

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálových věd a inženýrství

**Struktura slitin stabilní soustavy
železo – uhlík (Fe – C)**

Doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc.

Ing. Pavel Doležal

Obsah:

Stabilní soustava Fe – C

Strukturní i fázové přeměny litin s lupínkovým grafitem

Podeutektické litiny

Slitina I

Eutektické litiny

Slitina II

Nadeutektické litiny

Slitina III

Kovové matrice slitin Fe-C

Literatura a odkazy

Pojmy

Stabilní soustava železo - uhlík (Fe – C)

Ve stabilní soustavě Fe – C jsou složkami železo a uhlík. Stabilní formou uhlíku v soustavě Fe – C je grafit. Rovnovážný diagram železo - grafit se strukturním popisem jednotlivých oblastí je znázorněn na obr.1, stejný diagram s fázovým popisem pak na obr.2.

V diagramech jsou pro srovnání čárkovaně zakresleny linie metastabilní soustavy Fe – Fe₃C. V důsledku menší rozpustnosti uhlíku v austenitu ve stabilní soustavě Fe – C je křivka S'E' posunuta vlevo. Ze stejného důvodu je k nižším koncentracím uhlíku posunuta křivka likvidu C'D'. Křivky, které vyjadřují rovnováhu mezi taveninou a austenitem (čáry BC a JE) a dvěma tuhými roztoky (čára GOS) mají v obou soustavách stejnou polohu. Eutektická přeměna se uskutečňuje za teploty, kdy se protínají křivky BC'a C'D' a produkt přeměny má složení odpovídající tomuto průsečíku C', znamená posunutí křivky SE a CD do poloh S'E'a C'D' zvýšení eutektické teploty na 1153°C a snížení obsahu uhlíku v eutektické směsi na 4,2%. Totéž platí pro eutektoidní přeměnu, u které dochází ke zvýšení eutektoidní teploty na 740° a snížení koncentrace v eutektoidní směsi na 0,65%.

Rovnovážný diagram stabilní soustavy železo – grafit mají význam především pro slitiny s obsahem uhlíku nad 2,1% (případně nad 0,65%). Z praktických důvodů je obvykle kreslen od eutektoidní koncentrace uhlíku (bodu S') do koncentrace 6,7% uhlíku. Tato horní koncentrace je volena pro větší porovnatelnost s metastabilní soustavou a s v soustavě železo – grafit nemá žádný fyzikální význam.

Slitiny soustavy železo - grafit nazýváme litiny s lupínkovým grafitem. Podle koncentrace obsahu uhlíku v dané slitině rozeznáváme tyto litiny s lupínkovým grafitem:

- podeutektické (2,1 až 4,2% uhlíku)
- eutektické (4,2% uhlíku)
- nadeutektické (nad 4,2% uhlíku)

Rovnovážný diagram soustavy železo – grafit slouží jako pomůcka pro popis krystalizace a překrystalizace litin s lupínkovým grafitem a šedých surových želez.

Strukturní i fázové přeměny litin s lupínkovým grafitem

V rovnovážném digramu železo – uhlík (obr.1 a 2) lze strukturní i fázové přeměny litin sledovat u slitin s charakteristickým obsahem uhlíku (slitiny označené I, II, III) a na odpovídajících křivkách chladnutí. Je třeba zdůraznit, že stabilní formu uhlíku – grafit, lze v těchto slitinách získat pouze za podmínky dostatečně malé ochlazovací rychlosti. V čistě binárním systému železo – uhlík je charakter výsledné struktury ovlivněn pouze rychlostí ochlazování a stabilnímu stavu přísluší pouze struktura, v níž je vyloučen uhlík jako grafit. Podíl jednotlivých strukturních součástí i přítomných fází za pokojové teploty udávají Sauverovy diagram na obr.1 a 2.

Podeutektická litina s lupínkovým grafitem (Slitina I)

Krystalizaci a překrystalizaci litiny s lupínkovým grafitem o podeutektickém obsahu uhlíku představuje v diagramu železo - grafit (obr. 3) slitina I. Slitina s obsahem uhlíku 3% začíná tuhnout za teploty na křivce likvidu BC'. Z taveniny se vylučuje austenit ve tvaru dendritů. Při poklesu teploty rostou již existující dendritické krystaly austenitu a vznikají nové. Chemické složení krystalů austenitu se mění podle křivky solidu JE', složení zbylé taveniny podle křivky likvidu BC'. Za eutektické teploty 1153°C má austenit složení odpovídající bodu E' (2,1% uhlíku) a je v rovnováze se zbylou taveninou o složení bodu C' (4,2% uhlíku). Tavenina o eutektické koncentraci tuhne za konstantní teploty při eutektické reakci, kdy jsou v rovnováze tři fáze: tavenina o složení bodu C', austenit o složení bodu E' a eutektický grafit (G_E). Při této reakci vznikne eutektická směs sestávající z drobných krystalů austenitu a lupínků eutektického grafitu A + G_E, která se nazývá grafitické eutektikum (GE). Toto eutektikum vyplňuje prostor mezi primárně vzniklými dendrity austenitu. Při eutektické reakci vzniklá směs poměrně hrubých částic eutektického grafitu a austenitu označujeme jako anomální eutektikum.

Při dalším poklesu teploty mezi eutektickou (1153°C) a eutektoidní teplotou (740 °C) klesá rozpustnost uhlíku v austenitu podle křivky E'S'. Primární i eutektický austenit se přesycuje uhlíkem, který se vylučuje jako sekundární grafit (G^{II}). Tento se ukládá většinou na lupínky eutektického grafitu.

Za eutektoidní teploty má austenit většinou eutektoidní koncentraci (0,65%C). Za konstantní teploty probíhá eutektoidní přeměna, při které se austenit rozpadá na směs eutektoidního grafitu (G_e) a feritu (F), která se nazývá grafitický eutektoid (ge). Eutektoidní grafit se podobně jako sekundární grafit ukládá na lupínky eutektického grafitu a běžně jej ve struktuře nenalezneme. Ve strukturním diagramu železo – grafit (obr.1) jsou pak za pokojové teploty ve struktuře litiny přítomny: grafitický eutektoid (ge), sekundární grafit (G^{II}) a grafitické eutektikum transformované (GE_{TR}), což je směs eutektického grafitu (G_E) a grafitického eutektoidu (ge). Ve fázovém diagramu (obr.2) jsou za pokojové teploty ve struktuře přítomny dvě fáze: ferit a grafit. V grafitické fázi jsou zahrnuty všechny tři druhy grafitu vzniklé za různých podmínek: eutektický grafit (G_E) lupínkového tvaru, sekundární (G^{II}) a eutektoidní (G_e) grafit.

Výsledná struktura slitiny I je tedy feritická, která tvoří základní kovovou hmotu neboli kovovou matici litiny a v ní je vyloučen grafit v podobě poměrně hrubých lupínků (obr 4).

Pozn.: Slitiny s obsahem uhlíku pod 2,1% se označují někdy jako „grafitické oceli“ (obr. 1 a 2). Jedná se o nadeutektoidní oceli, které nemají ve srovnání s litinami eutektickou přeměnu. Grafitická fáze se vylučuje jen tuhém stavu a to z přesyceného austenitu pod křivkou E'S' jako sekundární grafit ve tvaru vloček. Druhý typ grafitu vzniká při rozpadu austenitu za eutektoidní teploty na grafitický eutektoid (směs feritu a eutektoidního grafitu). Eutektoidní grafit se ukládá na vločky sekundárního grafitu. Výslednou strukturu tedy tvoří ferit a vločkový grafit (obr. 5).

Eutektická litina s lupínkovým grafitem (Slitina II)

Litina o eutektickém obsahu uhlíku (4,2%) tuhne za nejnižší teploty 1153°C ([obr. 3](#)). Za konstantní teploty ztuhne veškerý objem taveniny na grafitické eutektikum (GE). Při dalším poklesu teploty klesá rozpustnost uhlíku v austenitu podle křivky E'S' (obr.1 a 2). Austenit se stává přesycen uhlíkem a ten se z něj vylučuje jako sekundární grafit (G^{II}) a ukládá se podobně jako u slitiny I na lupínky eutektického grafitu (G_E). Za eutektoidní teploty 740 °C se grafitické eutektikum mění na grafitické eutektikum transformované (GE_{TR}). Při této transformaci se austenit o koncentraci bodu S' (0,65% C) rozpadá na směs feritu (F) a grafitu eutektoidního (G_e), což je grafitický eutektoid (ge). Ve struktuře této slitiny ([obr.6](#)) nalézáme za pokojové teploty ferit a lupínky eutektického grafitu (G_E). Sekundární grafit (G^{II}) i eutektoidní grafit (G_e) jsou vyloučeny na částicích eutektického grafitu.

Nadeutektická litina s lupínkovým grafitem (Slitina III)

Litina nadeutektická má chemické složení s obsahem uhlíku vyšším jak 4,2%. Slitina III s obsahem uhlíku 5% ([obr. 3](#)) začíná tuhnout, klesne-li teplota na křivku likvidu C'D'. Z taveniny se vylučují značně hrubé lupínky primárního grafitu (G^I). Protože je měrná hmotnost grafitu přibližně 3x menší než vlastní tekutého kovu, mohou částice grafitu vyplouvat na povrch taveniny. Tavenina se ochuzuje o uhlík podle křivky likvidu D'C' a za eutektické teploty 1153°C dosáhne eutektické koncentrace (bod C'). Podobně jako u slitiny I tavenina ztuhne za konstantní teploty na grafitické eutektikum (GE), což je směs austenitu (A) a lupínků eutektického grafitu (G_E).

Při dalším poklesu teploty se z austenitu obsaženém v grafitickém eutektiku vylučuje sekundární grafit (G^{II}) a za eutektoidní teploty se o uhlík ochuzený austenit rozpadne na grafitický eutektoid (ge), což je směs feritu (F) a eutektoidního grafitu (G_e). Strukturní popis litin o nadeutektoidním obsahu uhlíku ([obr.1](#)) za pokojové teploty je tedy následující: primární grafit (G^I) a grafitické eutektikum transformované (GE_{TR}), což je směs eutektického grafitu (G_E) a grafitického eutektoidu (ge). Při detailním strukturním popisu nelze opomenout přítomnost sekundárního i eutektoidního grafitu, které jsou vyloučeny na částicích primárního i eutektického grafitu. Při fázovém popisu analýze jsou za pokojové teploty ve struktuře přítomny dvě fáze: ferit a grafit.

Ve výsledné struktuře slitiny III je v základní kovové hmotě vyloučen ferit, ve kterém jsou uloženy hrubé lupínky primárního grafitu a jemnější lupínky eutektického grafitu ([obr.7](#)).

Kovové matrice slitin Fe-C

Dodržení velmi nízké ochlazovací rychlosti, jako nutné podmínky pro vznik rovnovážných výsledných struktur tvořených feritem a grafitem, je zejména za nižších teplot značně obtížné. Pochody související s krystalizací litin s lupínkovým grafitem i následující pochody vylučování sekundárního grafitu proběhnou v reálných podmínkách ochlazování podle stabilní soustavy železo – grafit. Avšak následující eutektoidní přeměna, tj. rozpad austenitu proběhne zcela nebo částečně podle metastabilní soustavy Fe - Fe₃C. V takovém případě je struktura základní kovové hmoty litiny s lupínkovým grafitem tvořena perlitem (obr.8) nebo je struktura matrice perliticko-feritická (obr.9).

Litiny s lupínkovým tvarem grafitu vyráběné v technické praxi jsou slitinami o komplexním chemickém složení. U nich má vedle rychlosti ochlazování významný vliv na výslednou strukturu množství grafitizačních přísad (křemík) i prvků stabilizujících karbid železa - cementit Fe₃C (mangan a chróm). Ve slitině se zvýšeným obsahem grafitizačních přísad proběhne krystalizace a překrystalizace v souladu se stabilní soustavou i při zvýšení ochlazovací rychlosti. Naopak přísady, které stabilizují cementit, budou i při velmi pomalém ochlazování ovlivňovat výslednou strukturu podle metastabilního soustavy Fe - Fe₃C. Ve výsledné kovové matici těchto litin bude perlit.

Literatura

Callister, W.D., Jr., *Material Science and Ingining an Introduction*, John Wiley & Son, 2003, ISBN 0-471-13576-3

Pojmy

Austenit

intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe γ .

Cementit

karbid železa o chemickém vzorci Fe_3C . Tato fáze s částečnou stabilitou, která je schopna se za určitých vnějších podmínek rozpadat, se označuje jako metastabilní. Obsahuje 6,70 % (hmot.%) uhlíku. Základní fyzikální hodnoty: teplota krystalizace: $\sim 1380^\circ\text{C}$, měrná hmotnost $7,82 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, tvrdost 660 až 840HB. U této fáze neprobíhají žádné krystalové přeměny v tuhém stavu. Při ochlazování se za teploty 217°C paramagnetické vlastnosti cementitu mění na slabě feromagnetické.

perlitický (eutektoidní)

vzniká při eutektoidní reakci z austenitu. Je součástí eutektoidní směsi - perlitu.

Dendrit

útvár, který vzniká při krystalizaci tuhého roztoku. Jedná se o krystalit, který má tvar stromičku s hlavní - tj.primární osou a bočním větvením v sekundárních a terciárních osách.

Eutektická přeměna, eutektická reakce

reakce probíhající při konstantní teplotě 1153°C , kdy tavenina krystalizuje na grafitické eutektikum (G_E), tj. směs austenitu (A) a eutektického grafitu (G_E).

Eutektoidní přeměna, eutektoidní reakce

reakce probíhající při konstantní teplotě 740°C , kdy se austenit rozpadá na grafitický eutektoid (ge), což je směs feritu (F) a eutektoidního grafitu (G_e)

Fáze

chemicky i fyzikálně stejnorodá (homogenní) látka.

Ferit

intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe α (i železe β).

Grafit

jedna z forem uhlíku. Krystalizuje v šesterečné soustavě. Teplota tání je $3700 \pm 100^\circ\text{C}$, měrná hmotnost $2,22 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$

Eutektický grafit G_E

fáze, která se vylučuje z taveniny při eutektické reakci za konstantní teploty 1153°C . Je součástí eutektické směsi - grafitického eutektika. Má tvar prostorově uspořádaných lupínek

Primární grafit (G^I)

fáze, která se vylučuje přímo z taveniny mezi teplotou likvidu a eutektickou teplotou 1153°C . Má tvar hrubých lupínek

Sekundární grafit (G^{II})

fáze, která se vylučuje z austenitu mezi eutektickou (1153°C) a eutektoidní teplotou (740°C)

Eutektoidní grafit (G_e)

fáze, která se vylučuje z austenitu při eutektoidní reakci za konstantní teploty 740°C. Je součástí eutektoidní směsi - grafitického eutektoidu

Grafitické eutektikum (GE)

směs eutektického grafitu a austenitu ($A + G_E$) vzniklá z taveniny při eutektické reakci

Grafitické eutektikum transformované (GE_{TR})

směs eutektického grafitu (G_E) a grafitického eutektoidu ($F + G_e$)

Grafitický eutektoid (ge)

směs feritu a eutektoidního grafitu ($F + G_e$) vzniklá z austenitu při eutektoidní reakci

Karbid železa

intersticiální chemická sloučenina Fe_3C , kterou tvoří železo s uhlíkem při obsahu 6,7 % C

Likvidus

křivka v rovnovážném diagramu, představující teploty počátku krystalizace

Litina s lupínkovým grafitem (šedé surové železo)

slitiny železa a uhlíku, které krystalizují a překrystalizují podle stabilní soustavy železo – uhlík. Uhlík krystalizuje ve tvaru prostorově spojitě propojených lupínků

podutektická

slitiny železa s obsahy uhlíku 2,1 až 4,2% , které krystalizují a překrystalizují podle stabilní soustavy železo - uhlík

eutektická

slitiny železa s obsahem uhlíku 4,2 %, které krystalizují a překrystalizují podle stabilní soustavy železo - uhlík

nadeutektická

slitina železa s obsahem uhlíku nad 4,2 %, která krystalizuje a překrystalizuje podle stabilní soustavy železo - uhlík

Perlit

směs feritu a cementitu (perlitického), která vzniká v soustavě $Fe - Fe_3C$ z austenitu při eutektoidní reakci.

Soustava

část prostoru, který je vyplněn souborem elementárních částic.

metastabilní

soustava, kdy jedna z fází je metastabilní (částečná stabilita), tj. není v termodynamická rovnováze a je schopna se za určitých podmínek rozpadat. V případě diagramu $Fe - Fe_3C$ je metastabilní fází cementit

stabilní

soustava, ve které existují stabilní fáze s nejnižší hodnotou Gibbsovy energie

Tuhý roztok

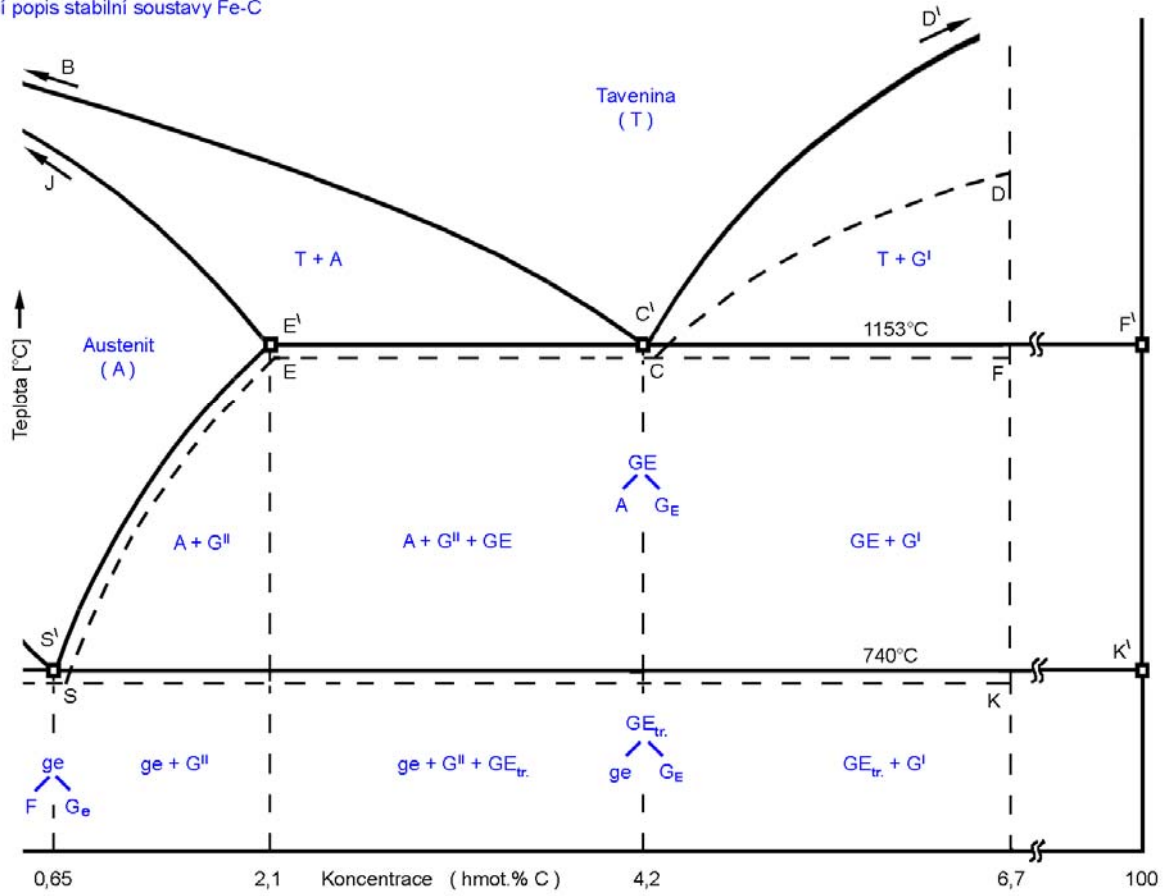
tuhá fáze, která ve své krystalické stavbě obsahuje atomy základního kovu i atomy přísad.

Železo

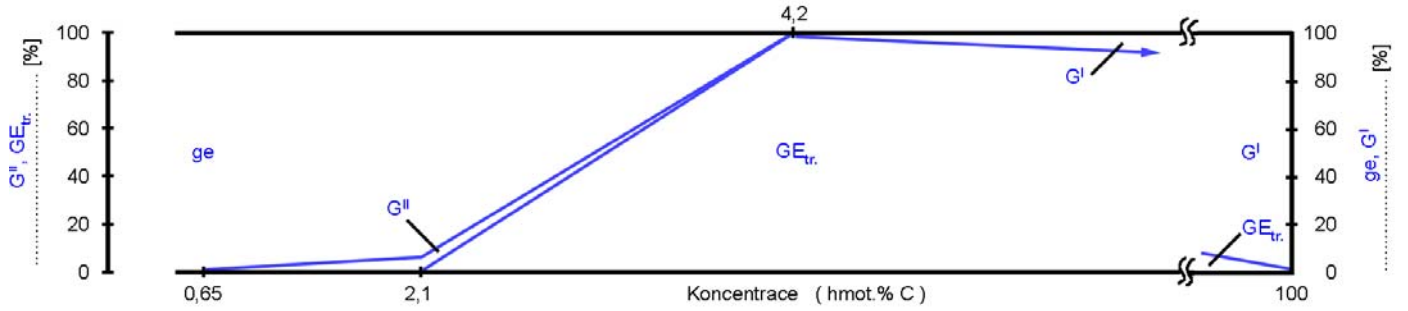
složka v soustavě železo - uhlík. Základní fyzikální hodnoty: teplota krystalizace: 1538°C, měrná hmotnost $7,88 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, tvrdost $\sim 80\text{HB}$. Železo je polymorfní kov, který mění krystalovou strukturu - překrystalizuje v tuhém stavu a současně i vlastnosti. V tuhém stavu existují u železa dva odlišné typy krystalové mřížky: modifikace železa γ má mřížku krychlovou plošně středěnou (fcc) a je stabilní v teplotním rozmezí 1394 až 912°C. Vysokoteplotní modifikace železa s mřížkou krychlovou prostorově středěnou (bcc) se označuje $\text{Fe}\delta$ a je stabilní v teplotním rozmezí 1538 až 1394°C (obr.17). Nízkoteplotní modifikace železa se stejným typem krystalické mřížky bcc je stabilní pod teplotou 912°C a označuje se $\text{Fe}\alpha$. Tento typ železa mění své magnetické vlastnosti v Curieho bodě při teplotě 768°C, kdy paramagnetická modifikace železa (označovaná někdy jako $\text{Fe}\beta$) se mění na feromagnetickou. Přeměny jednotlivých modifikací krystalické mřížky se uskutečňují za konstantní teploty a označují se při ochlazování jako kritické teploty Ar_4 , Ar_3 , Ar_2 a Ar_1 a při ohřevu Ac_1 , Ac_2 , Ac_3 a Ac_4 .

Při přeměně $\text{Fe}\alpha \leftrightarrow \text{Fe}\gamma$ se výrazně projevuje tepelná hystereze a proto kritická teplota při ohřevu - Ac_3 leží výše než teplota Ar_3 při ochlazování.

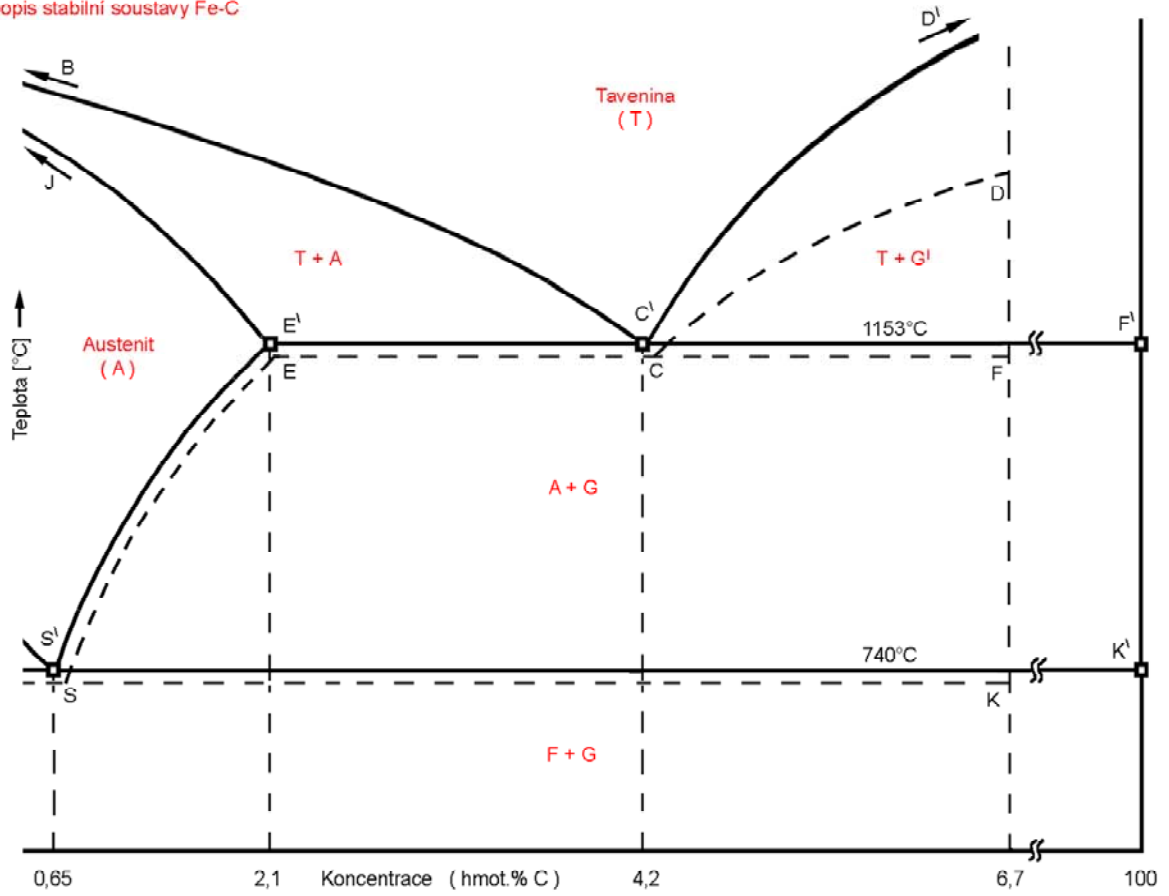
Obr.1 Strukturní popis stabilní soustavy Fe-C



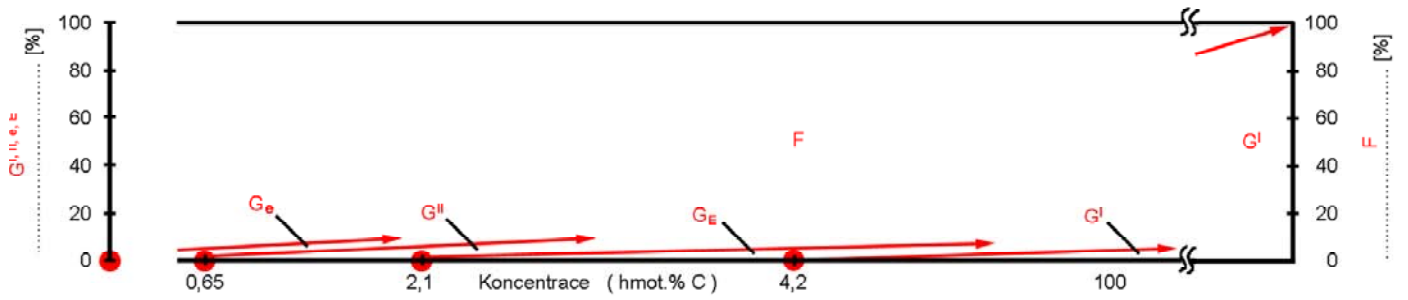
Sauerův strukturní diagram



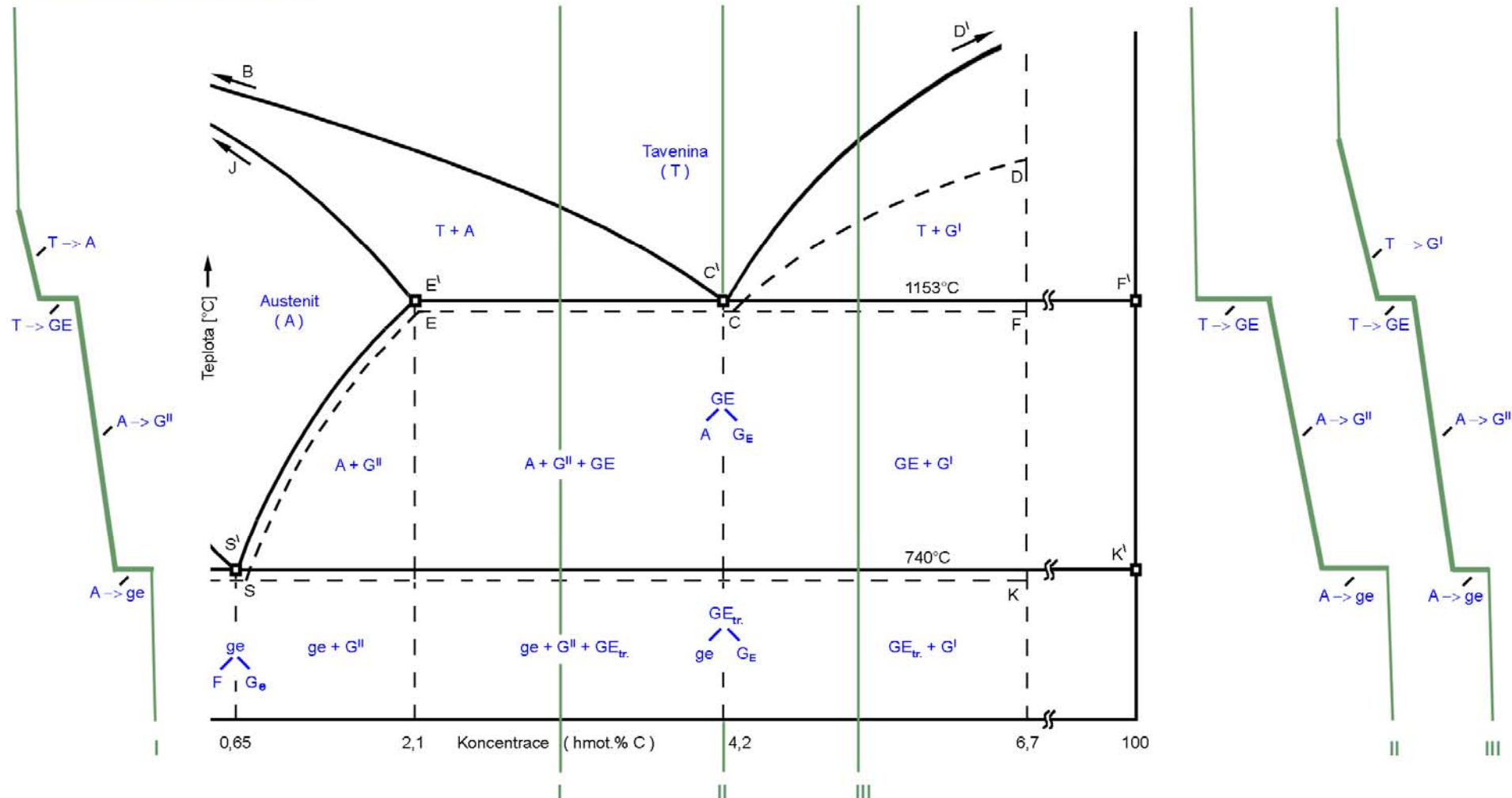
Obr.2 Fázový popis stabilní soustavy Fe-C



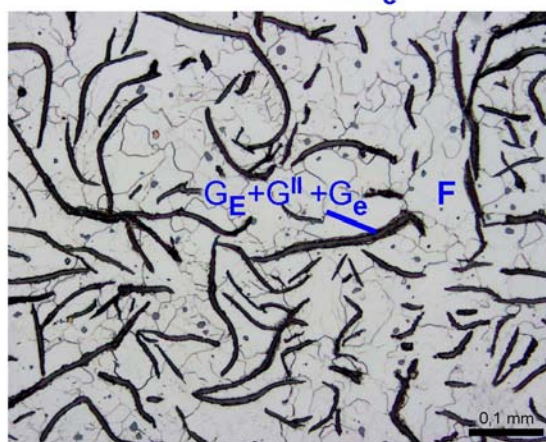
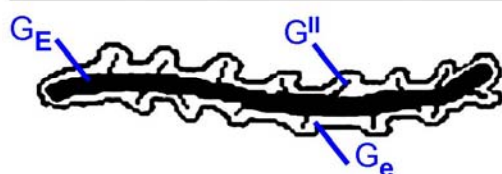
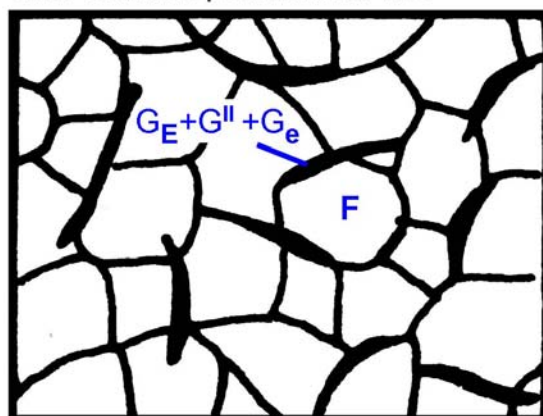
Sauverův fázový diagram



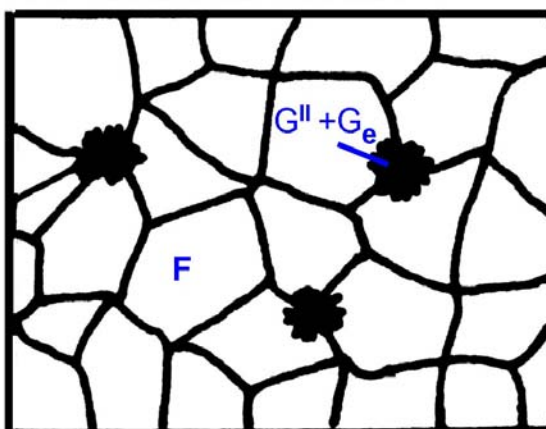
Obr.3 Přeměny ve stabilní soustavě Fe-C



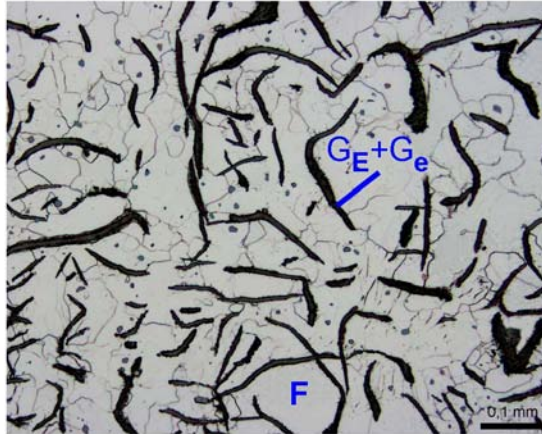
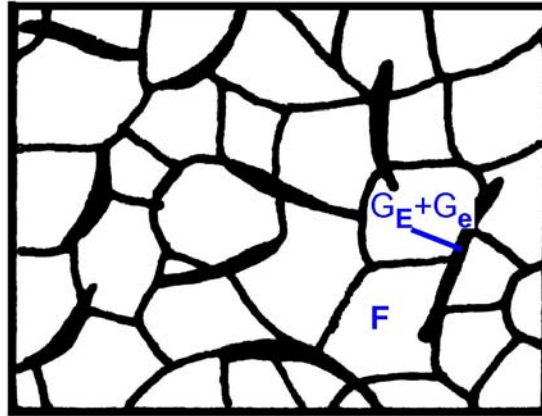
Obr.4 Struktura podeutektické LLG



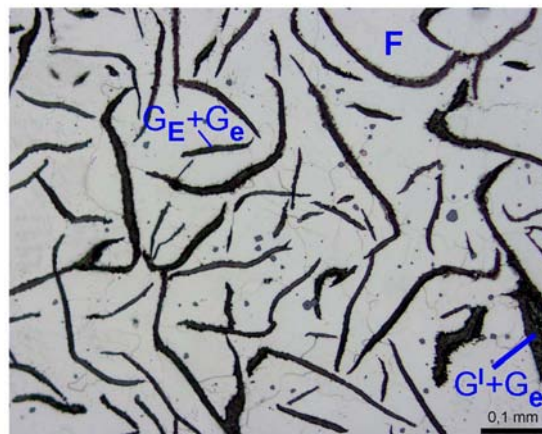
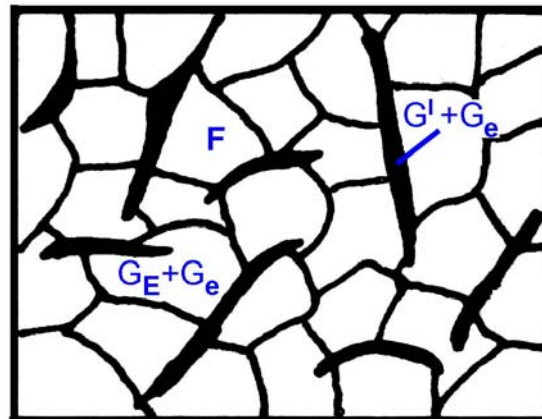
Obr.5 Struktura nadeutektoidní oceli



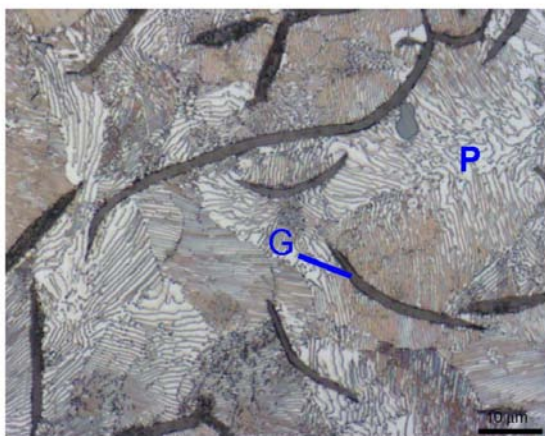
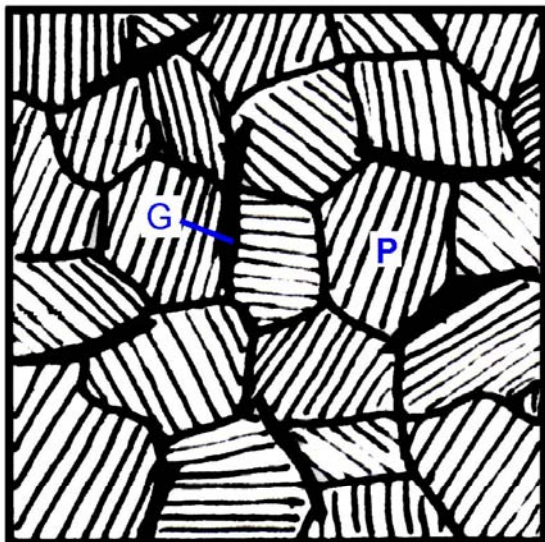
Obr.6 Struktura eutektické LLG



Obr.7 Struktura nadeutektické LLG



Obr.8 Struktura perlitické LLG



Obr.9 Struktura perliticko-feritické LLG

