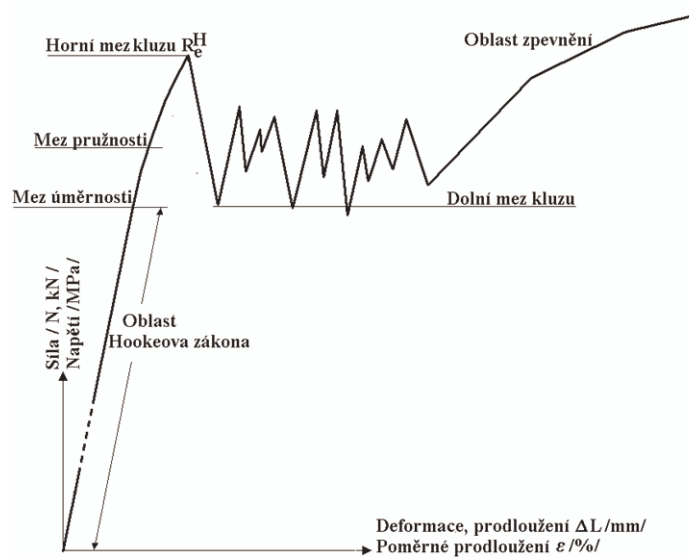


Metody studia mechanických vlastností kovů

1. Zkouška tahem

Zkouška tahem při pomalém zatěžování a za tzv. okolní teploty (10°C – 35°C) je zcela základní a nejběžněji prováděnou zkouškou mechanických vlastností u většiny konstrukčních materiálů (nejen kovových). Výsledky zkoušky tahem do lomu představují tzv. základní mechanické vlastnosti.



Obr. X: Teoretická tahová křivka, [1].

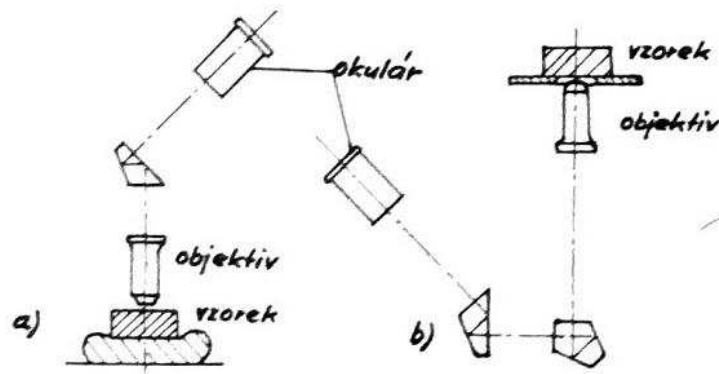
Základními mechanickými vlastnostmi konstrukčních materiálu jsou: statická pevnost, mez kluzu, modul pružnosti, houževnatost a křehkost, tvrdost, odolnost proti opotřebení a jiné. Mechanické zatěžování materiálu má za následek jeho deformaci. Podle stavu, ke kterému dojde po odlehčení, jsou deformace v zásadě pružné (elastické) či trvalé (plastické). Při nepřiměřeně vysokém namáhání dojde obvykle k nepřípustným deformacím, případně k porušení celistvosti (lomu).

Působení síly na těleso se vyjadřuje mechanickým napětím, tedy zatížením na jednotku plochy průřezu tělesa. Pokud síla působí kolmo na daný průřez, jedná se o normálové napětí, vyjádřené

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \tag{1.1}$$

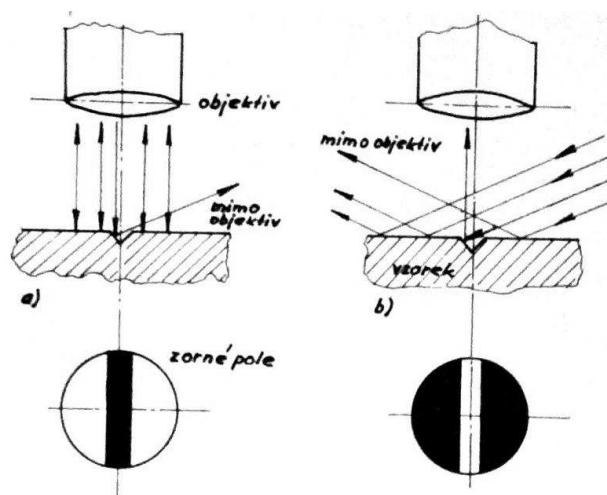
2. Světelná mikroskopie

Světelná mikroskopie je nejrozšířenější metoda přímého pozorování vnitřní stavby kovů a slitin. Využíváme ji ke studiu a kontrole struktury materiálů. V metalografii využíváme tzv. metalografický mikroskop. Existují dvojího typu: normální-a) a tzv. převrácený-b), viz obr. 1.

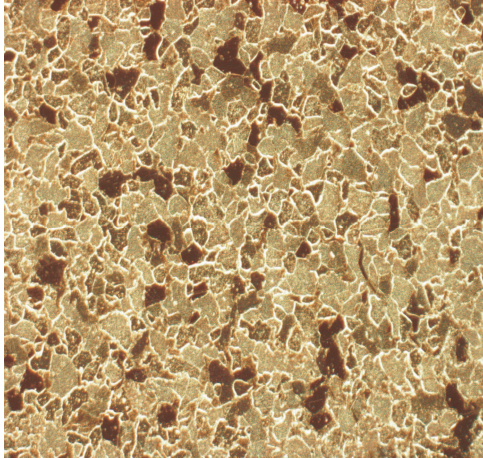


Obr. X: Schéma optických mikroskopů.

Většinou se používá druhá možnost, protože vzorek můžeme dobře nasvítit. Při použití prvního způsobu se musí přistavit lampa, protože vzorek není průhledný, tudíž ho musíme nasvětlovat, ne prosvětlovat. Uvnitř mikroskopu je systém čoček, které tvoří objektiv a okulár. Celkové zvětšení získáme, když dosadíme do vztahu: $Z_{\text{celkové}} = Z_{\text{objektivu}} \times Z_{\text{okuláru}}$ Metalografický mikroskop má několik dalších funkcí, jako je například několik intenzit osvětlení, několik druhů barevných filtrů, několik druhů clon atd. Clony využíváme pro přechod ze světlého pole (light field) do tmavého pole (dark field). Světlé pole používáme při pozorování jednotlivých složek materiálů. Naopak tmavé pole zvýrazňuje hranice zrn, viz obr. 2.



Obr. X: Schéma odrazu světelných paprsků.

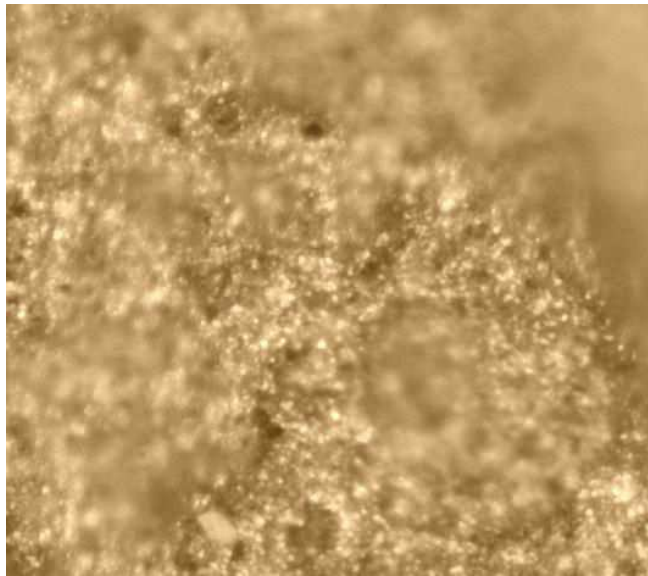


a) světlé

b) tmavé

Obr. X: Rozdíl mezi světlým a tmavým polem.

Světelný mikroskop má malou hloubku ostrosti, viz obr. X, proto se nehodí pro pozorování lomů. Pokud lomy pozorovat chceme, musíme vyfotit mnoho sekvencí fotek, viz odstavec 3D rekonstrukce lomu.



Obr. X: Zobrazení části lomové plochy.

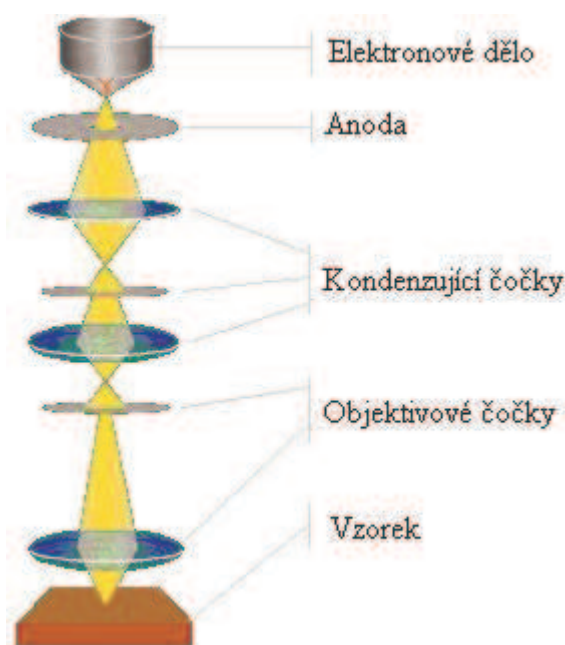
3. Elektronová mikroskopie

Dva základní typy mikroskopů, které se v elektronové mikroskopii vyskytují jsou SEM - Scanning Electron Microscopy v češtině znamená Rastrovací (řádkovací) Elektronová Mikroskopie a TEM – Transmision Electron Microscopy v češtině Transmisní Elektronová Mikroskopie. Jak už z názvu vyplývá bude se zde pracovat s elektrony. První metoda funguje na principu ostřelování vzorku elektrony a sledování výsledků. Jednotlivé části si popíšeme na následujícím obrázku.

3.2.2. SEM

Metoda funguje na principu ostřelování vzorku elektrony a sledování výsledků pomocí detektorů. Jednotlivé části si popíšeme na následujícím obrázku (obr. X).

Schéma SEM



Obr. X: Schéma SEMu.

Elektronové dělo – Uvnitř elektronového děla je žhavená katoda (wolframové vlákno), která emituje elektrony

Technické materiály na bázi železa (oceľe, litiny)

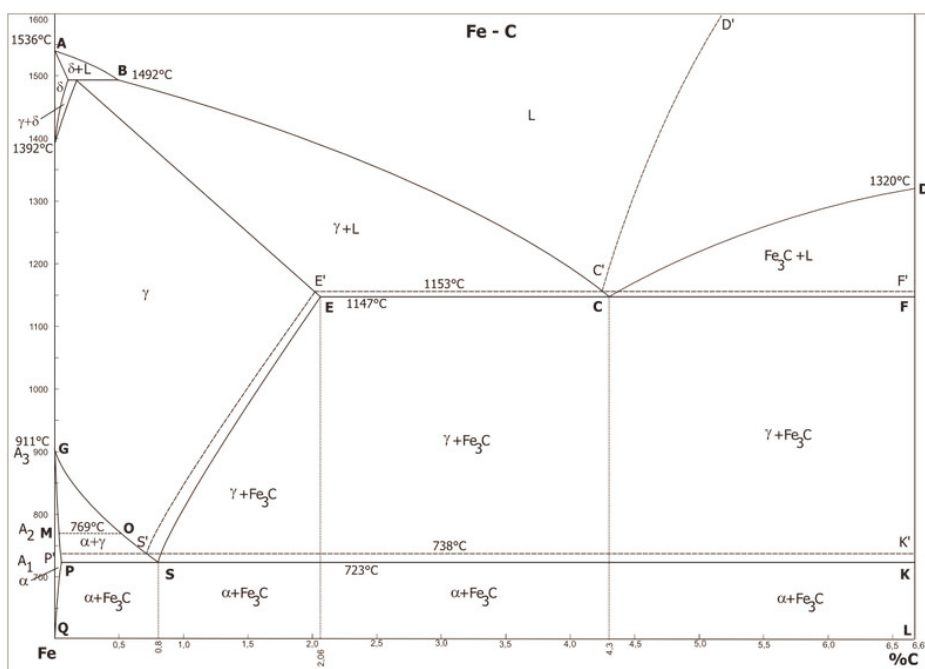
1. Diagram Fe-C

Čisté železo se vyskytuje ve dvou krystalických modifikacích: Při teplotě pod 911°C je stabilní železo s **kubickou prostorově centrovanou mřížkou (BCC)**, které označujeme jako **α -Fe**. Při teplotách v intervalu 910 – 1392°C má železo **kubickou plošně centrovanou mřížku (FCC)** a označuje se **γ -Fe**. Nad teplotu 1392°C je stabilní opět modifikace s kubickou prostorově centrovanou mřížkou a nazývá se **δ -Fe**. Bod tání čistého železa je 1539°C.

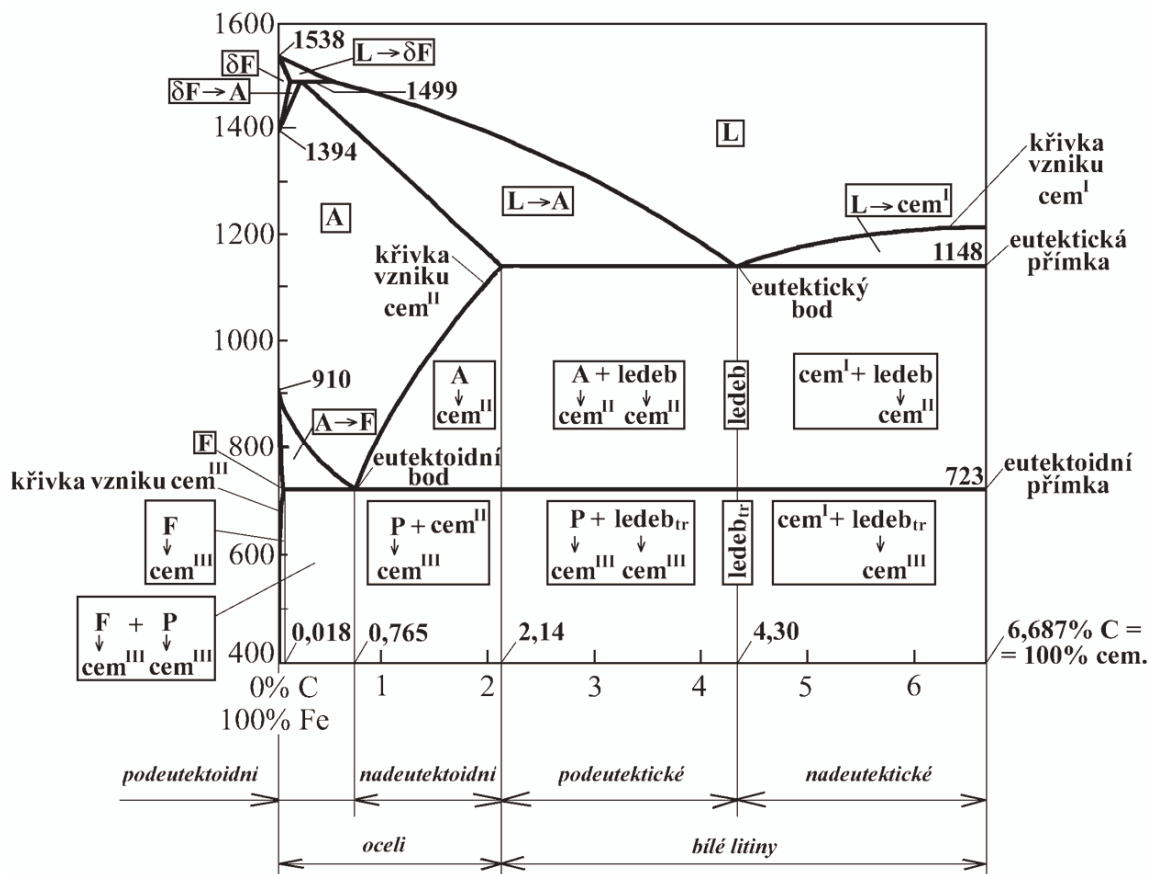
Hlavním příměsovým prvkem ve slitinách železa je uhlík, který tvoří se železem intersticiální tuhý roztok. Tuhý roztok uhlíku v α -Fe se nazývá ferit. Rozpustnost uhlíku v α -Fe je velmi nízká (max. 0,018% při teplotě 723°C). Tuhý roztok uhlíku v γ -Fe se nazývá austenit. Rozpustnost uhlíku v γ -Fe je podstatně vyšší (max. 2,11% při teplotě 1147°C). Tuhý roztok uhlíku v δ -Fe se označuje jako δ -ferit.

Při vyšším obsahu uhlíku než udává uvedená rozpustnost dochází k vylučování **karbidu železa Fe_3C (cementitu)**, případně **grafitu**.

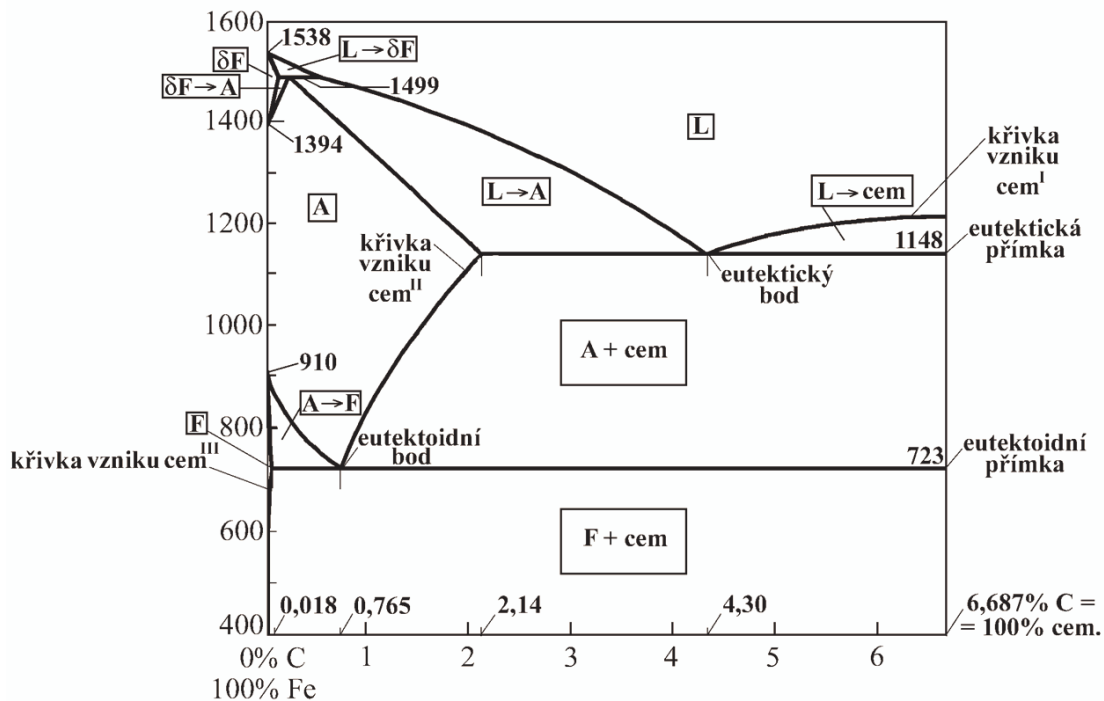
Oblasti stability jednotlivých strukturních složek za rovnovážných podmínek znázorňuje rovnovážný fázový diagram železo – uhlík. Podle toho, zda se při krystalizaci vylučuje cementit nebo grafit, rozlišujeme tzv. **stabilní systém Fe-C** (železo – grafit) a **metastabilní systém Fe-Fe₃C** (železo – cementit). Ke krystalizaci podle stabilního rovnovážného diagramu Fe-C dochází u slitin železa s obsahem C vyšším než 2,11% při velmi nízkých rychlostech ochlazování. Slitiny železa s méně než 2,11% uhlíku krystalizují prakticky vždy podle metastabilního diagramu Fe-Fe₃C (Obr. 1).



Obr. 1: Diagram Fe-C, Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..



Obr. 2: Binární rovnovážný diagram Fe – Fe₃C (strukturní popis), Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..



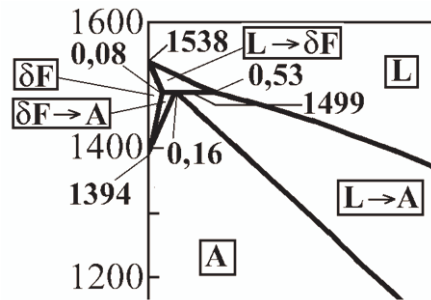
Obr. 3: Binární rovnovážný diagram Fe – Fe₃C (fázový popis), Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..

1.1. Popis diagramu

Diagram Fe – Fe₃C na obr. X-X slouží ke zjišťování struktury zkoumané slitiny při určité teplotě. V následujícím textu se blíže seznámíme se změnami, které se ve struktuře materiálu odehrávají při poklesu teploty z oblasti taveniny, až do pokojové teploty 20°C. Budeme-li materiál ohřívat, budou v něm probíhat stejné procesy, avšak v opačném pořadí.

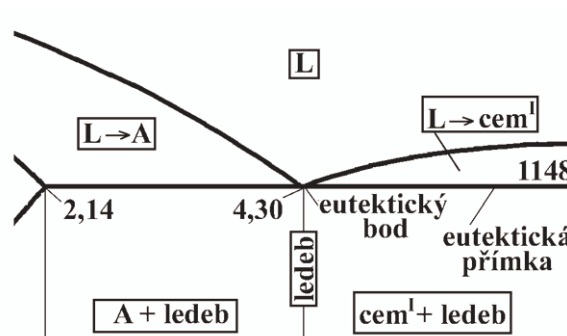
Diagram Fe – Fe₃C můžeme rozdělit na několik typických oblastí a studovat je postupně:

Oblast peritektické přeměny (Obr. 4) v levé horní části diagramu:



Obr. 4: Oblast peritektické přeměny, Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..

V koncentračním rozmezí do 0,08% C krystalizuje tavenina přes směs taveniny a α feritu přímo na α ferit. Od 0,08 do 0,16% C krystalizuje tavenina na směs taveniny a α feritu. Ta při peritektické teplotě 1499°C prodělá peritektickou reakci na směs α feritu a austenitu a poté překrystalizuje na austenit. Od 0,16 do 0,53% C krystalizuje tavenina na směs taveniny a α feritu. Při 1499°C proběhne peritektická reakce a vznikne směs taveniny a austenitu. Krystalizace je dokončena vznikem austenitu. Při koncentraci uhlíku více než 0,53hm.% dochází k přímé krystalizaci taveniny na směs taveniny a austenitu a na samotný austenit.



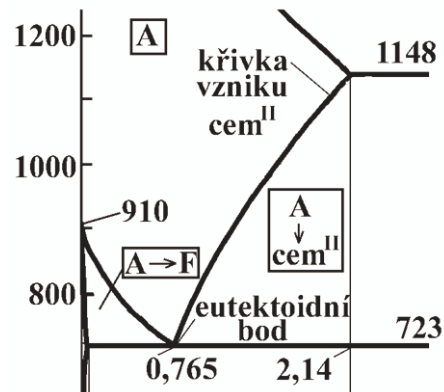
Obr. 5: Oblast eutektické transformace, Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..

Oblast eutektické transformace (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Eutektická transformace probíhá při teplotě eutektické 1148°C v materiálech, které obsahují 2,14 až 6,687hm.% C. Její podstatou je transformace taveniny na eutektikum - ledeburit. K přímé přeměně 100% taveniny na 100% eutektika dochází pouze při koncentraci 4,30% C.

Je-li v materiálu méně než 4,30% C, krystalizuje nejdříve tavenina na austenit (primární krystalizace). Přitom se tavenina obohacuje o uhlík až na eutektickou koncentraci 4,30% C a

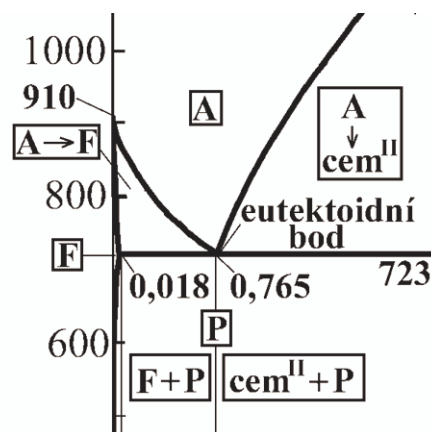
při dosažení eutektické teploty se její zbytek mění na eutektikum. Proto je ve struktuře takového materiálu těsně pod teplotou 1148°C austenit a ledeburit.

U nadeutektických litin, které obsahují více než 4,30% C, dochází nejprve ke krystalizaci primárního cementitu. Přitom se zbývající tavenina ochuzuje o uhlík až na 4,30% C a při 1148°C se mění na ledeburit. Po ukončení eutektické transformace je v materiálu primární cementit a ledeburit.



Obr. 6: Oblast sekundárního cementitu, Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..

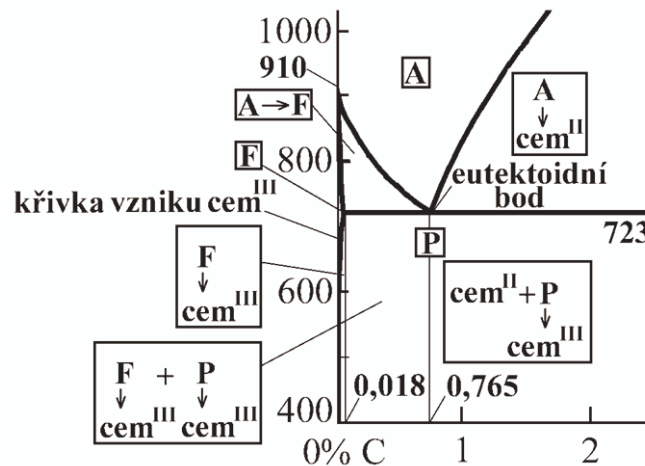
Oblast vzniku sekundárního cementitu (Obr. 6). Maximální rozpustnost uhlíku v austenitu je 2,14% při teplotě 1148°C, minimální je 0,765% při teplotě 723°C. V důsledku tohoto poklesu rozpustnosti se s klesající teplotou uvolňuje z austenitu uhlík a tvoří sekundární cementit. Tak austenit vyrovnává své složení na rovnovážné odpovídající okamžité teplotě (v diagramu je toto složení dáno průsečíkem křivky vzniku cem^{II} a čáry teploty). Cem^{II} je vylučován z každého austenitu, který se vyskytne v celé oblasti od křivky vzniku cem^{II} až do 6,687% C v teplotním rozmezí 1148°C až 723°C.



Obr. 7: Oblast eutektoidní transformace, Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..

Oblast eutektoidní transformace (Obr. 7). Tato reakce probíhá při eutektoidní teplotě 723°C v materiálech obsahujících 0,018 až 6,687hm.% C. Podstatou přeměny je transformace austenitu na eutektoid – perlit. K přímé přeměně 100% austenitu na 100% perlitu dochází pouze při koncentraci 0,765% C. Je-li v materiálu méně než 0,765% C, překrystalizuje austenit nejdříve na ferit. Přitom se austenit obohacuje o uhlík až na eutektoidní koncentraci

0,765% C a při dosažení eutektoidní teploty se jeho zbytek mění na eutektoid. Proto je ve struktuře takového materiálu těsně pod teplotou 723°C ferit a perlit. U ocelí, které obsahují více než 0,765% C, dochází v důsledku změny rozpustnosti uhlíku v austenitu nejprve ke vzniku cem^{II} . Tím se zbývající austenit ochuzuje o uhlík až na 0,765% C a při 723°C se mění na perlit. Po ukončení eutektoidní transformace obsahuje materiál sekundární cementit a perlit.



Obr. 8: Oblast vzniku terciárního cementitu, Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..

Oblast vzniku terciárního cementitu (Obr. 8). Maximální rozpustnost uhlíku ve feritu je 0,018% při teplotě 723°C, minimální je uváděna v řádu $10^{-7}\%$ při teplotě 20°C. V důsledku tohoto poklesu rozpustnosti se z feritu při klesající teplotě uvolňuje uhlík a tvoří terciární cementit. Ferit tak vyrovnává své složení na rovnovážný stav odpovídající okamžité teplotě (v diagramu je toto složení dáno průsečíkem křivky vzniku cem^{III} a čáry teploty). cem^{III} je vylučován z každého feritu, který se vyskytne v celé oblasti od křivky vzniku cem^{III} až do 6,687% C a v teplotním rozmezí 723°C až 20°C.

1.2. Složky diagramu železo-uhlík: tuhé roztoky, směsi, sloučeniny

1) **Tuhé roztoky – α ferit:** má atomovou mřížku kubickou prostorově centrovanou. Existuje pod teplotou 911°C (G). Fáze α je magnetická. Maximální rozpustnost uhlíku je 0,02 %.

austenit: je přesycený tuhý roztok uhlíku v železe γ (gama). Je to jedna to ze strukturních složek slitin železa (ocelí i litin). Krystalizuje v krychlové plošně centrované (středěné) mřížce. Při tuhnutí se vyskytuje v rozmezí teplot 1 390°C - 898°C a při tavení 911°C - 1 394°C.

δ ferit: má atomovou mřížku kubickou plošně centrovanou. Existuje v intervalu teplot od 910°C do 1 400°C. Fáze γ je nemagnetická.

Martenzit vzniká prudkým ochlazením austenitu; zakalení nad kritickou rychlostí ochlazování; metastabilní, přesycený tuhý roztok uhlíku v alfa-železe; kalením se austenit s kubickou plošně centrovanou mřížkou změní na martenzit s tetragonální prostorově centrovanou mřížkou, uhlík zadržovaný v mřížce vyvolává pnutí, které je příčinou tvrdosti martenzitu; martenzit je po cementitu nejtvrdější a nejkřehčí složkou oceli, má jehlicovitou strukturu.

2) Chemické sloučeniny – cementit Fe₃C

Cementit Fe₃C má kosočtverečnou (rhombickou) krystalickou mřížku, je to tvrdá magnetická struktura. Podle způsobu vzniku rozlišujeme cementit na primární - vyloučený z taveniny, sekundární – vyloučený při ochlazování z austenitu a terciární – vyloučený při ochlazování z feritu a dále perlitický a ledeburitický.

3) **Směsi – perlit:** eutektoidní směs feritu a cementitu; sestává z 88 % feritu a 12 % cementitu. Existuje při teplotách pod 723°C; perlit je struktura volně chlazených ocelí, vzniká rozpadem austenitu; obsahuje dvě fáze - ferit a cementit; v základní feritické struktuře tvoří cementit buď rovnoběžné lamely (lamelární p.), nebo zrna (globulární p.); globulární perlit je měkkší a houževnatější než lamelární perlit, globulární perlit se připravuje popouštěním lamelárního perlitu

ledeburit: eutektická směs austenitu a cementitu, resp. perlitu a cementitu; sestává z 51,4 % austenitu/feritu a 48,6 % cementitu

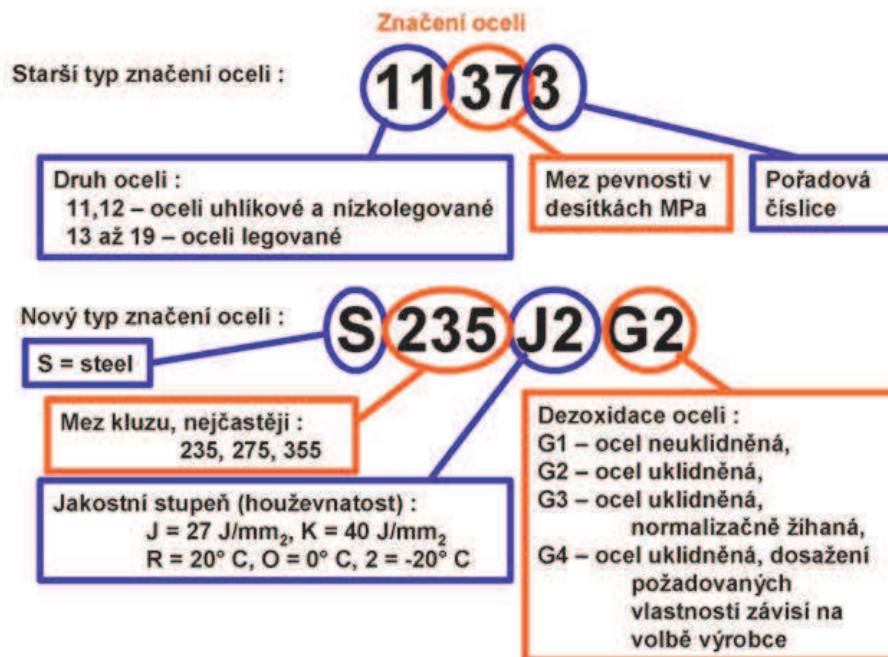
Bainit je nerovnovážná strukturní složka oceli složená ze směsi feritu a cementitu; vzniká rozpadem austenitu mezi 500 a 723°C, ferit má jehlicovitou strukturu; bainit je tvrdý, tvárný, houževnatý.

4) Ocel x litina

Oceli: železo + cementit s obsahem uhlíku do 2,14 % (dále mohou být obsaženy další doprovodné a legující příměsi)

Litiny: železo + uhlík s obsahem nad 2,14%. Uhlík je nejčastěji ve formě grafitu, potom může mít litina menší obsah uhlíku než 2,14%, nebo ve formě cementitu, potom musí být obsah uhlíku větší než 2,14 (jinak by šlo o ocel)

1.3. Značení oceli



Obr. 9: Značení oceli, Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..

3. Stereologie

3.1. Kvantitativní metalografie

Používá se k detailní analýze struktury a k přesnému hodnocení vztahů mezi strukturou a mechanickými, popř. fyzikálními vlastnostmi materiálu. Např. výskyt oxidických nečistot v oceli ovlivňuje pevnost. Kvantitativní metalografií lze stanovit množství nečistot a stanovit pak hodnotu, o kterou se pevnost jejich vlivem sníží. Stanovuje se tak množství jednotlivých fází ve struktuře, rozložení a množství armujících složek v kompozitních materiálech, velikost zrna aj. Tato metoda je již plně automatizována a využívá obecných zásad stereologie, tj. matematické metodiky k převodu obrazu získaného pozorováním v rovině na tvar a rozměr prostorový.

Stereologie se zabývá odhadem geometrických charakteristik trojrozměrných struktur na základě pozorování sond nižší dimenze (rovin řezu, projekcí). Ve stereologii se rozlišuje klasický a modelový přístup. V prvním z nich je struktura považována za deterministickou a pouze sondy jsou náhodné, v druhém přístupu se již struktura