

4. STRUKTURA METALA I LEGURA

Ispitivanjem je utvrđeno da postoje dve vrste materijala:

- Amorfne (nekristalne) materije, i
- Kristalne materije

Amorfne materije su materije kod kojih ne postoji nikakva određena zakonitost rasporeda atoma. Kod amornih materija kao što su: staklo, smola itd., fizička i mehanička svojstva su ista u svim pravcima što nazivamo *izotropijom*. Očvršćavaju u jednom temperaturnom intervalu.

Kristalne materije su one kod kojih su atomi raspoređeni u prostoru po nekom određenom pravilu, što je karakteristično za metale. Od načina raspoređivanja atoma u prostoru zavise i osobine dotične materije, u ovom slučaju metala, dok način međusobnog povezivanja atoma u prostoru nije uvek isti i zavisi od prirode hemijskih elemenata.

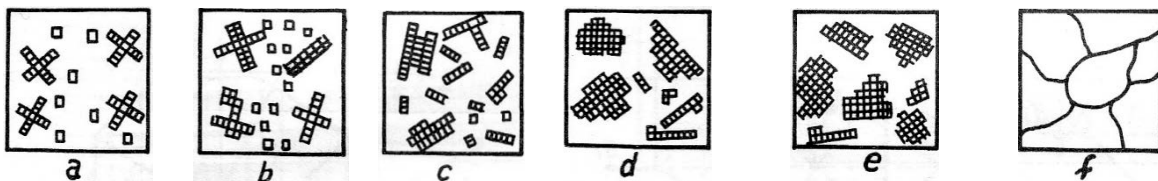
Kristalna struktura metala nastaje pri njegovom prelazu iz tečnog (rastopljenog) u čvrsto stanje, kada se atomi raspoređuju po jednom određenom pravilu stvarajući kristalnu rešetku svojstvenu za dati metal.

Kada bi očvršćavanje metala bilo potpuno slobodno, oblik kristala bi bio uvek geometrijski pravilan. Takav kristal bi bio **monokristal** (pravilnost rasporeda se prostire po celoj zapremini).

Međutim centri kristalizacije se istovremeno pojavljuju, na više mesta, tako da je sam rast kristala ometan kristalima susedima, te kristali ne mogu poprimati uvek pravilni spoljni oblik i istu orijentaciju. Ovako obrazovani kristali sa nepravilnim spoljnim oblikom nazivaju se **kristaliti** ili **zrna**, a struktura sastavljena od kristalita naziva se **polikristalna** što je obično slučaj kod metala i legura.

Rastojanja među atomima u kristalnoj rešetki mogu biti različita u raznim smerovima, što ima za posledicu da su i svojstva kristala u raznim smerovima različita, što se naziva *anizotropijom kristala*. Svojstvo anizotropije metala može često puta biti i skriveno tj. kada su kristali ili kristaliti nepravilno razbacani u svim smerovima, to je vrlo čest slučaj kod metala dobijenih livenjem i tu pojavu nazivamo *kvaziizotropijom* (lažnom izotropijom).

Pri prelazu metala iz žitkog u čvrsto stanje, obično dolazi do smanjenja specifične zapremine metala, usled čega se među kristalima obrazuju pore, mikroskopskih veličina, koje se ponekad ispunjavaju primesama, gasovima ili raznim uključinama. Proces obrazovanja metalnih zrna prikazan je na slici.



a -
obrazovanje
centara
kristalizacije

b,c,d - rast kristala

e - skućenost
prostora ne
dozvoljava pravilno
formiranje kristala

f - zrna
metala

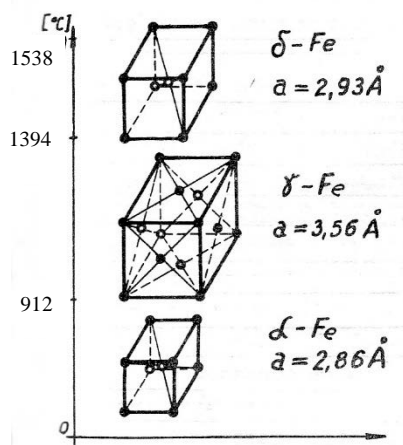
Metal, koji se obradi nekom vrstom obrade, na primer: valjanjem, imaće kristale, odnosno kristalite, usmerene te će njihovo svojstvo anizotropnosti biti ispoljeno i prema spoljnoj strani. U takvim slučajevima obrade pojavljuje se kao neka slojasta građa, slična prirodnim tkivima te ovu vrstu slojaste građe nazivamo **tkivastom teksturom**.

Što se tiče otpornosti kristalne skupine i osamljenog kristala, otpornija je kristalna skupina i ima mnogo bolja svojstva čvrstoće, jer su u skupini kristali, odnosno kristaliti međusobno čvrsto povezani te sila koja deluje na pojedine kristale nailazi na veliki otpor susednih kristala na koje se prenosi dejstvo sile indirektnim putem, tj. preko kristala suseda.

4.1 POLIMORFIJA

Razmatrajući kristalne rešetke primetili smo, iz navedenih primera, da pojedini metali kristaliziraju u više tipova rešetki, što zavisi od temperature na kojoj se nalaze. Ovu pojavu nazivamo **polimorfijom**.

Polimorfni metala ima oko 20. Za nas je najinteresantnije gvožđe kao polimorfan metal. Na slici su prikazane polimorfne promene gvožđa u zavisnosti od temperaturnog stanja. Vidimo da **α -gvožđe** u temperaturnom području do 912°C kristališe po prostorno centriranoj kubnoj rešetki, od 912°C - 1394°C α -gvožđe rekristalizira u površinski centriranu kubnu rešetku - **γ -gvožđe**, kod koje ostaje u sredini slobodan prostor za uključivanje nekog stranog atoma, najčešće atoma ugljenika. Od 1394°C do 1538°C γ -gvožđe opet rekristalizira u prostorno centriranu kubnu rešetku – **δ -gvožđe**.



Ove temperaturne tačke rekristalizacije tj. prelaza gvožđa iz jedne modifikacije u drugu nazivamo **kritičnim temperaturama**.

Sa polimorfni promenama stoje u tesnoj vezi promene mehaničkih svojstava metala kao i promene specifične zapremine, jer dve različite rešetke, obzirom da nemaju isti raspored atoma, neće imati ni istu gustinu, što znači da svaka promena rešetke ima za posledicu promenu gustine odnosno specifične zapremine dotičnog metala. Praćenje polimorfni promena vrši se merenjem najmanjih promena zapremine pomoću dilatometra.

4.2 KRISTALNE REŠETKE LEGURA

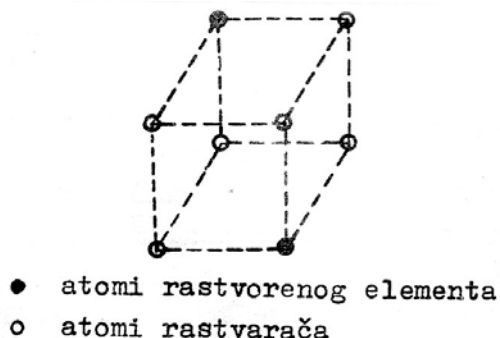
U tehničkoj praksi, mi nemamo čistih metala već samo tehnički čistih metala (čisti metali uobičajenog kvaliteta ne mogu se smatrati za sisteme sa jednom komponentom, jer sadrže uvek veće ili manje količine primesa (nečistoća)). Ovi, tehnički čisti metali, nisu uvek pogodni kao konstruktivni materijali, obzirom na svoje mehaničke osobine, jer ne odgovaraju svim postavljenim zahtevima vezanim za uslove rada konstruktivnih elemenata. Iz tih razloga se u konstrukcijama najviše koriste legure, koje se dobijaju stapanjem dva ili više metala, u cilju dobijanja odgovarajućih osobina zahtevanih postavljenom konstrukcijom.

Obzirom na kristalnu rešetku, stvaranjem legura, imamo tri slučaja:

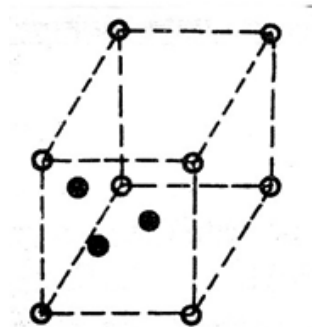
- 1- **Stvaranje smeše raznih samostalnih kristala (mehanička mešavina)**, održavanjem raznih samostalnih rešetki legirajućih elemenata. Znači da su kod ovih legura izmešani kristali legirajućih elemenata koji su zadržali svoje sopstvene rešetke. Osobine ovih legura zavise od razmere rastopljenosti sastavnih komponenata, tj. biće kombinovane osobinama komponenata.
- 2- **Stvaranje zajedničke rešetke**, ali tako da ostane združena rešetka jednog od elemenata, obično najviše zastupljenog. Atomi manje zastupljenog (rastvorenog) elementa ulaze u rešetku osnovnog elementa (rastvarača). Tada imamo **čvrst rastvor** a nastale kristale nazivamo **mešovitim kristalima**. Osobine osnovnog tj. najviše zastupljenog metala se donekle menjaju usled deformacija i unutrašnjih naprezanja izazvanih uključivanjem u rešetku atoma rastvorenog elementa. Mešoviti kristali odlikuju se većom tvrdoćom i čvrstoćom od kristala osnovnog metala.
- 3- **Stvaranje nove rešetke (intermetalna jedinjenja)**, različite od rešetki sastavnih elemenata. Ovakve legure imaju svojstva zavisna od legirajućih elemenata.

U zavisnosti od smeštaja atoma rastvorenog elementa u rešetki rastvarača, imamo dva slučaja stvaranja mešovitih kristala:

- supstitucijom (zamenom),
- uključivanjem (popunom).



a) **Kod supstitucionih mešovitih kristala**, koje smatramo normalnim tipom, atomi rastvorenog elementa dolaze na mesto atoma rastvarača, tj. na rogljevima rešetke rastvarača



b) **Kod uključinskih mešovitih kristala**, atomi rastvorenog elementa uključuju se na prazna mesta metala između atoma rastvarača

Znači, da atomi rastvarača ostaju na rogljevima rešetke a atomi rastvorenog elementa zauzimaju praznine unutar rešetke. **Na ovaj način uključivanja imamo uključivanje ugljenika, nikla i drugih legirajućih elemenata u rešetku gvožđa.** Kod ovih kristala odvajanje rastvorenog elementa iz rešetke rastvarača je vrlo lako, bez ikakvih posledica po rešetku, te ih nazivamo nestabilnim mešovitim kristalima.

Uslovi za stvaranje mešoviti kristala su:

1- Razlike prečnika atoma rastvorenog elementa i atoma rastvarača ne sme da bude veća od 15%, kao ni da je razlika prečnika atoma rastvorenog elementa i dimenzija praznog prostora u rešetki rastvarača veća od 15%. U protivnom se ne može očekivati obrazovanje mešoviti kristala već izdvojenih samostalnih kristala.

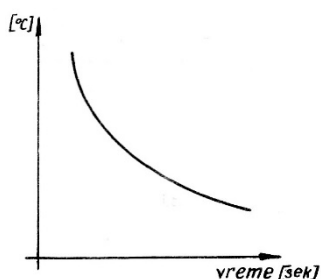
2- Mešoviti kristali mogu nastati samo do određenog sadržaja rastvorenog elementa, tj. do tolikog sadržaja koji prouzrokuje maksimalnu moguću deformaciju rešetke rastvarača.

4.3 KRISTALIZACIJA LEGURA

Metali dobijaju kristalnu strukturu pri prelazu iz tečnog u čvrsto stanje, kada se raspoređuju po određenom pravilu, obrazujući kristalnu rešetku, svojstvenu datom metalu.

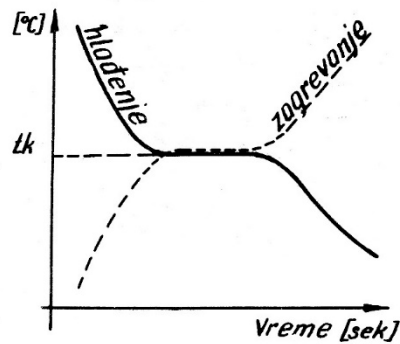
Kada bi se stvaranje kristala, pri učvršćivanju metala, provodilo slobodno, dobili bi geometrijski pravilan spoljni oblik kristala. Međutim, kao što smo ranije rekli, proces kristalizacije obavlja se istovremeno iz mnogih centara, te je pravilan rast kristala ograničen kristalima susedima, te je nemoguće obrazovati pravilan geometrijski oblik.

Na slici data je kriva hlađenja amorfni materijala.

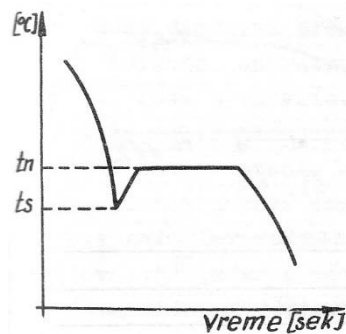


Pri smanjenju temperature rastopljenog metala, njegovi atomi su sve manje pokretljivi i pri temperaturi očvršćavanja potpuno pripremljeni za kristalizaciju, tj. za obrazovanje kristalne rešetke.

Međutim, pri hlađenju rastopljenog metala pad temperature se obavlja sa izvesnom stankom (slika ispod - prikazana dijagramom kao horizontalna deo krive), ili se naglo usporava usled oslobađanja latentne toplote kristalizacije. Ova stanika odnosno prekid pada temperature nam označava početak obrazovanja kristala a temperatura pri kojoj dolazi do obrazovanja kristala t_k naziva se **kritičnom temperaturom**.



Kritična temperatura pri hlađenju uvek je nešto niža od kritične temperature pri zagrevanju, jer se pri hlađenju prve klice očvršćavanja javljaju sa zakašnjenjem. To, međutim, traje samo kratko vreme pa kada počne očvršćavanje oslobođena latentna toplota brzo vrati temperaturu na prvu temperaturu očvršćavanja, koja ostaje bez promena sve dok traje očvršćavanje jer se latentna toplota sve to vreme oslobađa (slika ispod).



Ovu pojavu zakašnjenja pri pojavi prvih klica kristalizacije nazivamo **podhlađivanjem rastopine**, a razliku stvarne temperature t_s i normalne temperature t_n nazivamo **stepenom podhlađivanja**. Podhlađivanje je tim veće što je brzina hlađenja veća. Međutim, kod vrlo sporog hlađenja praktično nema podhlađivanja.

Pri temperaturi očvršćavanja na više mesta u rastopljenom metalu pojavljuju se centri kristalizacije. Na formiranje centara kristalizacije mogu uticati nečistoće kao i razne dodatne primese nazvane modifikatorima.

4.4 STVARANJE LEGURA

Pod **legurom** smatramo zajedno stopljene metale ($Fe+Mn$) ili metal sa nemetalom ($Fe+C$).

U zavisnosti od broja komponenata legure nazivamo: dvojne, trojne... Legure koje su sastavljene više od tri elemenata nazivamo složenim.

Legure nose obično naziv prema najviše zastupljenom elementu u leguri, na primer: bakar - nikl legure, znači da je najviše zastupljen element bakra a potom nikl.

Niz legura sastavljenih iz jednih istih elemenata, uzetih samo u raznim proporcijama, čine takozvani **metalni sistem**.

Iz odnosa pojedinih elemenata nemoguće je predvideti osobine legure koja će se dobiti, jer novodobijena legura može imati sasvim nove osobine nezavisne od osobina sastavnih elemenata.

Međutim, prema vrsti novoobrazovanih kristala možemo predvideti osobine te legure.

U slučaju obrazovanja mešanih kristala legura će imati sposobnost plastičnih deformacija, dok će u slučaju obrazovanja hemijskih jedinjenja pri legiranju: karbida, nitrida itd., legura imati povećanu tvrdoću i krtošću a pogoršano ili potpuno izgubljeno svojstvo plastičnog deformisanja.

Prema uzajamnoj rastvorljivosti u **tečnom stanju** dva metala mogu biti:

- potpuno rastvorljivi,
- ograničeno rastvorljivi i
- potpuno nerastvorljivi.

Za tehničku praksu je najkorisniji (i takođe najčešći) prvi slučaj koji omogućuje pripremu legure u tečnom stanju. Sa ograničenom rastvorljivošću se ne srećemo tako često u metalnim sistemima; sreće se naročito kod sistema koje obrazuju metali sa različitim temperaturama topljenja ili sa različitim gustinama. Što se tiče potpune nerastvoljivosti u tečnom stanju, to se većinom odnosi na parove metala sa veoma različitim temperaturama topljenja.

Ako metali u rastopljenom stanju nisu uzajamno rastvorljivi, kao na primer: olovo i gvožđe ili olovo i aluminijum, oni pri očvršćavanju stvaraju dva sloja, od kojih je: gornji sloj - sloj metala sa manjom specifičnom težinom, a donji sloj - sloj metala sa većom specifičnom težinom, nakon očvršćavanja ova dva sloja mogu se mehanički razdvojiti. Takve legure nemaju nikakve praktične primene u tehnici.

Slično kao i u tečnom stanju postoje tri slučaja rastvorljivosti i u čvrstom stanju: metali potpuno rastvorljivi u tečnom stanju rastvaraju se i u čvrstom stanju potpuno, ograničeno ili se uopšte ne rastvaraju.

Rastvorljivost odnosno nerastvorljivost dva metala u **čvrstom stanju** zavisi od njihovih osobina. Na primer, dva metala potpuno rastvorljiva u čvrstom stanju moraju imati pre svega isti tip kristalne rešetke, neznatne razlike u veličini atoma, elektrohemijskim

osobinama i valenci. Legure metala koji su potpuno nerastvorljivi u čvrstom stanju obrazuju smešu kristala dva osnovna čista metala.

Dakle, u strukturi binarnih (dvojnih) legura stoga možemo naći osnovne tipove faza:

- čvrste rastvore,
- hemijska jedinjenja, i
- mehaničke mešavine

Legure čiji elementi čine **mehaničku smešu** su legure kod kojih su kristali jednog metala ravnomerno raspoređeni između kristala drugog metala. Takve legure su u tehnici široko primenjene, kao što je olovna bronza, tj. legure olova i bakra i dr.

Hemijska jedinjenja tj. spojevi metala sa nemetalima odlikuju se postojanim sastavom i svojom karakterističnom rešetkom. Na primer gvožđe sa ugljenikom stvara hemijsko jedinjenje gvožđekarbid Fe_3C , koji se naziva **cementitom**. U njemu su uvek tri atoma gvožđa sjedinjeni sa jednim atomom ugljenika. Hemijsko jedinjenje nije moguće razdvojiti mehaničkim putem. Hemijska jedinjenja silno se razlikuju po svojim svojstvima od svojstva pojedinih elemenata. Dok su čisto gvožđe i ugljenik vrlo meki, to je cementit vrlo tvrd i krt. Mikroskopski izgled hemijskog jedinjenja je isti kao i strukture čistog metala.

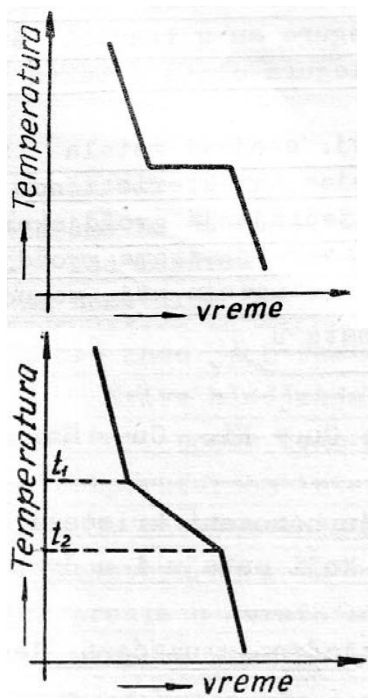
Čvrsti rastvori se dobijaju iz uzajamno rastvorljivih metala kako u rastopljenom tako i u čvrstom stanju. Kao uslov za formiranje čvrstog rastvora je da legirajući element ima istu kristalnu rešetku kao osnovni metal, a atomi elementa se rastvaraju, smeštaju u njoj. Rastvaranje može da bude dvojako. Atomi legirajućeg elemenata mogu da zauzimaju regularna mesta atoma osnovnog metala u kristalnoj rešetki ili da se smeštaju između atoma osnovnog metala u prazne međuprostore. Metali u čvrstim rastvorima pri povišenim temperaturama mogu *difundirati* i tako stvoriti hemijsku i fizičku jednorodnost cele mase legure. Pojava difuzije odražava se u tome što kod dva po koncentraciji razna dela čvrstog rastvora (tesno međusobno spojenih), atomi rastvorenog metala iz dela sa većom koncentracijom prelaze u deo sa manjom koncentracijom sve dotle, dok se koncentracija oba rastvora ne izjednači.

Metali koji stvaraju čvrste rastvore, mogu imati sposobnost potpune uzajamne rastvorljivosti. Pored istih rešetki, kao uslov potpune rastvorljivosti, porebno je imati isto međuatomsko rastojanje i strukturu atoma.

U metalnim sistemima najčešće se sreće **delimična rastvorljivost**, tj. kada se u velikoj količini čvrstog rastvora može rastvoriti samo relativno mala količina rastvorenog metala, pri čemu su atomi rastvorenog metala prinudno raspoređuju u tom poretku koji je svojstven rastvaraču menjajući pri tom parametre rešetke rastvarača.

4.5 KRIVA HLAĐENJA (OČVRŠĆAVANJA) I ZAGREVANJA LEGURA

Oblik krive hlađenja tj. očvršćavanja ili zagrevanja legura zavisi od moći rastvorljivosti jednog metala u drugom i od odnosa mešanja.



Eutektičke legure (lako topljive legure) imaju krivu očvršćavanja kao i čisti metali tj. tačka zastoja se nalazi na eutektičkoj temperaturi i predstavljena je u dijagramu hlađenja horizontalnom crtom, kao kod čistih metala. Eutektičke legure su one kod kojih je zasićenje i jednim i drugim metalom potpuno, homogene su, slične su hemijskom jedinjenju ali nisu hemijsko jedinjenje.

Kod ostalih legura je slučaj sasvim drugi. Kod njih tačka zastoja nije horizontalna, već kriva linija izvan pravca krive hlađenja.

Nakon potpunog očvršćavanja kriva strmo pada ka apscisi. Iz krive vidimo da se očvršćavanje ne vrši na jednoj određenoj temperaturi, već u određenom temperaturnom intervalu (t_1 - t_2). Ovaj temperaturni interval očvršćavanja može biti veći ili manji, što zavisi od količine pojedinih komponenata a može se videti iz dijagrama stanja dotične legure.

4.6 DIJAGRAMI STANJA DVOJNIH LEGURA

Dobijanje dijagrama stanja dvojne legure je moguće samo termičkom analizom čitavog niza legura toga tipa. Pri termičkoj analizi za svaku leguru se crta kriva hlađenja, te se na osnovu dobijenih krivih hlađenja konstruiše dijagram stanja analizirane legure.

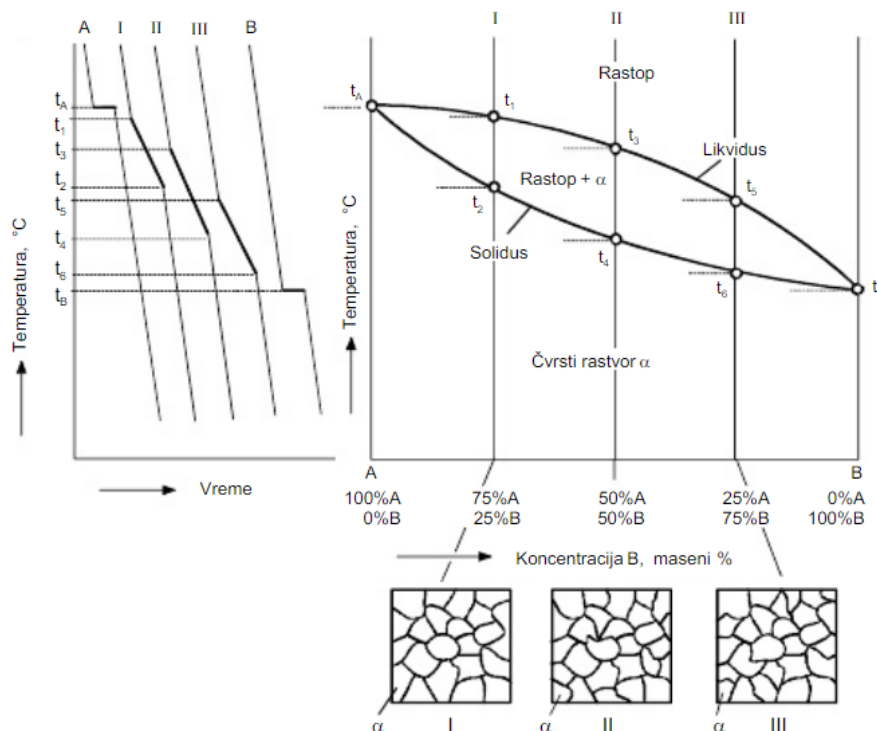
Termička analiza vrši se na taj način da se pri hlađenju legure, u određenom vremenskim intervalima, meri temperatura, koja se nanosi na ordinatu, dok se na apscisi nanosi odgovarajuće vreme u minutima. Spajanjem dobijenih tačaka u koordinatnom sistemu dobijamo krive hlađenja, odnosno očvršćavanja.

Na osnovu dobijenih krivih očvršćavanja konstruiše se dijagram stanja legure jedne vrste, kod kojih je na apscisi nanet procentualni sastav legure, a na ordinati temperaturne tačke zastoja.

Po dijagramu stanja legure poznatog sastava moguće je unapred znati osobine svih legura iste vrste. Dijagrami stanja služe još i za izbor režima termičke obrade kao i obrade legure deformacijom na toplo.

4.6.1 Ravnotežni dijagram dva metala potpuno rastvorljivih u čvrstom stanju

Ravnotežni dijagram dva metala potpuno rastvorljivih u čvrstom stanju prikazan je na slici. Konstruisan je pomoću krivih hlađenja koje su određene za oba čista metala A i B i tri legure I (75% A, 25% B), II (50% A, 50% B) i III (25% A, 75% B). Metal A se kristališe pri konstantnoj temperaturi t_A , legura I u temperaturskom intervalu t_1 - t_2 , legura II u temperaturskom intervalu t_3 - t_4 , legura III u temperaturskom intervalu t_5 - t_6 i čisti metal B opet pri konstantnoj temperaturi t_B .

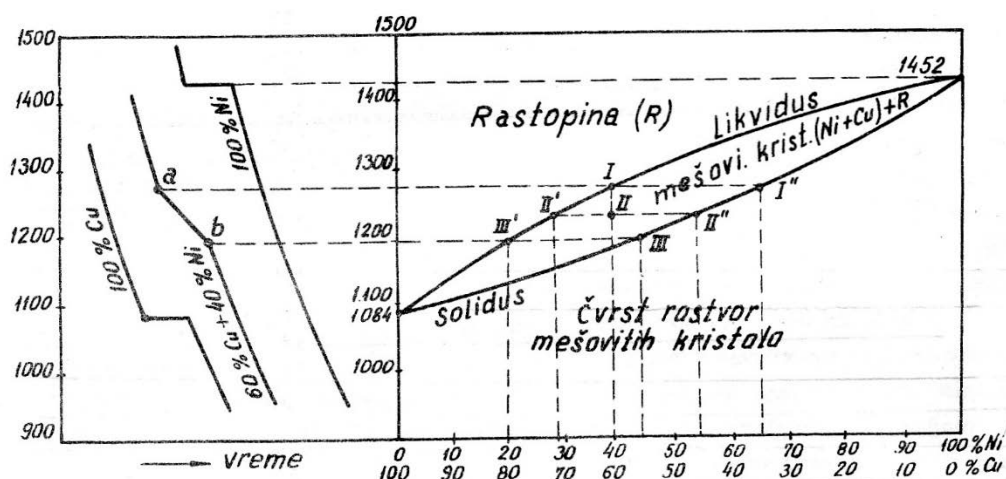


Konstrukcija ravnotežnog dijagrama sa krivih hlađenja; ravnotežni dijagram dva metala potpuno rastvorljivih u čvrstom stanju

U ravnotežnom dijagramu, koji predstavlja zavisnost temperatura-hemijski sastav, na horizontalnoj osi nanosi se koncentracija tako da krajnjim tačkama vodoravne duži odgovaraju čisti sastojci A i B (leva krajnja tačka: 100% A, 0% B, desna krajnja tačka: 0% A, 100% B). Krive hlađenja A i B imaju kao i svi čisti metali po jednu kritičnu tačku. Sve legure A i B, između krivih hlađenja čistog A i čistog B imaće po dve kritične tačke, od kojih gornje odgovaraju početku izlučivanja mešanih kristala iz rastopine a donje potpunom očvršćavanju tj. potpunom prelazu legure iz rastopljenog u čvrsto stanje.

Spajanjem tačaka koje odgovaraju početku kristalizacije, dobijamo u ravnotežnom dijagramu krivu nazvanu **likvidus**. Spojna linija tačaka koje odgovaraju kraju kristalizacije naziva se **solidus**. Oblast iznad likvidusa je u celom opsegu ravnotežnog dijagrama jedna homogena faza - **rastop**. Između likvidusa i solidusa u ravnoteži su dve faze: **rastop i čvrsta faza α** . Ispod linije solidus je u oblasti celog ravnotežnog dijagrama opet jedna homogena faza koja je **čvrst rastvor** komponenata A i B. (Čvrsti rastvori se u ravnotežnom dijagramu obično označuju slovima α , β , γ itd., za razliku od kristala čistih metala koji će se označavati slovima A, B, C).

Za primer ponašanja ovih legura pri hlađenju, posmatraćemo leguru Ni-Cu.



Uzmimo za razmatranje proces hlađenja legure sastava I, tj. 40 % Ni i 60 % Cu.

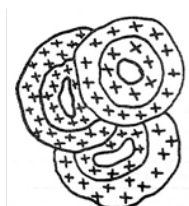
Početak izlučivanja mešanih kristala (Ni i Cu) biće na liniji likvidus u tački I. Sastav izlučenih mešanih kristala možemo odrediti povlačenjem horizontale iz tačke I do linije solidus, tj. tačke I'', čemu odgovara sastav od 68% Ni i 32% Cu.

Pri daljem hlađenju u tački II dolazi do obogaćenja čvrstog rastvora mešanim kristalima (Ni+Cu). Da odredimo sastav i količinski odnos kristala i rastopine u tački II poslužićemo se **zakonom poluge** tj. kroz tačku II povučemo horizontalnu liniju do krive likvidus II' i solidus II''. Spuštena vertikalna iz tačke II' na apscisu pokazuje nam na apscisi **sastav rastopine** a vertikalna spuštena iz tačke II'' pokazuje na apscisi **sastav kristala**. Količinski odnos kristala i rastopine dobijamo tako, što nam duž II-II' predstavlja **količinu kristala**, a duž II-II'' **količinu rastopine**.

Pri daljem hlađenju dolazimo do solidus linije, tj. tačke III gde nastaje i poslednje očvršćavanje tj. i poslednja kapljica rastopine prelazi u čvrsto stanje i imaju sastav kao i svi kristali u tački III, to jest 40 % Ni i 60 % Cu, dok je količina kristala predstavljena sa duži III-III'.

Iz ovoga sledi da će se u procesu hlađenja legure I sastav matične rastopine menjati po liniji likvidusa od tačke I do tačke III' tj. rastopina će sve više siromašiti u Ni a bogatiti se sa Cu, dok se sastav kristala menja po liniji solidusa od tačke I'' do III. Istovremeno usled sasvim sporog hlađenja, u svakom momentu kristalizacije, tj. očvršćavanja sastav kristala će se izjednačavati putem difuzije.

Ako je hlađenje brzo u kristalima se ne postiže izjednačavanje sastava, te će unutrašnji deo svakog kristala sadržavati više teško topljivog nikla nego spoljašnji deo. Ova pojava naziva se **unutarkristalnom segregacijom** (slika ispod) a znači nejednakost hemijskog sastava unutrašnjeg i spoljašnjeg dela kristala.

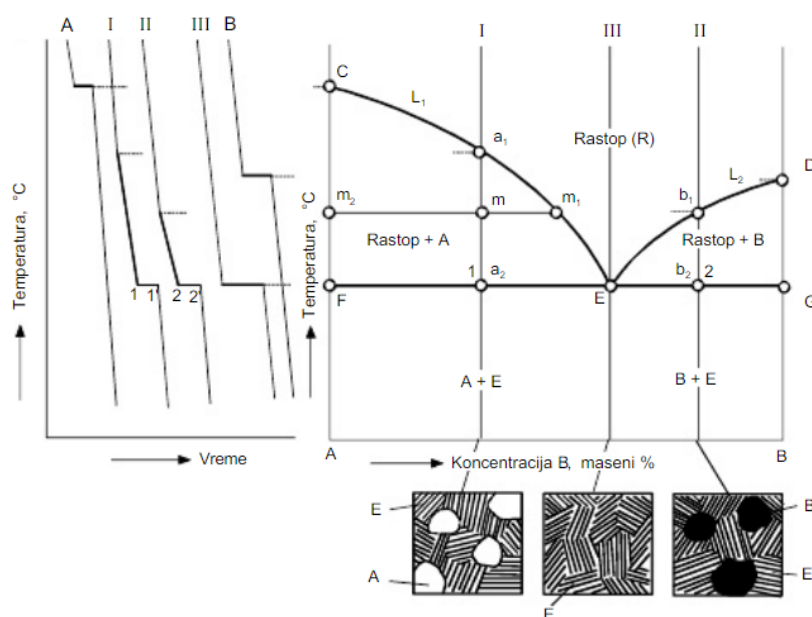


Unutrašnja segregacija može se praktično odstraniti naknadnom termičkom obradom – difuzionim žarenjem (homogenizacija). Difuziono žarenje se vrši dugotrajnim, višestepenim zagrevanjem do temperature nešto ispod solidus linije sa polaganim hlađenjem.

4.6.2 Ravnotežni dijagram dva metala potpuno nerastvorljivih u čvrstom stanju

Ravnotežni dijagram sa potpunom nerastvorljivošću dva metala u čvrstom stanju prikazan je na slici ispod. Za konstrukciju dijagrama opet su potrebne krive hlađenja dva čista metala i tri legure (I do III). Za krive hlađenja legura ovog sistema simptomatično je da se na njima uvek pojavljuju horizontalni zastoji koji označavaju kraj kristalizacije (dolazi do naglog obrazovanja velike količine kristala uz izdvajanje velike količine toplote, što je i istaknuto horizontalnim delom krive hlađenja).

Ravnotežni dijagram ima dve grane likvidusa (L_1 , L_2) koje se susreću u eutektičkoj tački E na eutektičkoj pravoj (FEG) koja je u tom sistemu i solidus linija. Kristalizacija se završava na eutektičkoj pravoj uvek pri konstantnoj temperaturi, a proizvod eutektičke promene jeste smeša finih kristala (mehanička mešavina) nazvanih **eutektikum** (naziv eutektički je izveden od reči: eu= dobar, tektikos= građen; ovde u smislu lako topljiv).



Ravnotežni dijagram dva metala nerastvorljivih u čvrstom stanju

Iznad likvidus linije, legure obrazuju jednu homogenu tečnu fazu - rastopinu. U oblasti između likvidusa i solidusa u toku kristalizacije u ravnoteži su rastop i već obrazovani kristali. U oblasti ispod eutektičke prave sve legure su u čvrstom stanju. S obzirom na to da je reč o dva metala nerastvorljiva u čvrstom stanju, u strukturi se ne može pojaviti kristal čvrstog rastvora, koji je predstavnik rastvorljivosti u čvrstom stanju. Rezultat kristalizacije biće stoga uvek **smeša kristala čistih metala A i B**.

Kristalizacija legure I (**podeutektička legura**), koja leži levo od eutektičke tačke E, počinje na temperaturi koja odgovara tački a_1 , kad iz rastopa počinju da se izlučuju kristali čistog metala A; njihov sadržaj raste sa snižavanjem temperature. Preostali rastop obogaćuje se metalom B, prema krivoj a_1E . Na temperaturi koja odgovara tački m u ravnoteži su dve faze: rastop (sastava koji odgovara tački m_1) i čvrsta faza (kristal čistog metala A sastava koji odgovara tački m_2).

Kad temperatura legure I padne na eutektičku temperaturu (a_2) sastav preostalog rastopa odgovaraće tački E, te se odvija kristalizacija eutektike prema šemi:

rastop \rightarrow A + B

Tokom eutektičke kristalizacije u ravnoteži su rastop, metal A i metal B tako da su tri faze potpuno definisane. Rastop ima sastav koji odgovara tački E, a obe čvrste faze su čisti metali. Proizvod eutektičke promene je smeša sitnih kristala metala A i B. Posle završetka kristalizacije leguru I čine primarno izlučeni kristali metala A, koji su raspoređeni u eutektičkoj smeši - eutektici.

Legura II (**nadeutektička legura**), koja leži desno od eutektičke tačke E, kristališe se slično kao legura I. Kao prvi iz rastopa pojavljuju se kristali čistog metala B. Po očvršćivanju se ova legura sastoji iz primarno izlučenih kristala metala B, koji su raspoređeni u eutektici. Eutektikum kod svih legura zadržava isti sastav, jer uvek nastaje iz rastopa sastava datog tačkom E.

Legura III, tj. eutektička legura, ostaje pri hlađenju homogeni rastop sve do eutektičke temperature, kad pri konstantnoj temperaturi sav rastop očvršćava u eutektikum, tj. smešu sitnih kristala čistih metala A i B.

4.7 GVOŽĐE

Gvožđe se u prirodi ne nalazi kao čist element, već se dobija iz rude gvožđa raznim postupcima. Čisto gvožđe ne postoji, već **tehnički čisto gvožđe** u kojem se zavisno od načina dobijanja nalaze u manjoj ili većoj meri primese: C, Si, P, S, Mn, itd.

Gvožđe ima atomski broj 26, atomsku masu 55.847; u periodnom sistemu elemenata spada u metale prelazne grupe. Temperatura topljenja je 1538°C, temperatura ključanja 3070°C.

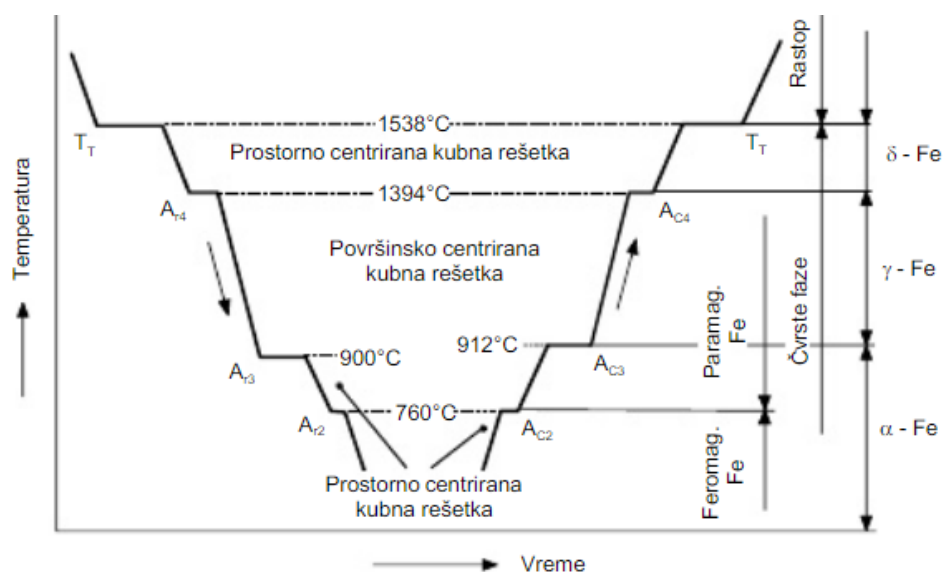
U zavisnosti od kristalne strukture gvožđa, postoje tri vrste čvrstih rastvora: α , γ i δ čvrsti rastvor. Gvožđe je polimorfni metal i egzistira u dve alotropske modifikacije α i γ .

Proces preobražaja kristala iz jedne rešetke u drugu rešetku u čvrstom stanju naziva se još **sekundarnom kristalizacijom**, za razliku od primarne kristalizacije tj. prelaza iz tečnog u čvrsto stanje pri hlađenju. Ova osobina ima veliki značaj za dobijanje sitnozrnaste strukture iz krupnozrnaste.

Na krivoj hlađenja i zagrevanja čistog gvožđa primećuju se četiri kritične temperature (slika ispod). Gornja kritična tačka odgovara prelasku gvožđa iz tečnog u čvrsto stanje i obrnuto, dok ostale tri tačke predstavljaju alotropski preobražaj gvožđa u čvrstom stanju.

Gvožđe je polimorfni metal i egzistira u dve alotropske modifikacije α i γ . **Modifikacija γ** ima površinski centriranu kubnu rešetku i kao stabilna faza se javlja (pri zagrevanju) u opsegu temperatura 912-1394°C (slika). **Modifikacija α** ima prostorno centriranu kubnu rešetku i stabilna je kako na temperaturi ispod 912°C tako i u opsegu temperatura 1394-1538°C; u niskotemperaturnoj oblasti označava se kao **α -gvožđe**, a u visokotemperaturnoj oblasti kao **δ -gvožđe**. Gvožđe α gubi na višim temperaturama svoje feromagnetne osobine i u **tački Kiri** (Curie) (760°C) postaje paramagnetično; ova paramagnetična modifikacija nekada je greškom smatrana fazom i označavana kao **β -gvožđe**. Promena feromagnetnog gvožđa u paramagnetično nije praćena promenom kristalne rešetke, već je samo uslovljena izmenama uzajamnog dejstva magnetnih momenata elektrona. U

celom temperaturskom opsegu egzistencije čvrste faze, pojavljuju se tako u gvožđu samo dva različita tipa kristalne rešetke čiji se parametri menjaju sa temperaturom.



Kriva hlađenja i zagrevanja čistog gvožđa

Najveći značaj za praksu ima rekristalizacija γ -Fe pri 900°C odnosno 912°C u α -Fe. Kao rezultat ove prekrystalizacije jeste primetno smanjenje metalnih zrna pri čemu se čvrstoća naročito žilavost povećavaju. Zato je dovoljno pregrejano ili liveno krupnozrnasto α -Fe zagrejati na 912°C radi njegovog prevođenja u γ -Fe i ponovo ohladiti. Prekrystalizacija α -Fe na temperaturi 912°C u γ -Fe vezana je sa promenom zapremine, pošto je gustoća kristalne rešetke γ -Fe veća od gustine rešetke α -Fe. Ova promena zapremine može se ustanoviti dilatometrom.

Promena pojedinih modifikacija se ostvaruje na konstantnoj (kritičnoj) temperaturi; promena $\alpha \rightarrow \gamma$ na temperaturi A_3 , promena $\gamma \rightarrow \delta$ na temperaturi A_4 . Pri promeni $\alpha \leftrightarrow \gamma$ se jasno ispoljava termički histerezis, pa je zato temperatura A_3 pri zagrevanju iznad (oznaka A_{C3}) one pri hlađenju (oznaka A_{r3}). Promena magnetnih osobina gvožđa odvija se na temperaturi 760°C (kritična temperatura A_2).

4.8 LEGURE GVOŽĐA

Legure gvožđa su i danas najvažnije i takođe najviše korišćene legure u tehničkoj praksi. Od celokupne svetske proizvodnje metala njihov je udeo oko 95%.

U svim legurama gvožđa prisutan je ugljenik koji ima značajan uticaj na osobine legura.

Radi poboljšanja mehaničkih osobina gvožđa dodaju se gvožđu razni hemijski elementi. Hemijski elementi koji se sreću u legurama gvožđa mogu biti **prateći** ili **dodatni** (legirajući). Prateći elementi su posledica procesa proizvodnje, a dodatni elementi su oni koji

se dodaju radi dobijanja odgovarajućih mehaničkih svojstava (C, Ni, Mo, V, W, Al, Ti, Cu, Mn, Cr).

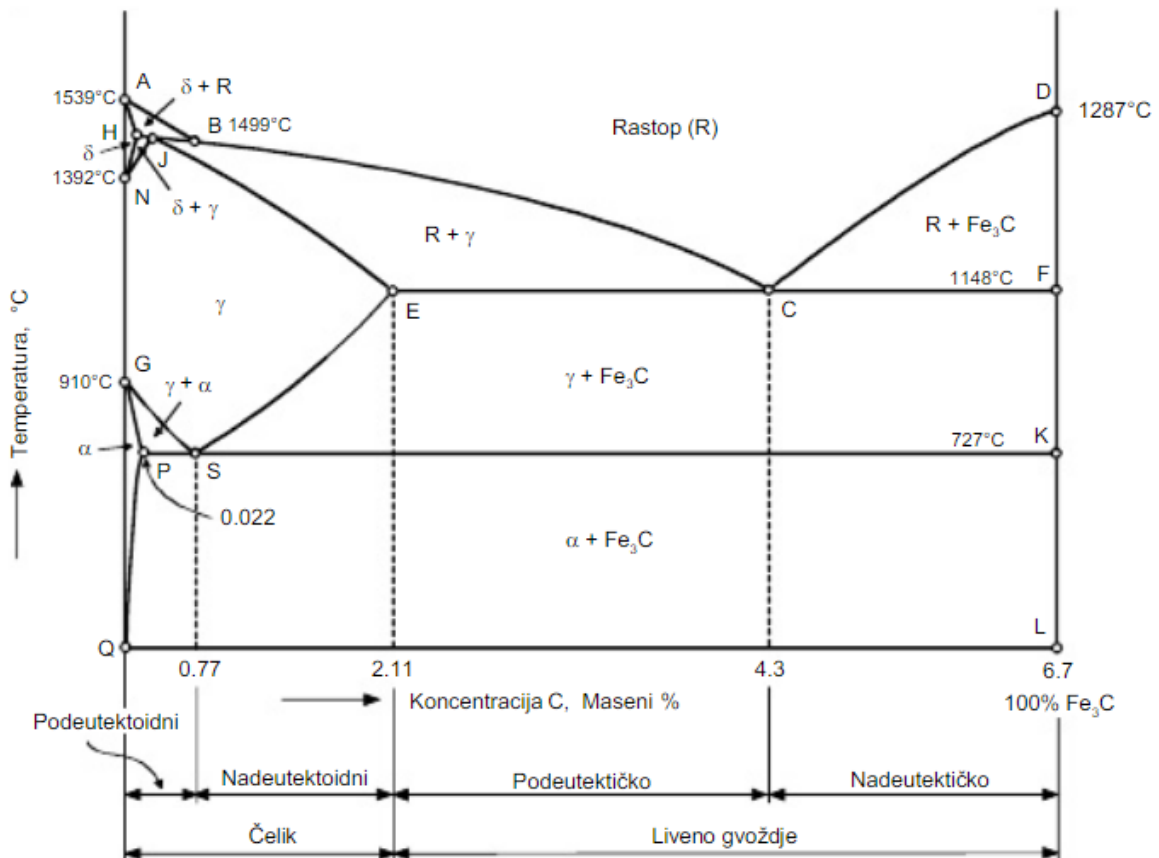
Legure gvožđa mogu se, prema sadržaju ugljenika, podeliti na:

- **čelike**, (sadržaj ugljenika obično ne prelazi 2%),
- **liveno gvožđe**, (sadržaj ugljenika iznad 2%),
- ferolegure.

Legirajući elementi u gvožđu mogu sa gvožđem stvarati:

- **hemijska jedinjenja**, kao što su Fe_3C ,
- **mešovite kristale**, ukoliko se legirajući elementi rastvaraju u rešetki gvožđa.

Sposobnost alotropske modifikacije gvožđa omogućuje stvaranje kako hemijskih jedinjenja tako i mešovitih kristala, obzirom na mogućnost uključivanja legirajućih elemenata u prazan prostor površinski centrirane kubne rešetke $\gamma\text{-Fe}$.



Karakteristične linije, tačke i faze na dijagramu stanja su konvencionalno obeležene slovnim simbolima, a označavaju:

- linija ABCD - likvidus linija, razdvaja tečnu fazu i početak očvršćavanja, sve iznad te linije nalazi se u tečnom stanju, što nazivamo rastopinom (R)
- linija HJECF - solidus linija, označava kraj očvršćavanja, tj. ispod te linije sve se nalazi u čvrstom stanju
- tačka C - eutektička tačka,
- tačka S - eutektiodna tačka.

Temperaturni interval između likvidus i solidus linije jesu intervali očvršćavanja pri hlađenju legure gvožđa i ugljenika, tj. u tim temperaturnim intervalima dolazi do izlučivanja čvrstih kristala iz rastopine sve do solidus linije.

Kakvu ćemo strukturu dobiti na liniji solidus i šta će se dešavati dalje ispod linije solidus zavisi od sadržaja ugljenika pojedinih legura.

Legure gvožđa-ugljenik možemo prema njihovim strukturama i osobinama podeliti u dve grupe:

- Legure sa sadržajem ugljenika od 0,005 do 2,11 % nazivamo **čelicima**.
- Legure sa sadržajem od 2,11 do 6,7 % C nazivamo **livena gvožđa**.

Da bi se uopšte upoznali sa svim promenama legure gvožđa sa ugljenikom proučavamo prvo:

- promene pri prelazu iz rastopine u čvrsto stanje, tj. po liniji likvidus do solidus linije, i
- promene koje nastaju hlađenjem ispod solidus linije.

Ugljenik u legurama gvožđa

Čisto gvožđe je slično kao i drugi čisti metali, veoma meko, dobro obradljivo deformisanjem na hladno i ima malu jačinu. Čak i veoma mali sadržaj ugljenika, izrazito menja osobine gvožđa. Uticaj ugljenika prekriva u legurama gvožđa delovanje drugih pratećih elemenata koji se obično pojavljuju kod ugljeničnih čelika i livova i na presudan način utiče na njihovu rezultujuću strukturu i osobine.

Ugljenik obrazuje sa gvožđem čvrste rastvore:

- čvrst rastvor ugljenika u **α gvožđu - ferit**,
- čvrst rastvor ugljenika u **γ gvožđu - austenit**
- čvrst rastvor ugljenika u **δ gvožđu - δ -ferit**

Promene koje nastaju pri prelazu iz rastopine u čvrsto stanje po likvidus liniji

Iznad likvidus linije celokupna legura se nalazi u tečnom stanju (rastopina).

Po delu likvidus linije ABC iz rastopine počinje da se izlučuju prvi kristali čvrstog rastvora ugljenika u γ -Fe koje nazivamo **austenitom** te ćemo u području ACE imati mešavinu dveju faza, tj rastopine i mešovitih kristala ($R+\gamma_{mk}$).

Po delu likvidus linije CD iz rastopine počinju da se izlučuju kristali karbida gvožđa, tj. primarni cementit (Fe_3C'), te ćemo u području CFD imati takođe mešavinu dveju faza, tj. rastopine i primarnog cementita ($R+Fe_3C'$).

U tački C pri sadržaju 4,3% C i temperaturi 1148°C dolazi do istovremenog izlučivanja austenita (γ gvožđe) i cementita Fe_3C' , koji obrazuje vrlo tanku i tvrdu mehaničku smešu, koju nazivamo **ledeburit**. Ledeburit će se nalaziti u gvožđu sa sadržajem ugljenika od 2,11% C pa sve do 6,67% C, što se odnosi na liveno gvožđe. Ledeburit (eutektikum – tačka C) predstavlja mehaničku mešavinu γ - mešanih kristala (γ_{mk}) - austenita i cementita (Fe_3C).

Tačka E odgovara gvožđu zasićenom ugljenikom (2,11%) C. Levo od tačke E imamo čisti austenit.

Promene čvrstog stanja koje nastaju hlađenjem ispod solidus linije

Linije GSE, PSK i GPQ su linije karakterističnih temperatura za pojedine legure, kod kojih dolazi do preobražaja čvrstog stanja usled hlađenja, odnosno zagrevanja.

Preobražaji čvrstog stanja proističu usled prelaza gvožđa iz jedne modifikacije u drugu a takođe su u vezi sa promenom rastvorljivosti ugljenika u gvožđu.

U području AGSE imamo čisti austenit (γ -Fe). Pri daljem hlađenju austenit se počinje raspadati i izlučuje po liniji GS *ferit* tj. čvrsti rastvor ugljenika u α -gvožđu, a po liniji SE sekundarni cementit Fe_3C ". Ovaj cementit se naziva sekundarnim jer se izlučuje iz γ čvrstog rastvora za razliku od primarnog koji se izlučuje iz rastopine.

U području GSP imamo sada smešu dve faze, ferita i raspadajućeg austenita, a u području SEE_1 smešu sekundarnog cementita i raspadajućeg austenita (γ).

U tački S pri sadržaju 0,77% C i temperaturi $727^\circ C$ sav austenit se raspada i istovremeno se kristalše tanka mehanička smeša ferita i sekundarnog cementita - eutektoid koji nazivamo *perlit*. Perlit (eutektoid – tačka S) predstavlja mehaničku mešavinu α -mešanih kristala (α_{mk}) - ferita i cementita (Fe_3C). Cementit (Fe_3C) predstavlja hemijsko jedinjenje gvožđa Fe i ugljenika C.

Čelik koji sadrži 0,77% C – nazivamo *eutektoidni*, a koji sadrži više od 0,77% C nazivamo *nadeutektoidni*, a čelik koji sadrži manje od 0,77% C nazivamo *podeutektoidni*.

Pri daljem hlađenju po liniji PSK dolazi do potpunog raspadanja svog austenita, koji je još zaostao u gvožđu i obrazovanja perlita, zato se linija PSK naziva linija perlitnog (eutektoidnog) preobražaja.

Upoređujući tačku C i S možemo zaključiti sledeće:

a - Iznad tačke C nalazi se rastopina a iznad tačke S čvrst rastvor – austenit.

b - U tački C spajaju se kraci AC i CD likvidus linije, koji nam predstavljaju početak izlučivanja kristala iz rastopine (primarna kristalizacija), u tački S spajaju se kraci GS i ES koji nam predstavljaju početak izlučivanja kristala iz čvrstog rastvora (sekundarna kristalizacija).

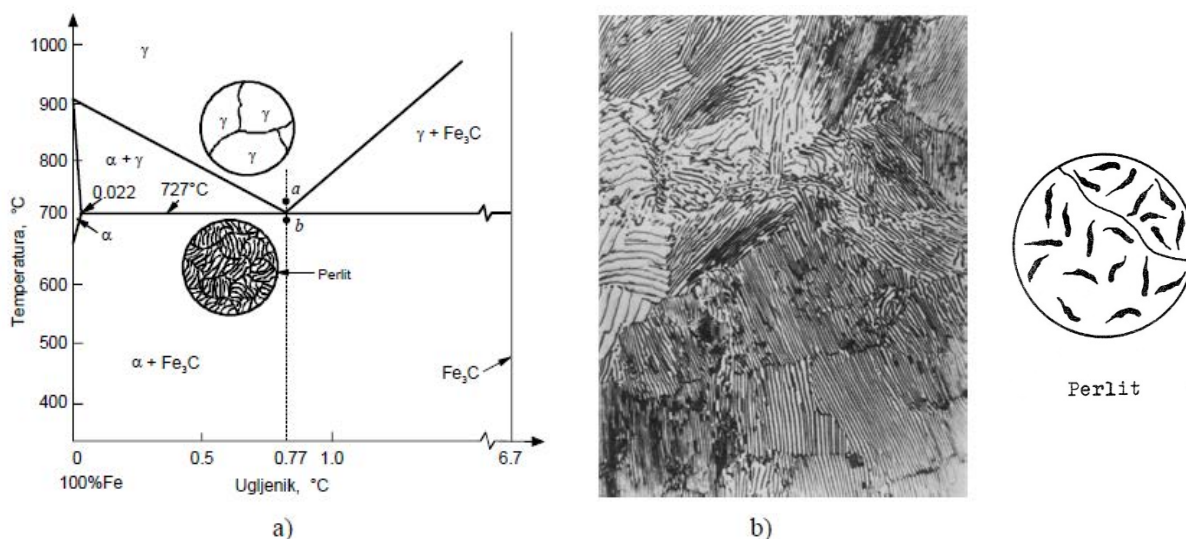
c - U tački C rastopina koja sadrži 4,3% C očvršćava (kristališe) obrazujući eutektik – ledeburit; u tački S čvrsti rastvor sa sadržajem 0,77% C rekristališe obrazujući eutektoid – perlit.

d - Na nivou tačke C leži linija EF - eutektičkog (ledeburitnog) preobražaja a na nivou tačke S - linija PK – eutektoidnog (perlitnog) preobražaja.

4.9 STRUKTURA I SVOJSTVA LAGANO HLAĐENOG ČELIKA

Da bi se bolje upoznali sa čelikom posebno ćemo proučiti proces hlađenja eutektoidnog, podeutektoidnog i nadeutektoidnog čelika.

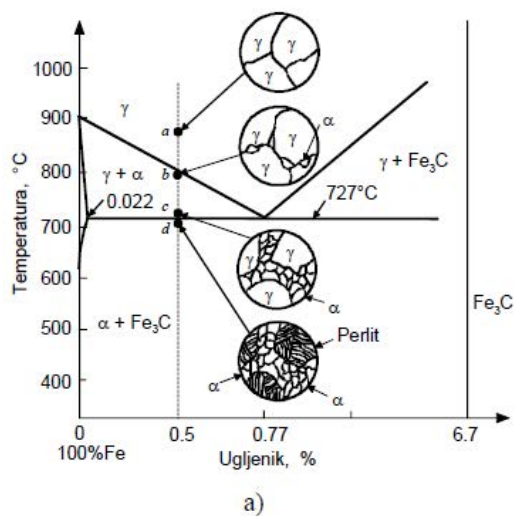
Prvo ćemo razmotriti proces hlađenja **eutektoidnog čelika** (slika ispod). Ako čelik sa sadržajem ugljenika od 0.77% zagrevamo do temperature oko 900°C i držimo dovoljno dugo, njegova struktura će biti homogeni austenit (0.77% C). Ako ovaj eutektoidni čelik hladimo normalnom brzinom do temperature blizu eutektoidne (tačka a), njegova struktura ostaje austenit. Daljim hlađenjem do eutektoidne temperature ili nešto ispod (tačka b), celokupan austenit se transformiše u ferit (0.022% C), a višak ugljenika koji je istisnut iz rešetke γ -Fe, gradi jedinjenje Fe_3C i ostaje u slojevitom rasporedu sa feritom. Ovako nastala slojevita struktura, sastavljena je od lamela ferita i Fe_3C i naziva se **perlit** (lamelarni perlit). Pošto se rastvorljivost ugljenika u α -Fe veoma malo menja od temperature 727°C do sobne, to će i struktura perlita ostati nepromenjena u tom intervalu. Mikrostruktura perlita prikazana je na slici b). Mehanička svojstva perlita nalaze se između svojstava mekog i plastičnog ferita i tvrdog, krtoq cementita.



Šematski prikaz mikrostruktura eutektoidnog čelika sa 0.77% C (a) i izgled mikrostrukture perlita koji se sastoji iz lamela ferita (bela faza) i cementita (tamna faza) (1000 \times) (b)

Podeutektoidni ugljenični čelik Ako ugljenični čelik sa 0.5% C zagrevamo do temperature od oko 900°C (tačka a, slika a) dovoljno dugo, struktura će se sastojati od homogenog austenita. U tački na liniji GOS počinje sekundarna kristalizacija tj. izdvajanje ferita i alotropski prelaz γ -gvožđa u α -gvožđe. Hlađenjem normalnom brzinom do temperature oko 775°C (tačka b), dolazi do formiranja ferita na granicama austenitnog zrna (dolazi do magnetnog preobražaja izlučenih kristala ferita, tj. paramagnetnog α -gvožđa u feromagnetno α -gvožđe, koje u stvari predstavlja – magnetni ferit). Ako ovu leguru i dalje hladimo u temperaturnom intervalu od b do c, količina ferita stalno raste, a količina transformisanog austenita iznosi oko 60%. U tom intervalu sadržaj ugljenika u preostalom austenitu raste od 0.50% do 0.77%. Na eutektoidnoj temperaturi pri uslovima sporog hlađenja preostala količina austenita sa 0.77% C transformiše se u perlit. Odmah ispod eutektoidne temperature (tačka d), struktura legure podeutektoidnog čelika sa 0.5% C je **perlit + ferit**.

Ferit u perlitu nazivamo eutektoidni ferit za razliku od proeutektoidnog ferita, koji se formira na temperaturi iznad 727°C. Na slici *b* prikazana je mikrostruktura podeutektoidnog čelika sa 0.5% C.



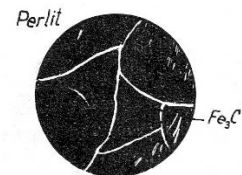
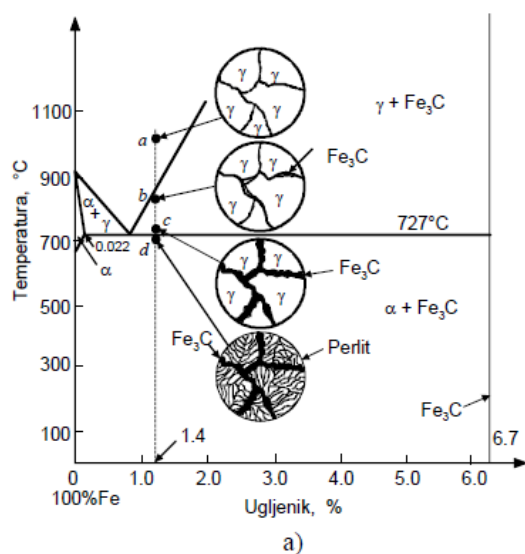
Podeutektoidni čel

a)

b)

Šematski prikaz mikrostruktura podeutektoidnog čelika sa 0.5% C (a) i izgled perlitno-feritne mikrostrukture podeutektoidnog čelika (ferit- svetla zrna, perlit- tamna zrna) (635×) (b)

Nadeutektoidni ugljenični čelik Ako leguru sa 1.4% C zagrevamo do temperature od 925°C i držimo dovoljno dugo, celokupna struktura biće homogeni austenit (tačka a, slika a). Hlađenjem normalnom brzinom od temperature koja odgovara tački b, izdvajaju se prvi kristali cementita na granicama austenitnih zrna. Ovaj cementit naziva se proeutektoidni cementit. Daljim hlađenjem u temperaturnom intervalu, od b do c, količina proeutektoidnog cementita na granicama austenitnih zrna raste, dok sadržaj ugljenika u austenitu opada od 1.4% C na 0.77% C. Na eutektoidnoj temperaturi ili nešto ispod nje (tačka d), preostali austenit se transformiše u perlit po eutektoidnoj reakciji. Cementit formiran u eutektoidnoj reakciji naziva se eutektoidni cementit, za razliku od proeutektoidnog cementita koji se formira iznad temperature 727°C.



Nadeutektoidni čel

a)

b)

Šematski prikaz mikrostruktura za nadeutektoidni čelik sa 1.4% C (a) i izgled mikrostrukture koja se sastoji od proeutektoidnog cementita (bela faza) koju okružuju zrna perlita (tamna faza) (1000×) (b)

4.10 STRUKTURA I SVOJSTVA GVOŽDA

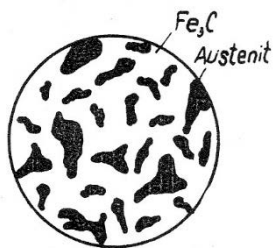
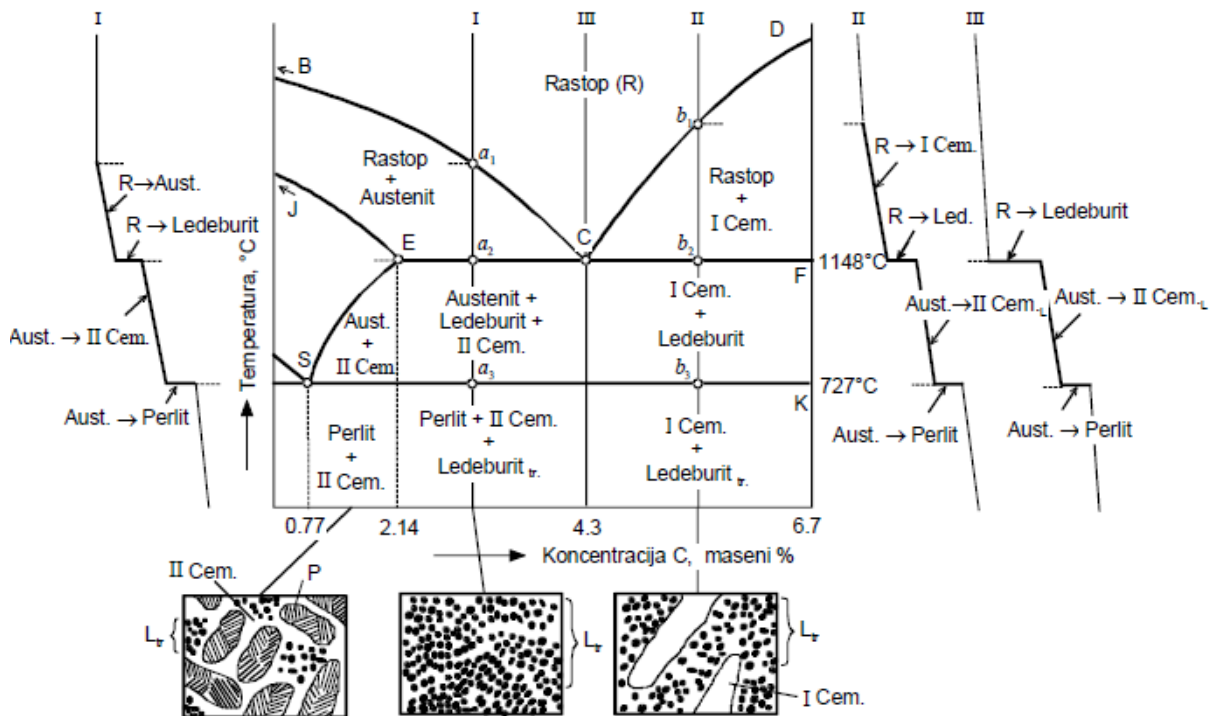
Sirovo gvožđe je složena legura koja sadrži osim osnovnih komponenata Fe i C još i Si, Mn, S; a ponekad i P ulaze u sastav gvožđa u znatnim količinama.

Za izučavanje sirovog gvožđa služimo se takođe dijagramom stanja gvožđe - ugljenik, smatrajući sirovo gvožđe kao prostu leguru sistema Fe-C, ističući samo u pojedinim slučajevima uticaj gore navedenih pratećih elemenata.

Belo sirovo gvožđe

Belo sirovo gvožđe kristališe po dijagramu stanja legure Fe-C. Ranije smo već istakli da se pri hlađenju legure sa 4,3% C u tački C dijagrama obrazuje eutektik cementita i austenita nazvan **ledeburit**. (slika). Pri daljem hlađenju od tačke C do linije PSK austenit ledeburita će se raspadati sa izdvajanjem sekundarnog cementita Fe_3C , a koncentracije ugljenika u tom austenitu će se smanjivati od 2,11% do 0,77%, po liniji ES kada dolazi do potpunog preobražaja zaostalog austenita u perlit.

rastop → austenit + cementit .



Ledeburit

Na taj način, u strukturu ohlađenog belog sirovog gvožđa sa sadržajem 4,3% C ulaziće cementit i austenit. Transformacija se događa već u čvrstom stanju (sekundarna kristalizacija) te se pri normalnoj temperaturi primećuje raspored strukturnih elemenata onakav u kakvom se oni nalaze pri očvršćavanju. Mikrostruktura **ledeburita** je sastavljena od **zrnaca raspadnutog austenita** (tamne linije) razbacanih po belom polju eutektičkog **cementita**. Ovo sirovo gvožđe sa sadržajem 4,3% C naziva se **eutektičko**.



Podeutektičko belo sirovo gvoždje



Nadeutektičko belo sirovo gvoždje

Sirovo gvožđe sa sadržajem ugljenika ispod 4,3% naziva se **podeutektičko**. Za posmatranje procesa hlađenja podeutektičkog sirovog gvožđa uzećemo leguru sa 3% C. U tački a_1 iz rastopine počinju da se izlučuju kristali austenita. Između tačaka a_1 i a_2 udeo kristala austenita će rasti, a koncentracija ugljenika u rastopini će da se povećava sve do eutektičkog sadržaja, tj. 4,3. U tački a_2 dolazi do očvršćavanja eutektičke rastopine stvaranjem ledeburita. Između tačaka a_2 i a_3 dolazi do sekundarne kristalizacije, te će se struktura podeutektičkog belog sirovog gvožđa sastojati iz **ledeburita i raspadnutog austenita** (čvrsti rasvor).

Belo sirovo gvožđe sa sadržajem ugljenika od 4,3% do 6,67% naziva se **nadeutektičko**. Za posmatranje procesa hlađenja nadeutektičkog belog sirovog gvožđa uzećemo leguru sadržaja 5% C. Pri hlađenju nadeutektičkog sirovog gvožđa u tački b_1 počinje kristalizacija primarnog cementita Fe_3C' . Između tačke b_1 i b_2 kristali primarnog cementita će da rastu a koncentracija ugljenika u rastopini da opada po liniji CD sve do eutektičkog sadržaja (4,3%). U tački b_2 dolazi do očvršćavanja zaostale rastopine sa obrazovanjem ledeburita. Pri daljem hlađenju između tačke b_2 i b_3 dolazi do sekundarne kristalizacije austenita, koji ulazi u sastav ledeburita. U sastav nadeutektičkog belog sirovog gvožđa ulaze znači **ledeburit i primarni cementit** (kristali primarnog cementita raspoređeni u obliku iglica po polju ledeburita).

Nadeutektičko belo sirovo gvožđe, kao tehničke legure upotrebljavaju se vrlo retko i jedino do sadržaja od 4,5% C, zbog njihove velike krutosti pri većem sadržaju ugljenika.

Belo sirovo gvožđe usled velikog sadržaja tvrdog i krto gvoždja, vrlo teško se mehanički obrađuje. Belo sirovo gvožđe primenjuje se obično za livene delove koji se **kasnije podvrgavaju žarenju (temper liv)** radi dobijanja kovnog gvoždja, a takođe i za livenje valjaka za valjanje i vagonskih točkova, pri čemu se kako kod valjaka tako i vagonskih točkova belo sirovo gvožđe stvara ne po celoj debljini već samo na izvesnoj dubini od površine, 12 do 30 mm, dok se unutar odlivka stvara sivo gvožđe.

Sivo sirovo gvožđe

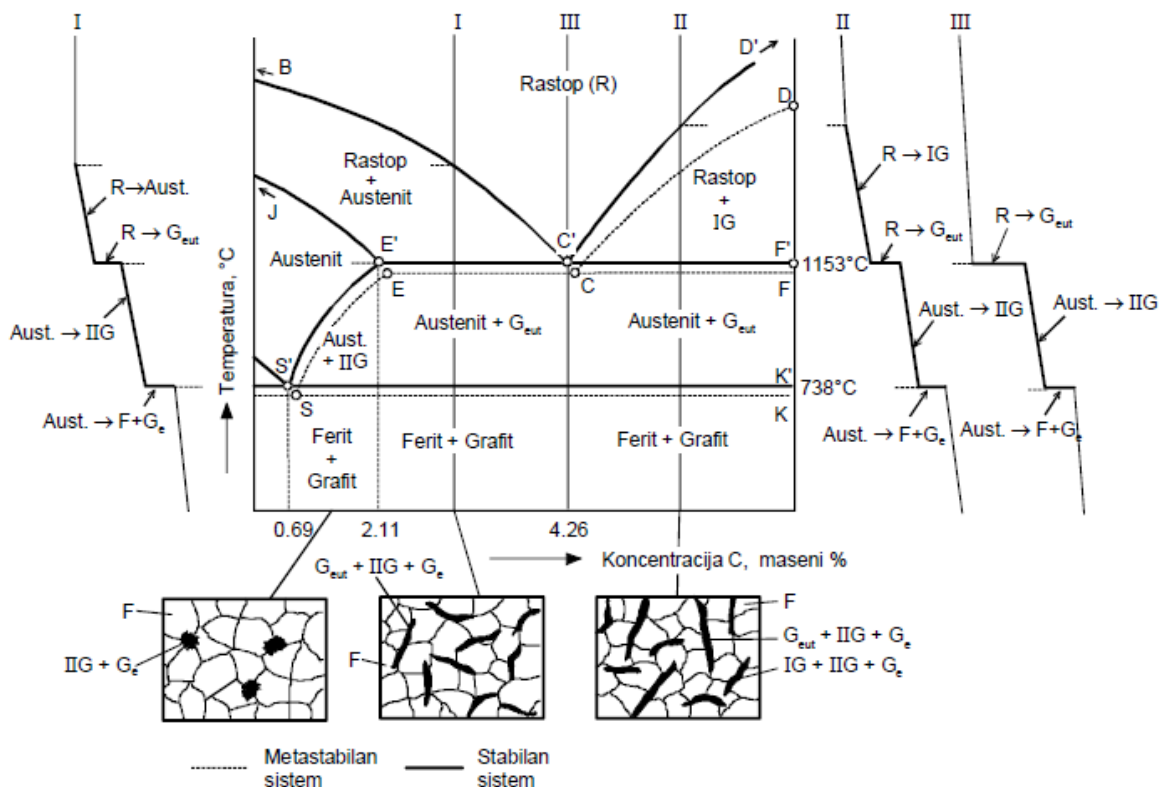
Pri nekim uslovima (vrlo polako hlađenje, prisustvo Si itd.) kod visokougljeničnih legura gvoždja, uglavnom kod sirovog gvoždja, može doći do izdvajanja ugljenika u obliku grafita. Takvo sirovo gvožđe naziva se **sivo sirovo gvožđe** ili **kovno**.

Izdvajanje grafita, do kojeg može doći pri samom hlađenju u kalupima ili naknadnim žarenjem gvoždja u čvrstom stanju, naziva se **grafitizacijom**. Grafitizacija ima veliki uticaj na sve osobine sirovog gvoždja. Tako, kako je napred već rečeno, grafitizacija belog sirovog gvoždja provodi se žarenjem istog u čvrstom stanju i dobija se sivo gvožđe odnosno kovno.

Siva livena gvožđa imaju uvek karakterističan izgled preloma tj. primetne manje ili više izdužene lamele grafita različitih veličina.

Proces izlučivanja grafita u sivom livenom gvožđu zavisi od raznih faktora, po kojima se upravljajući pri hlađenju, mogu dobiti visokokvalitetni odlivci sivog mašinskog liva kovnog i modificiranog liva tražene strukture. Obzirom na dosta nisku cenu kao i odlična livačka svojstva sivo liveno gvožđe ima vrlo široku primenu u industriji za proizvodnju fazonskih odlivaka.

Pri svakom sporom hlađenju legure gvožđe-ugljenik dolazi do izlučivanja grafita. Pri ovom procesu tj. sasvim sporog hlađenja dobićemo dijagram sličan dijagramu gvožđe-cementit, samo će nam pojedine linije karakterističnih temperatura, preobražaja, biti nešto više smeštene u levo (slika ispod).



Na ovaj način dobijamo dva dijagrama kao da su položena jedan na drugom i to:

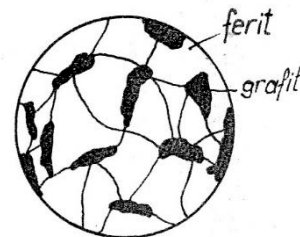
- cementitni metastabilni (relativno stabilnog ravnotežnog stanja).
- grafitni stabilni (apsolutno stabilnog ravnotežnog stanja)

Pri vrlo sporom hlađenju po liniji C'D' izlučivaće se iz rastopine primarni grafit ($Gr'=IG$). Pri daljem hlađenju po liniji E'C'F' dolazi do obrazovanja grafitnog eutektika G_{eut} , koji predstavlja tanku mehaničku smešu austenita γ_{mk} i grafita, a na liniji P'S'K' izdvaja se eutektoidna smeša, koja se sastoji iz ferita i grafita, tj. grafita koji se izdvojio iz austenita γ i koji možemo nazvati sekundarnim grafitom ($Gr''=IIG$).

U metalogradnji upotrebljava se podeutektičko sivo liveno gvožđe od 2% do 4% C.

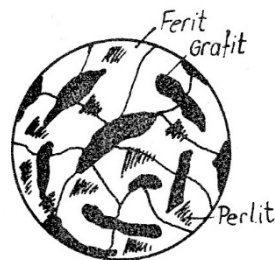
U zavisnosti od strukturnih elemenata koji čine osnovu gvožđa, delimo ih na sledeće vrste:

1 - **Feritno sivo gvožđe** u čiju strukturu ulaze ferit i grafit. Pri vrlo sporom hlađenju ugljenik se izdvaja u vidu grafita; ako bi se brzina hlađenja povećala na temperaturama primarne i sekundarne kristalizacije izdvajao bi se cementit.



Feritno sivo gvoždje

2 - **Feritno perlitno sivo gvožđe** nastaje ako se brzina hlađenja poveća oko linije P'S'K', te se obustavi izdvajanje grafitnog eutektoida a ostatak ugljenika iz austenita po liniji PSK prelazi u cementit usled čega se stvara izvesna količina perlita. Takvo gvožđe će imati podeutektoidnu osnovu tj ferit+perlit, isprepletano sa lamelama grafita.



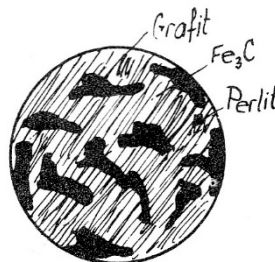
Feritno-perlitno sivo gvoždje

3 - **Perlitno sivo gvožđe** dobija se ako se brzina hlađenja poveća do linije P'S'K', jer se tada neće izdvojiti grafitni eutektoid već će austenit po liniji PSK preći u perlit. Takvo gvožđe će imati perlitnu osnovu sa uključenim lamelnim grafitom.



Perlitno sivo gvoždje

4 - **Perlitno cementitno liveno gvožđe** dobija se ubrzanjem hlađenja od linije eutektičkog (E'C'F') do linije eutektoidnog preobražaja (P'S'K'). Pri tome ce se po liniji perlitnog preobražaja (PSK) iz austenita izlučivati sekundarni cementit (Fe_3C) a ne grafit. Takvo sirovo gvožđe će imati osnovu nadeutektičkog čelika (perlit+ Fe_3C) i grafit.



Perlitno cementitno sivo gvoždje

Iz svega vidimo da sivo liveno gvožđe ima strukturu čelika sa uključenjem grafita.

Legure sa sadržajem ugljenika do 2,11%, koje očvršćavaju po stabilnom dijagramu stanja, tj. pri vrlo sporom hlađenju nazivamo **grafitiziranim čelicima**.

Sirovo gvožđe dobijeno iz visoke peći je belo sirovo gvožđe, koje se koristi za dalju preradu u čelik (oko 7/8 ukupne proizvodnje visoke peći), a sivo sirovo gvožđe koje se koristi za dalju preradu u liveno gvožđe.

4.11 ŠTETNI SASTOJCI I NJIHOV UTICAJ NA TEHNOLOŠKA I MEHANIČKA SVOJSTVA ČELIKA I GVOŽĐA

Štetni sastojci u gvožđu i čeliku su S, P i O.

Štetnost **sumpora** nije samo u njegovom količinskom sadržaju u čeliku, koji ne treba da je više od 0,03%-0,05% već i u kom vidu se nalazi i kolika je ravnomernost njegove raspodele u masi čelika. U spoju sa gvožđem sumpor gradi sulfid gvožđa FeS, koji je praktično nerastvorljiv u čvrstom gvožđu na normalnoj temperaturi. Eutektik, koji se sastoji iz gvožđa i sulfida gvožđa odgovara koncentraciji 31,5% S i ima temperaturu topljenja 985°C.

Niska temperatura topljenja ovog eutektika kao i njegova laka oksidacija pri zagrevanju dovode do obrazovanja složenog eutektika sa oksidom gvožđa FeO, koji ima temperaturu topljenja 940°C i izaziva u čeliku **crveni lom**. Za vreme kovanja, valjanja ili presovanja takvog čelika u njemu se stvaraju prskotine, pošto se sulfidna mrežica stvara po granicama metalnih zrna.

Prisustvo **mangana** Mn u takvom čeliku donekle smanjuje štetno dejstvo sumpora u vezi pojave crvenog loma ali sa druge strane dovodi do smanjenja čvrstoće metala.

Fosfor P se nalazi u čeliku u vidu čvrstog rastvora u feritu ili kao izdvojen fosfid gvožđa Fe₃P, što povećava čvrstoću i tvrdoću ali istovremeno smanjuje žilavost, naročito dinamičku žilavost.

Uticao fosfora je naročito potenciran pri pojavi **plavog loma** u čeliku. U stvari, fosfor uslovljava sklonost stvaranju prskotine i krupnozrnastog izgleda preloma. Ovakav čelik postaje naročito krt pri niskim temperaturama. Dozvoljena granica prisustva fosfora u čeliku je 0,02%-0,07%, u izuzetnim slučajevima kod čelika za izradu zavrtnjeva i navrtki može se dozvoliti sadržaj fosfora i do 0,2% radi bolje obradivosti i dobijanja čistog navoja.

Kiseonik se u legurama gvožđa može dobiti za vreme topljenja ili livenja ili putem difuzije u već očvrslom gvožđu. U rastopini metala kiseonik se nalazi u vidu rastvora FeO, Fe₃O₄, MnO ili u vidu uključina SiO₂, AlO₃, TiO₂ koje nisu uspele iz nekog razloga isplivati i preći u šljaku.

Prisustvo nemetalnih uključaka vrlo štetno deluje na kvalitet čelika, a prisustvo željeznog oksida FeO u većim količinama se primećuje u vidu okruglih sivih ili zelenkastih mrlja.