysokých teplotách, nemá technologický význam a nebude dále diskutován.

Cementit (Fe<sub>3</sub>C) se tvoří, když uhlík překročí mez rozpustnosti v  $\alpha$ -feritu při teplotě pod 727 °C (pro složení v oblasti  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ). Jak je vidět v Obr.9.24, Fe<sub>3</sub>C tvoří roztok s  $\gamma$ -austenitem mezi 727 °C a 1147 °C. Mechanicky je cementit velmi tvrdý a křehký, pevnost ocelí jeho přítomností roste.

Cementit je metastabilní strukturní složka. Je-li ohříván na teploty mezi 650 °C a 700 °C po dobu několika let přemění se na  $\alpha$ -ferit a uhlík ve formě grafitu, který zůstane stabilní i po následném ochlazení na pokojovou teplotu. Proto Obr.9.24 není skutečný rovnovážný fázový diagram. Protože je však rozpad cementitu extrémně pomalý, uhlík je v ocelích virtuálně ve formě Fe<sub>3</sub>C místo grafitu a fázový diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C je pro všechny praktické účely platný. (Přídavek Si ovlivňuje rozpad cementitu s tvorbou grafitu a vznikají litiny.)

V soustavě Fe-Fe<sub>3</sub>C existuje eutektická ( $L \leftrightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ ) a eutektoidní ( $\gamma \leftrightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ) reakce, z nichž zejména eutektoidní reakce je velmi důležitá pro tepelné zpracování ocelí. Podle obsahu uhlíku rozeznáváme tři typy železných slitin: železo (do 0.008 vah. % C), ocel (0.008 – 2.14 vah. % C, prakticky do 1.0 vah. % C) a litinu (2.14 – 6.70 vah. % C, prakticky do 4.5 vah. % C)

## Vývoj mikrostruktury v ocelích

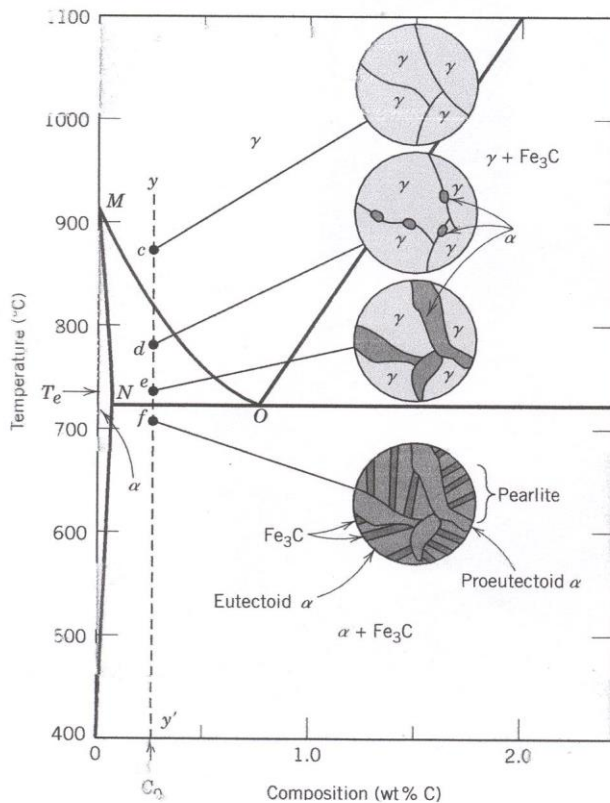
Mikrostruktura ocele závisí na obsahu uhlíku a na tepelném zpracování. Následující diskuse se vztahuje k velmi pomalému ochlazování, při němž je stále zachována rovnováha.

Mikrostruktura eutektoidní oceli pomalu chladnoucí v okolí eutektoidní teploty se skládá ze střídání vrstev (lamel) dvou fází ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ), které se tvoří současně v průběhu transformace. Relativní tloušťka lamel je v tomto případě 8 : 1. Tato mikrostruktura se nazývá perlit.

Perlit tvoří zrna (kolonie) v nichž světlé vrstvy jsou ferit a tmavé cementit. Mechanické vlastnosti perlitu jsou mezi měkkým, tvárným feritem a tvrdým, křehkým cementitem. Následné chlazení perlitu není spojeno s významnými mikrostrukturními změnami.

## Podoeutektoidní oceli

Podoeutektoidní (méně uhlíku než eutektoidní) oceli jsou oceli s obsahem uhlíku mezi 0,022 vah.% C a 0.76 vah. % C. Ochlazování slitiny uvedeného složení je representováno pohybem podle vertikální linie  $yy'$  v Obr. 9.29.



**Figure 9.29** Schematic representations of the microstructures for an iron-carbon alloy of hypo-eutectoid composition  $C_0$  (containing less than 0.76 wt% C) as it is cooled from within the austenite phase region to below the eutectoid temperature.

1a-b

Převzato z: Callister W.D., Rethwish D.G.: Materials Science and Engineering. An Introduction. 8 ed., Wiley, USA, pro účely výuky.

Okolo teploty 875 °C (bod c) mikrostruktura obsahuje pouze zrna  $\gamma$ -fáze, jak je zřejmé ze schématu na Obr. 9.29. Při ochlazování k bodu d, (okolo 775 °C), který je v dvoufázové oblasti ( $\alpha + \gamma$ ), většina malých částic  $\alpha$  – fáze se bude tvořit podél původních hranic zrn  $\gamma$  – fáze. Složení obou fází lze určit pomocí příslušné tie-line; uvedená složení odpovídají 0.020 a 0.40 vah. % C.

V průběhu ochlazování slitiny ve dvoufázové oblasti ( $\alpha + \gamma$ ) se složení  $\alpha$  – fáze mění s teplotou podle linie MN (Obr.9.29) a mírně se obohacuje uhlíkem, Na druhé straně, změna složení austenitu je významnější. Mění se podle linie MO (Obr.9.29) s klesající teplotou.

Ochlazování z bodu d do bodu e, těsně nad eutektoidní teplotou ale stále ve dvoufázové oblasti ( $\alpha + \gamma$ ), se v mikrostruktuře tvoří rostoucí podíl  $\alpha$  – částic a mikrostruktura je podobná předchozí: částice  $\alpha$  – fáze se budou zvětšovat. Složení fází  $\alpha$  a  $\gamma$  lze určit z tie-line při teplotě  $T_e$  (Obr.9.29);  $\alpha$ -fáze bude obsahovat 0.022 vah. %C a  $\gamma$ -fáze bude mít 0.76 vah. %C.

Při dalším snižování teploty pod eutektoidní teplotu do bodu f všechna  $\gamma$ -fáze přítomná při teplotě  $T_e$  (mající eutektoidní složení) se bude transformovat na perlit. Nebude ve skutečnosti žádná změna v  $\alpha$  – fázi existující v bodě e.



Při překročení eutektoidní teploty bude normálně přítomna  $\alpha$ -fáze jako spojitá matrice obklopující perlitické kolonie. Mikrostruktura v bodě  $f$  je na Obr.9.29. Feritická fáze bude přítomna jak v perlitu, tak také jako fáze vytvořená během chladnutí ve dvoufázové oblasti ( $\alpha + \gamma$ ). Ferit přítomný v perlitu se nazývá eutektoidní ferit, zatímco ferit vytvořený nad  $T_e$  se nazývá proeutektoidní (což značí před eutektoidní) ferit (Obr. 9.29). Množství obou feritů a cementitu lze určit podle pákového pravidla z tie-line vytyčené napříč celou ( $\alpha + Fe_3C$ ) - fázovou oblastí (0.022 až 6.70 vah. % C).

Podeutektoidní ocele jsou v technické praxi označovány jako ocele k zušlechťování, jsou normovány ČSN 41 2010 – ČSN 41 2060 a označovány jako 12010 - 12060. Chemické složení těchto ocelí je obsaženo v materiálových listech, a je uvedeno v následující příloze.

Hodnoty tvrdosti podle Brinella jsou rovněž v materiálových listech: 12 040: HB = 208

12 050: HB = 225

12 060: HB = 253

1a-c

**ÚKOL:** Cílem práce bude připravit mikrofotografie struktur ocelí s obsahem 0.1, 0.4, 0.5 a 0.6 vah. % C pro metalografickou analýzu podeutektoidních ocelí.

**POTŘEBY A CHEMIKÁLIE:** vzorky ocelí, metalografická bruska, brusné papíry, diamantová lešticí pasta, leptadlo Nital (5%  $HNO_3$  v etanolu), metalografický mikroskop s výstupem na digitální fotoaparát.

**POSTUP:** Bude provedena metalografická analýza (broušení, leštění, leptání, pozorování struktur) a vytvořeny metalografické obrazy struktur ocele 12010 a ocelí s vyšším obsahem uhlíku (12040, 12050 a 12060).

**ZPŮSOB VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ:** Stav ocele 12010 dokumentujeme metalograficky, stejně jako ocele 12040, 12050 a 12060.

**PROTOKOL:** V protokolu popíšeme postup metalografické analýzy, popíšeme zobrazené struktury a doložíme je snímky struktur podeutektoidních ocelí.

## Příloha.

CHEMICKÉ SLOŽENÍ OCELÍ PODLE ČSN.

ČSN 41 2010	Chemické složení (rozbor tavby)	%	C	Mn	Si	Cr <sup>1)</sup>	Ni <sup>1)</sup>	Cu	P	S
			0,07 až 0,14	0,35 až 0,65	0,15 až 0,40	max. 0,15	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,040	max. 0,040
	Dovolené úchytky chemického složení v hotovém výrobku <sup>2)</sup>	%	-0,02 +0,03	-0,05 +0,10	±0,03	-	-	-	-	-
ČSN 41 2040	Chemické složení (rozbor tavby)		C	Mn	Si	Cr <sup>1)</sup>	Ni <sup>1)</sup>	Cu	P	S
			0,32 až 0,40	0,50 až 0,80	0,15 až 0,40	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,040	max. 0,040
	Dovolené úchytky chemického složení v hotovém výrobku	% <sup>2)</sup>	±0,02	-0,05 +0,10	-0,03 +0,05	-	-	-	-	-
ČSN 41 2050	Chemické složení (rozbor tavby)	%	C	Mn	Si <sup>1)</sup>	Cr <sup>2)</sup>	Ni <sup>2)</sup>	Cu	P	S
			0,42 až 0,50	0,50 až 0,80	0,17 až 0,37	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,040	max. 0,040
	Dovolené úchytky chemického složení v hotovém výrobku <sup>3)</sup>	%	±0,03	-0,05 +0,10	-0,03 +0,05	-	-	-	-	-
ČSN 41 2060	Chemické složení (rozbor tavby)	%	C	Mn	Si	Cr <sup>1)</sup>	Ni <sup>1)</sup>	Cu	P	S
			0,52 až 0,60	0,50 až 0,80	0,15 až 0,40	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,040	max. 0,040
	Dovolené úchytky chemického složení v hotovém výrobku	% <sup>2)</sup>	±0,03	-0,05 +0,10	-0,03 +0,05	-	-	-	-	-