

— stabilan sistem    - - - - - metastabilan sistem  
 Slika – Ravnotežni dijagrami slabilnog sistema železo–grafit

## Stabilni sistem železo–grafit

U stabilnom sistemu komponente su železo i grafit; sistem služi kao pomoćno sredstvo za opis kristalizacije i prekrystalizacije sivog livenog gvožđa, sivog sirovog gvožđa i za opis toka grafitizacije pri kojem dolazi do raspada metastabilnog karbida železa–cementita. Stabilan oblik ugljenika u legurama Fe–C jeste grafit, to znači ako se rastop binarne legure Fe–C (na pr. sa sadržajem 3% C) hladi dovoljno malom brzinom, ugljenik je onda prisutan kao grafit. Ako ovaj binarni sistem očvršćava po metastabilnom sistemu, njegovo hlađenje je, u poredjenju sa prethodnim slučajem – većom brzinom. U čistim binarnim legurama Fe–C je tada karakter rezultujuće strukture uslovljen samo brzinom hlađenja, a stabilnom sistemu legura odgovara struktura u kojoj je ugljenik prisutan kao grafit. U stabilnom sistemu zato nema ledeburita, sekundarnog cementita, perlita, itd. Kada se neka od ovih strukturalnih komponenata pojavi u strukturi legura Fe–C, to znači da se promena pri hlađenju takvih legura ne odvija u skladu sa stabilnim sistemom, bilo u potpunosti ili samo u jednom delu prema metastabilnom sistemu.

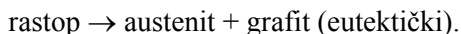
U tehničkim legurama, koje su kompleksne legure, pored brzine hlađenja ima znatan uticaj takođe i hemijski sastav, tj. količina grafitizirajućih elemenata (Si) i elemenata koji stabilizuju cementit (Mn, Cr). U legurama sa povećanim sadržajem elemenata koji potpomažu pojavu karbida železa, biće i pri veoma maloj brzini hlađenja odgovarajuća rezultujuća struktura metastabilnog sistema Fe–Fe<sub>3</sub>C. Bude li, suprotno tome, u leguri preovlađujući uticaj grafitizacionih elemenata, odvišće se kristalizacija i prekrystalizacija u skladu sa stabilnim sistemom i pri povećanoj brzini hlađenja.

Ravnotežni stabilni dijagram sistema železo–grafit (slika) ima značaj za legure sa sadržajem ugljenika iznad 2,1% (izuzetno iznad 0,69%). S obzirom na različite stabilnosti cementita i grafita, ravnoteža između tih faza i čvrstog rastvora ugljenika u železu je različita. Na primer, koncentracija ugljenika u austenitu koji je na određenoj temperaturi u ravnoteži sa grafitom razlikuje se od koncentracije ugljenika u austenitu koji je na istoj temperaturi u ravnoteži sa cementitom.

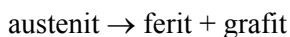
U dijagramu na gornjoj slici su radi upoređenja crtasto označene linije metastabilnog sistema. Kao posledica manje rastvorljivosti C u austenitu u stabilnom sistemu, kriva S'E' je pomerena ulevo. Iz istog razloga je ka nižim koncentracijama ugljenika pomerena kriva likvidusa (C'D'). Krive koje prikazuju ravnotežu između rastopa i austenita (BC i JE) i dva čvrsta rastvora (GOS) imaju u oba sistema isti položaj. Zbog toga što se eutektička, odnosno, eutektoidna promena ostvaruje na temperaturi na kojoj se seku krive BC' i C'D' (odnosno GS' i S'E') produkti promene će imati sastave koji odgovaraju tim preseccima, to znači pomeranje krivih SE i CD ka nižim sadržajima ugljenika takođe i povećanje eutektičke (1153°C) i eutektoidne temperature (738°C) kao i sniženje sadržaja ugljenika u eutektičkoj (4.26% C) i eutektoidnoj smeši (0.69% C).

Ravnotežni stabilni dijagram sistema železo–grafit se iz praktičnih razloga crta obično od eutektoidne koncentracije ugljenika do koncentracije 6.68% C. Granica 6.68% C je izabrana radi bolje uporedivosti sa sistemom železo–cementit; u sistemu železo–grafit ta granica nema nikakav fizički smisao.

Kristalizacija legure I (podeutektičko sivo liveno gvožđe) počinje na krivoj likvidus (BC'); iz rastopa se izlučuju prvi kristali (dendriti) austenita sastava koji daje tačka na krivoj JE'. Pri padu temperature raste sadržaj austenita čiji se sastav menja prema krivoj JE', a smanjuje se količina rastopa čiji sastav odgovara za datu temperaturu tački na krivoj BC'. Na eutektičkoj temperaturi austenit dostiže graničnu koncentraciju datu tačkom E' (2.11% C) i u ravnoteži je sa rastopom koncentracije date tačkom C' (4.26% C). Rastop sa eutektičkom koncentracijom očvršćava na konstantnoj temperaturi, pri kojoj su u ravnoteži tri faze i gde se odvija eutektička promena:



Stvorena eutektička smeša austenita i kristalastih lamela eutektičkog grafita naziva se grafitni eutektikum (za razliku od cementitnog eutektikuma – ledeburita u metastabilnom sistemu, ovde nema poseban naziv) i popunjava prostor između primarno stvorenih dendrita austenita. Pri daljem padu temperature, između eutektičke i eutektoidne temperature opada rastvorljivost ugljenika u austenitu prema krivoj E'S', primarni i eutektički austenit presičuje se ugljenikom, koji se izlučuje kao sekundarni grafit i većinom se deponuje preko lamela eutektoidnog grafita (zato nije kao samostalna strukturalna komponenta uveden u ravnotežni dijagram). Na eutektoidnoj temperaturi austenit ima eutektoidnu koncentraciju (0.69% C), a na konstantnoj temperaturi odvija se eutektoidna promena:



iz austenita nastaje grafitni eutektoid – smeša ferit–grafit. Za razliku od cementitnog eutektoida – perlita, nema poseban naziv. Slično kao i sekundarni grafit, izdvaja se takođe eutektoidni grafit (G<sub>e</sub>) na lamele

grafita u već postojećoj strukturi i isto tako se grafitni eutektoid obično u strukturi ne sreće (zato se takođe u ravnotežnom dijagramu kao samostalna strukturna komponenta ne daje).

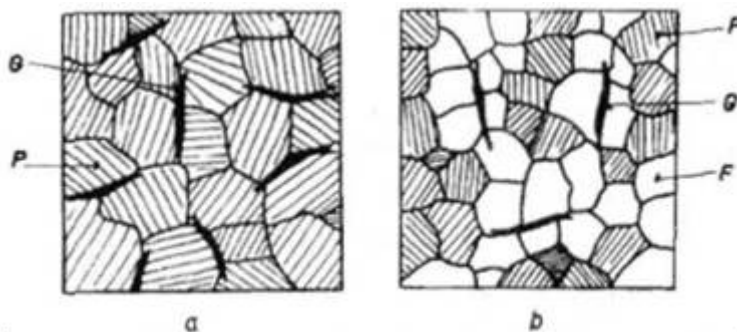
Rezultujuću strukturu legure I čine osnovna metalna masa (matrica) ferita, u koju su utisnute grafitne lamele. U ravnotežnom dijagramu je tada pod nazivom „grafit“ u rezultujućoj strukturi sadržan udeo eutektičkog ( $G_{eut}$ ), sekundarnog (II G) i eutektoidnog grafita ( $G_e$ ). Za razliku od metastabilnog sistema, ovde se rezultujuće strukture legura stabilnog sistema označavaju uopšteno. U rezultujućoj strukturi odlivka od sivog livenog železa takođe se pojavljuju relativno grube lamele grafita, to znači, da ni grafitni eutektikum (eutektički grafit + austenit) stvoren iz rastopa na eutektičkoj temperaturi nije nastao od finih čestica obe faze (kao što je to, na primer, pri obrazovanju ledeburita, kod belog livenog gvožđa). Kod stabilnih sistema je produkt eutektičke promene - grublja smeša grafita i austenita - tzv. anomalni eutektikum, pa se zato takođe u rezultujućoj strukturi posle hlađenja nalaze deblje grafitne lamele.

Legura II (nadeutektoidno sivo liveno gvožđe), počinje da očvršćava ako temperatura rastopa opadne na temperaturu koja odgovara tački na likvidus krivoj C'D'. Iz rastopa se izlučuju grube lamele primarnog grafita. Specifična masa grafita je približno 3 puta manja od specifične mase rastopa, pa zato lamele primarnog grafita mogu isplivati na površinu rastopa. Rastop se postepeno oslobađa ugljenika prema krivoj likvidus D'C' i na eutektičkoj temperaturi dostiže eutektičku koncentraciju. Slično kao i kod legure I, preobražava se preostali rastop na konstantnoj eutektičkoj temperaturi u grafitni eutektikum. Pri daljem snižavanju temperature se iz eutektičkog austenita izlučuje sekundarni grafit i na eutektoidnoj temperaturi se preostali austenit preobražava u grafitni eutektoid (smeša ferita i eutektoidnog grafita). Rezultujuću strukturu legure II čini osnovna metalna feritna masa u kojoj su raspoređene grube (primarne) i fine (eutektičke) grafitne lamele; obe sadrže takođe sekundarni i eutektoidni grafit.

Legura III (eutektičko sivo liveno gvožđe) očvršćava na najnižoj temperaturi ( $1153^{\circ}\text{C}$ ). Na konstantnoj temperaturi se sav rastop preobražava u grafitni eutektikum. Pri daljem snižavanju temperature, opada rastvorljivost ugljenika u austenitu (kriva S'E'), austenit postaje prezasićen ugljenikom koji se izlučuje kao sekundarni grafit i deponuje (slično kao kod legura I i II) na lamele eutektoidnog grafita. Austenit eutektoidne koncentracije se na konstantnoj eutektoidnoj temperaturi raspada na smešu ferit–grafit (grafitni eutektikum).

Nadeutektoidni čelici nemaju u toku kristalizacije, za razliku od livenog gvožđa, eutektičku promenu; grafit se zato izlučuje samo u čvrstom stanju i to bilo iz prezasićenog austenita ispod krive S'E', kao sekundarni grafit (u obliku komadića, ljuspi) ili pak na eutektoidnoj temperaturi kao komponenta grafitnog eutektoida (deponuje se na pločicama sekundarnog grafita). Rezultujuću strukturu čelika tada obrazuju ferit i grafit. Ako je u nekim slučajevima kod nadeutektoidnih čelika poželjna grafitna struktura (obezbeđuje dobre klizne osobine), ona se može dobiti delimičnom termičkom obradom legure i njenim hlađenjem prema metastabilnom sistemu.

Pojava rezultujućih stabilnih struktura koje čine ferit i grafit (slika dole) je naročito na nižim temperaturama otežana (zahteva se veoma mala brzina hlađenja). Na primer kod podeutektičkih, livenih gvožđa koja su očvrsla prema stabilnom sistemu (pojava grafitnog eutektikuma sekundarnog grafita), često se na niskim temperaturama austenit preobražava prema metastabilnom sistemu; na eutektoidnoj temperaturi austenit se raspada na perlit – smesu ferita i metastabilnog cementita. U takvom slučaju je rezultujuća struktura sivog livenog gvožđa obrazovana od perlitne matrice sa lamelarnim grafitom (slika dole, a). Ako se eutektoidna promena odvija delom prema stabilnom, a delom prema metastabilnom sistemu, tada će rezultujuća struktura biti obrazovana od ferita, perlita i grafita (slika dole, b).



P–perlit, F–ferit, G–grafit

Slika – Strukture sivog liva: a) perlitna, b) feritno–perlitna

Ravnotežni dijagrami stabilnog i metastabilnog sistema sadrže informacije o kristalizaciji i prekristalizaciji legura železa sa ugljenikom u ravnotežnim uslovima, tj. pri dovoljno maloj brzini hlađenja ili zagrevanja. Omogućuju da se odredi, na primer, temperatura livenja za datu leguru, temperatura plastične obrade (na toplo) i takođe služe kao pomoćno sredstvo na primer pri utvrđivanju temperature žarenja ili kaljenja, itd. Takođe sadrže i rezultujuće strukture onih postupaka termičke obrade koji se odvijaju u uslovima bliskim ravnotežnim.

Kod ugljeničnih čelika, gde osnovni uticaj na strukturu (i osobine) ima ugljenik, može se ravnotežno stanje pratiti pomoću binarnog dijagrama Fe–Fe<sub>3</sub>C (i kad je reč o kompleksnim legurama tj. sa drugim dodacima kao Mn, Si, P i S). Binarni dijagram takođe, može poslužiti za niskolegirane čelike dok za visokolegirane čelike se ne može koristiti. Kod legiranih čelika u kojima preovladjuje uticaj jednog dodatnog elementa korisni su tercijarni dijagrami Fe–C–dodatni element.

Livena gvožđa i sirovo gvožđe, tj. legure železa sa većim sadržajem ugljenika nego što je njegova granična rastvorljivost u austenitu na eutektičkoj temperaturi, pored višeg sadržaja ugljenika, takođe imaju uobičajeno i veći sadržaj dodatnih elemenata (Mn, Si, P, S). Prema hemijskom sastavu rastopa i uslovima očvršćavanja nastaje eutektikum, bilo cementitni ili grafitni. Dok se kod nelegiranih i niskolegiranih belih livenih gvožđa može kristalizacija i preobražaj u čvrstom stanju opisati pomoću binarnog dijagrama Fe–Fe<sub>3</sub>C, to je kod nelegiranog sivog livenog gvožđa nužno koristiti tercijarni sistem Fe–C–Si; uticaj trećeg sastojka (silicijuma) ne može se kod tih legura zanemariti. Primena ravnotežnih binarnih dijagrama stabilnog i metastabilnog sistema je stoga ograničena prisustvom drugih dodataka u leguri Fe–C, koji na različite načine utiču na kritičnu temperaturu i koncentraciju ugljenika. Pored hemijskog sastava, uticajni faktor je i brzina hlađenja ili zagrevanja. Pri termičkoj obradi legura železa, koristi se zagrevanje i hlađenje malim brzinama (nekoliko °C/h) ili velikim brzinama (nekoliko desetina °C/h). U toku termičke obrade može poslužiti ravnotežni dijagram kao pomoć samo za one vidove termičke obrade kad se razmatra legura u ravnotežnom stanju.

Cilj termičke obrade nije samo postizanje ravnotežnog stanja već i stanja sa različitim stepenom nestabilnosti, koja se sa ravnotežnog dijagrama ne mogu odrediti. S obzirom na to da se legure železa sa nižim sadržajem ugljenika tj. čelici u poređenju sa livenim gvožđem više primenjuju, posvetićemo pažnju fizičkim promenama u čvrstom stanju kod čelika.

#### DEFINICIJE I DOPUNE:

**Legure železa:** metalne legure na bazi železa (čelici i livena gvožđa).

**Čisto železo:** metal prelazne grupe atomskog broja 26, atomske mase 56, temperature topljenja 1538°C.

**Alotropske modifikacije železa:** železo je polimorfan metal, jer zavisno od temperature može imati rešetku A2 ( $\alpha$ -Fe od sobne temperature do 912°C i  $\delta$ -Fe od 1394–1538°C) i rešetku A1 ( $\gamma$ -Fe od 912–1394°C).

**Ferit:** intersticijski čvrst rastvor ugljenika u  $\alpha$ -železu; maksimalna rastvorljivost ugljenika u prostomo centriranoj kubnoj rešetki železa iznosi 0,022% na 727°C.

**Austenit:** intersticijski čvrst rastvor ugljenika u površinski centriranoj kubnoj rešetki železa; maksimalna rastvorljivost ugljenika u  $\gamma$ -Fe iznosi 2,14% na 1148°C.

**Cementit:** tvrdo i krto jedinjenje (intermetalno jedinjenje – karbid železa Fe<sub>3</sub>C).

**Grafit:** hemijski slobodan ugljenik koji se pojavljuje kao faza u livenom gvožđu.

**Metastabilan sistem Fe-Fe<sub>3</sub>C:** binarni fazni dijagram u kome su komponente Fe i Fe<sub>3</sub>C.

**Stabilan sistem Fe-C:** binarni fazni dijagram u kome su faze komponente železo i grafit.

**Eutektoidna reakcija:** fazna transformacija pri kojoj se iz jedne čvrste faze dobijaju dve nove čvrste faze.

**Perlit:** smeša feritne i cementitne faze u obliku paralelnih pločica (lamelarna struktura) nastala transformacijom austenita između 727 i 538°C.

**Eutektoidni  $\alpha$ -ferit:**  $\alpha$ -ferit sadržan u perlitu nastao eutektoidnim razlaganjem austenita.

**Čelik:** legura železo–ugljenik sa 0,02–2,14% C. Najčešće su granice 0,05–1,1% C. Čelik može biti toplo ili hladno valjan.

**Eutektoidni cementit:** cementit uključen u perlit koji se obrazuje u toku eutektoidnog razlaganja austenita.

**Eutektoidni čelik:** ugljenični (nelegirani) čelik sa 0,8% C, čija je struktura čisto perlitna.

**Podeutektoidni čelik:** čelik sa manje od 0,8% C, čija je struktura perlitno–feritna.

**Nadeutektoidni čelik:** čelik sa 0,8 do 2,14% C, čija je struktura perlitno–cementitna.

**Belo liveno gvožđe:** legure železo–ugljenik–silicijum (1,8–3,6% C i 0,5–1,9% Si); sadrži veliku količinu cementita pa je zato tvrdo i krto.

**Sivi liv:** legure železo–ugljenik–silicijum (2,5–4,0% C i 1,0–3,0% Si); u sivom livu je znatna količina ugljenika izdvojena u vidu grafitnih lamela, što ga čini dobro površinski obradljivim i otpornim na habanje.

**Invarijantne reakcije u sistemu Fe-Fe<sub>3</sub>C:**

- peritektička reakcija: rastop (0,53% C) + δ-Fe (0.09% C)  $\xrightarrow{1495^{\circ}\text{C}}$  γ (0,17% C),
- eutektička reakcija: rastop (4.3% C)  $\xrightarrow{1148^{\circ}\text{C}}$  γ–austenit (2,14% C) + Fe<sub>3</sub>C (6.67% C) i
- eutektoidna reakcija: austenit (0,8% C)  $\xrightarrow{727^{\circ}\text{C}}$  ferit (0,025% C) + Fe<sub>3</sub>C (6.67% C).