

5. ŽELEZO I NJEGOVE LEGURE

Najveću primenu od svih tehničkih legura imaju legure na bazi železa (Fe) koje se dele na čelike, gvožđa i ferolegure. Široka primena ovih legura (90% ukupne svetske proizvodnje metalnih materijala), se zasniva uglavnom na sledećim činjenicama:

- rude železa se u velikim količinama nalaze u zemljinoj kori,
- legure železa se proizvode relativno jeftinim postupcima,
- postiže se dobra kombinacija različitih svojstava.

Osnovni elementi u svim vrstama čelika i gvožđa su **železo** (osnovna komponenta) i **ugljenik** (legirajuća komponenta).

5.1. ŽELEZO

Železo je hemijski element oznake Fe. U Periodnom sistemu elemenata pripada grupi prelaznih metala. Njegov atomski broj je 26, atomska masa 56, temperatura topljenja 1539 °C, a gustina 7,8 g/cm³. Prema čistoći se razlikuje:

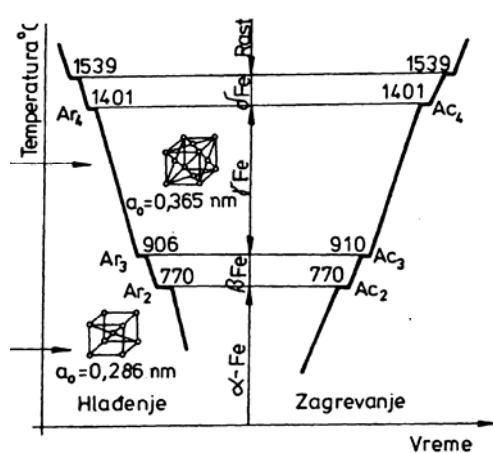
- *Hemijski čisto železo* (99,999% Fe) koje se dobija u laboratorijskim uslovima i nema praktičnu primenu.
- *Tehnički čisto železo* (99,8 – 99,9% Fe) koje pored železa sadrži i primese: C, Mn, Si, S i P.

Kao što je već istaknuto železo ima svojstvo polimorfije (alotropije) – u čvrstom stanju se javlja u dve alotropske modifikacije: prostorno (α , δ) i površinski (γ) centrirane kubne rešetke.

- α - modifikacija železa (α -Fe) je stabilna od sobne temperature do 906 °C. U ovom temperaturnom intervalu se menjaju samo fizičke osobine: feromagnetno α -Fe postaje na temperaturi ~770 °C paramagnetno označeno kao β -Fe. Pošto pri tome ne dolazi do promene vrste kristalne rešetke železa, u daljem tekstu će se za prostorno centriranu kubnu rešetku u navedenom intervalu koristiti samo oznaka α (β -Fe se ne razmatra kao posebna modifikacija).
- γ -modifikacija železa (γ -Fe) sa površinski centriranom kubnom rešetkom postojana je u temperaturnom intervalu 906 - 1401 °C.

- Od 1401 °C pa do temperature topljenja železa (1539 °C) ponovo je stabilna prostorno centrirana kubna rešetka označena kao $\delta\text{-Fe}^1\text{T}$, koja nema veliki tehnički značaj, pa stoga neće biti posebno razmatrana.

Opisani magnetni ($\alpha\text{-Fe} \rightarrow \beta\text{-Fe}$) i strukturni ($\alpha\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$ i $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \delta\text{-Fe}$) preobražaji, koji se odvijaju na konstantnoj temperaturi, su prikazani na krivama zagrevanja, odnosno hlađenja čistog železa, sl. 5.1, odgovarajućim temperaturnim zastojevima. Ovi preobražaji imaju internacionalno usvojenu oznaku – A, kojoj se u indeksu dodaje slovo *r* pri hlađenju, odnosno *c* pri zagrevanju. S obzirom na to da postoji više kritičnih tačaka, da bi se znalo o kojem preobražaju se radi, stavlja se i broj uz navedeni indeks. Na primer, preobražaj $\delta\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$ se označava sa A_{r4} , a obrnuto $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \delta\text{-Fe}$ sa A_{c4} i tako redom.



Slika 5.1. Polimorfni preobražaji železa

Razlika između temperatura zagrevanja i hlađenja za isti preobražaj (npr. preobražaj A_{r3} se odvija na 906 °C, a preobražaj A_{c3} na 912 °C) se objašnjava sklonošću železa ka pothlađenju.

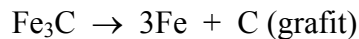
5.2. UGLJENIK

Ugljenik se nalazi u IV grupi Periodnog sistema elemenata. Redni broj mu je 6, atomska masa 12, temperatura topljenja 3500 °C, a gustina 2,58 g/cm³. Ugljenik u strukturi čelika i gvožđa može da bude:

¹ Iako $\alpha\text{-Fe}$ i $\delta\text{-Fe}$ imaju istu kristalnu rešetku, prostorno centriranu kubnu, nisu označeni istim simbolima zato što imaju različite parametre rešetke i zato što su postojani na različitim temperaturama.

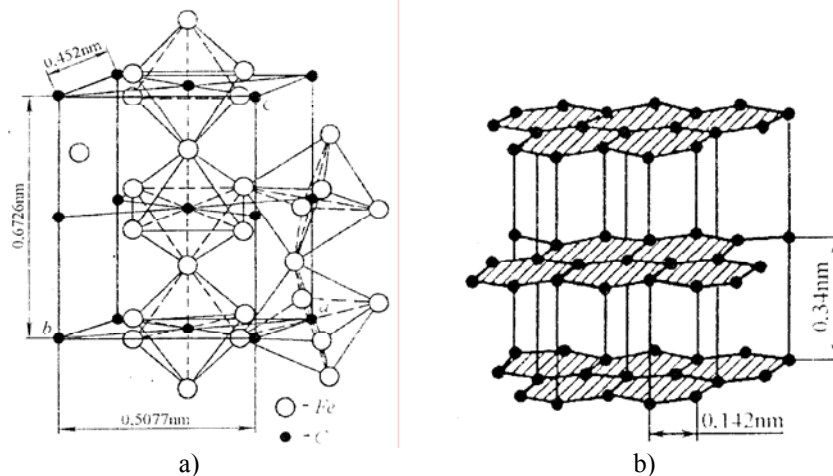
- vezan sa železom u vidu hemijskog jedinjenja – *karbida železa*, Fe_3C , koji se naziva **cementit**;
- u slobodnom obliku kao **grafit**;
- intersticijski rastvoren u α -Fe i γ -Fe obrazujući **čvrste rastvore**.

CEMENTIT ima složenu rombičnu kristalnu rešetku, sl. 5.2a, koja se obrazuje pri sadržaju ugljenika od 6,67% C (ostatak do 100% je železo). Veze između atoma železa i ugljenika su prevashodno metalnog karaktera, zbog čega se cementit odlikuje i metalnim svojstvima, kao što su električna provodljivost i metalni sjaj. Mehanička svojstva su mu posledica kristalne strukture i metalne veze, zbog čega je veoma tvrd (800 HV) i krt. Temperatura topljenja cementita nije definitivno utvrđena (smatra se da je ~ 1250 °C) zato što se on razlaže pre nego što dođe do njegovog topljenja, na osnovne komponente, železo i ugljenik, prema jednačini:



Pojedini atomi železa u rešetki cementita mogu da budu zamenjeni atomima nekih drugih metala (Mn, Cr, Mo, W), pri čemu nastaje *legirani cementit*, npr. $(FeMn)_3$ ili $(FeMnMo)_3C$, koji ima veću tvrdoću od običnog cementita (do 1000 HV).

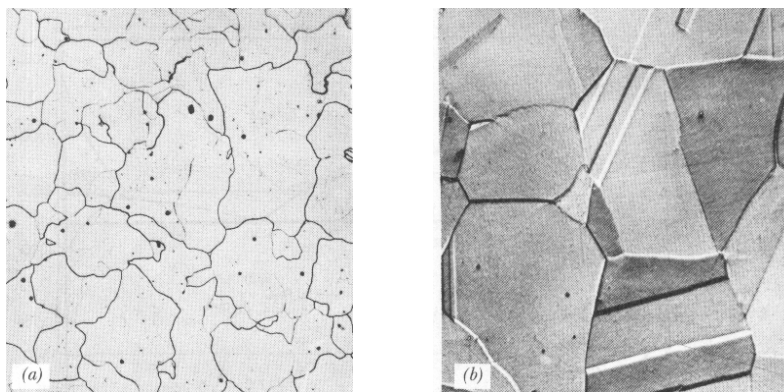
GRAFIT je jedna od alotropskih modifikacija ugljenika i ima prostu heksagonalnu rešetku, sl.5.2b, koja se odlikuje slojevitim rasporedom atoma. Zbog različitih parametara rešetke (0,142 i 0,342 nm), sl. 5.2, i slojevitog rasporeda atoma ugljenika, grafit ima malu tvrdoću i malu žilavost.



Slika 5.2. Kristalne rešetke: a) cementit; b) grafit

ČVRSTI RASTVORI. Pošto su atomi ugljenika dovoljno mali, oni mogu intersticijski da se smeste u međuprostore α -Fe i γ -Fe i na taj način obrazuju sledeće čvrste rastvore:

- **Ferit**, koji predstavlja intersticijski čvrsti rastvor ugljenika u α -Fe i obeležava se sa α . Rastvorljivost ugljenika u α -Fe zavisi od temperature: najmanja je na sobnoj temperaturi i iznosi 0,006 %C, a najveća na sobnoj na 727 °C i iznosi 0,025 %C. Na osobine ferita presudno utiče sadržaj C. Ako su u feritu, pored C, rastvoreni i atomi drugih legirajućih elemenata, onda se takav ferit naziva *legirani ferit*. Ferit je mek i plastičan (tvrdoća 80 HB, zatezna čvrstoća $R_m=250$ MPa, izduženje $A=50\%$). Dobar je provodnik toplote i električne struje. Magnetičan je do približno 770 °C. Mikrostruktura ferita je prikazana na sl. 5.3a.
- **Austenit**, koji predstavlja intersticijski čvrsti rastvor ugljenika u γ -železu, obeležava se sa γ i postojan je na temperaturama iznad 727 °C. Najmanja rastvorljivost ugljenika u površinski centriranoj kubnoj rešetki železa iznosi 0,8% na 727 °C a najveća 2,0% C na 1148 °C. Austenit je plastičan, ima veću zateznu čvrstoću i tvrdoću od ferita (170 – 200 HB, zavisno od sadržaja C). Kada se na mestu atoma železa u površinski centriranoj kubnoj rešetki austenita nalaze atomi drugih legirajućih elemenata (npr. Cr, Ni) onda se takav austenit naziva *legirani austenit*. Oblast stabilnosti legiranog austenita je različita od oblasti stabilnosti običnog austenita, pa on može da postoji i na temperaturama nižim od 727 °C. Mikrostruktura austenita je prikazana na sl. 5.3b.



Slika 5.3. Mikrostruktura: a) ferita; b) austenita. Uvećanje 500x

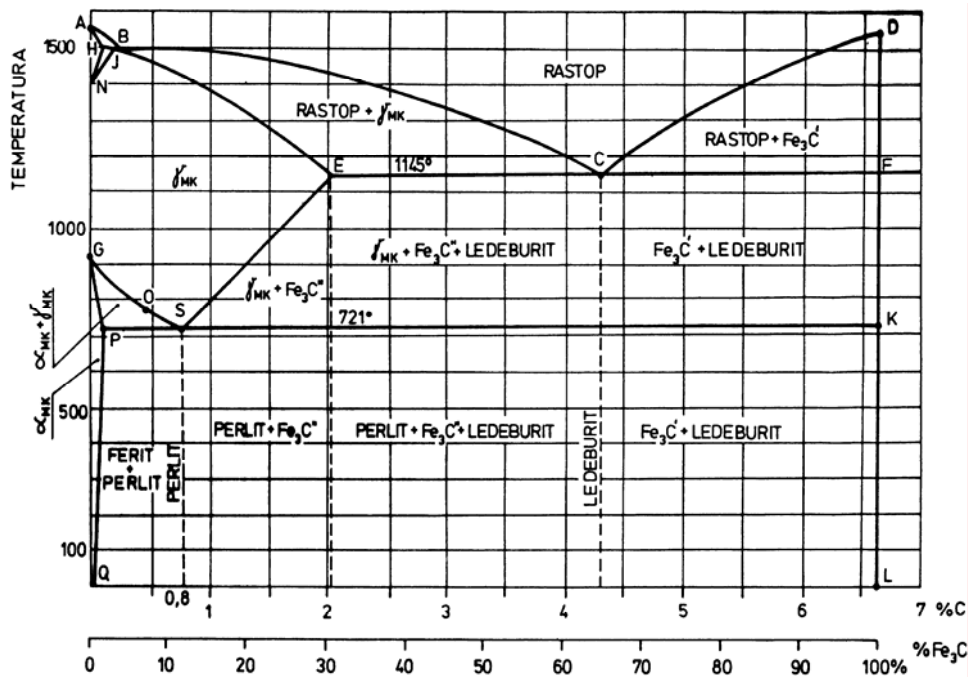
5.3. DIJAGRAM STANJA Fe-Fe₃C (metastabilni)

Pošto ugljenik može da se nađe u vezanom obliku sa železom kao cementit i u slobodnom obliku kao grafit, postoje dva dijagrama stanja:

- **metastabilni** dijagram stanja sistema železo – cementit (Fe-Fe₃C), i
- **stabilni** dijagram stanja sistema železo – grafit (Fe-C_{Gr}).

Metastabilni dijagram stanja je značajan za izučavanje čelika i livenih gvožđa kod kojih je ugljenik izdvojen u vidu cementita, dok je stabilni dijagram stanja bitan za livena gvožđa kod kojih je ugljenik izdvojen u vidu grafita.

Dijagram stanja železo – cementit prikazan je na sl. 5.4 u koordinatnom sistemu temperatura – sadržaj ugljenika do 6,67%, odnosno 100% cementita. Legure koje sadrže do 2,0% C se nazivaju čelici, a legure sa više od 2,0% C - livena gvožđa.



Slika 5.4. Metastabilni dijagram stanja Fe-Fe₃C

Slovni simboli kojima se označavaju karakteristične tačke, linije i faze u dijagramu, internacionalno su usvojeni i olakšavaju mnoga tumačenja i dogovore. Oznake karakterističnih tačaka dijagrama stanja su date u tab. 5.1. Navedeni podaci o temperaturama i sadržaju ugljenika nisu definitivno određeni, pa se u literaturi mogu naći različite vrednosti.

Tabela 5.1. Karakteristične tačke dijagrama stanja

Oznaka tačke	Temperatura, °C	Sadržaj ugljenika, %	Oznaka tačke	Temperatura, °C	Sadržaj ugljenika, %
A	1539	0	G	906	0
B	1499	0,5	P	727	0,025
E	1148	2,0	S	727	0,8
C	1148	4,3	K	727	6,67
F	1148	6,67	Q	20	0,006
D	~1250	6,67	L	20	6,67

5.3.1. Karakteristične linije na dijagramu stanja Fe-Fe₃C

Linija koja nastaje spajanjem tačaka A, B, C i D se naziva **likvidus linija** (označava se sa A₅), iznad koje su sve legure ovog sistema u tečnom stanju - rastopu, označenom R.

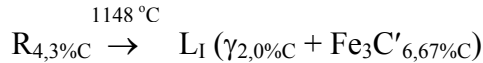
Linija koja se dobija spajanjem tačaka A, H, J, E, C i F se naziva **solidus linija** (označava se sa A₄) i predstavlja završetak procesa kristalizacije. Ispod nje sve legure ovog sistema su u čvrstom stanju.

Između likvidus i solidus linije legure se sastoje iz rastopa i čvrste faze koja se izdvaja. Količina čvrste faze se povećava sa sniženjem temperature, tj. napredovanja procesa kristalizacije. Po liniji AB se izdvaja δ-ferit, po liniji BC austenit (γ), a po liniji CD primarni cementit (Fe₃C'). Kristalizacija čvrste faze iz rastopa je označena kao **primarna kristalizacija**.

Linije SE i PQ predstavljaju **solvus linije** – linije rastvorljivosti ugljenika u austenitu (SE linija), odnosno rastvorljivosti ugljenika u feritu (PQ linija). Pošto se sa sniženjem temperature smanjuje rastvorljivost ugljenika u kristalnoj rešetki čvrstog rastvora α i γ, to se on izdvaja iz rešetke i sa atomima železa obrazuje cementit. Cementit koji se izdvaja iz austenita po SE liniji se naziva **sekundarni cementit** (Fe₃C''), da bi se razlikovao od primarnog cementita, koji nastaje iz rastopa. Cementit koji nastaje iz ferita po PQ liniji se označava kao **tercijarni cementit** (Fe₃C''').

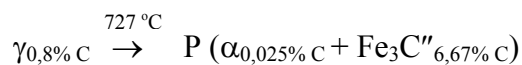
Vertikalna osa sa leve strane dijagrama stanja (100% Fe, 0% C) predstavlja liniju čistog železa i na nju su nanete tačke A, N i G koje odgovaraju temperaturama njegovih alotropskih preobražaja, sl. 5.1. Vertikalna osa sa desne strane dijagrama stanja je linija čistog cementita (6,67% C) a položaj tačke D odgovara približno njegovoj temperaturi topljenja.

Po liniji ECF se odvija **eutektička reakcija** na eutektičkoj temperaturi (1148 °C). Eutektičkom reakcijom se obrazuje mehanička smeša koja se sastoji od austenita sa 2,0% C i primarnog cementita sa 6,67% C. Eutektička smeša se naziva **ledeburit I** (sa oznakom L₁). Eutektička reakcija se prikazuje na sledeći način:



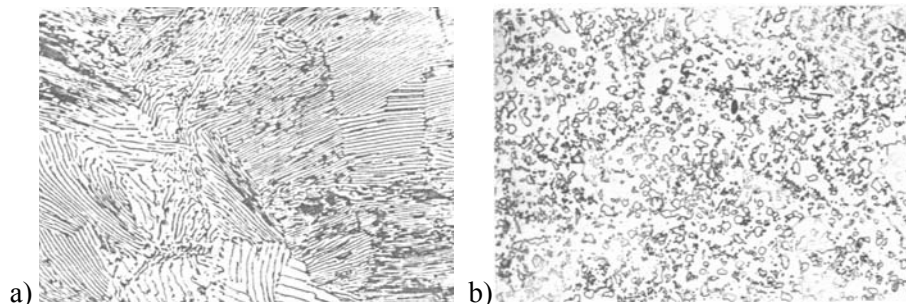
Ova reakcija se odvija kod svih legura sistema Fe-Fe₃C koji sadrže više od 2,0% C.

Linija PSK (727 °C) je **eutektoidna linija** - A₁, po kojoj se odvija **eutektoidni preobražaj** austenita sa 0,8% C u mehaničku smešu ferita sa 0,025% C i sekundarnog cementita (Fe₃C'') sa 6,67% C. Eutektoidna smeša se naziva **perlit** (oznake P), a reakcija njegovog dobijanja se prikazuje kao:



Legura sastava 0,8% C se naziva **eutektoidni čelik**, a eutektoidna reakcija predstavlja reakciju u čvrstom stanju (**sekundarna kristalizacija**). Naziv eutektoidni ukazuje na analogiju ove reakcije sa već opisanom eutektičkom reakcijom, pri čemu ulogu rastopa preuzima austenit, ulogu austenita ferit, a ulogu primarnog cementita sekundarni cementit.

Struktura perlita sastoji se iz feritne osnove i cementitne faze u vidu lamela (pločica) – **lamelarni perlit**, sl. 5.5a. Osim lamelarnog perlita, može da se formira **zrnasti perlit**, sl. 5.5b, ako se izvede odgovarajuća termička obrada. Zrnasti perlit ima veću plastičnost, a manju tvrdoću od lamelarnog perlita.



Slika 5.5. Mikrostruktura a) lamelarnog perlita; b) zrnastog perlita. Uvećanje 500×

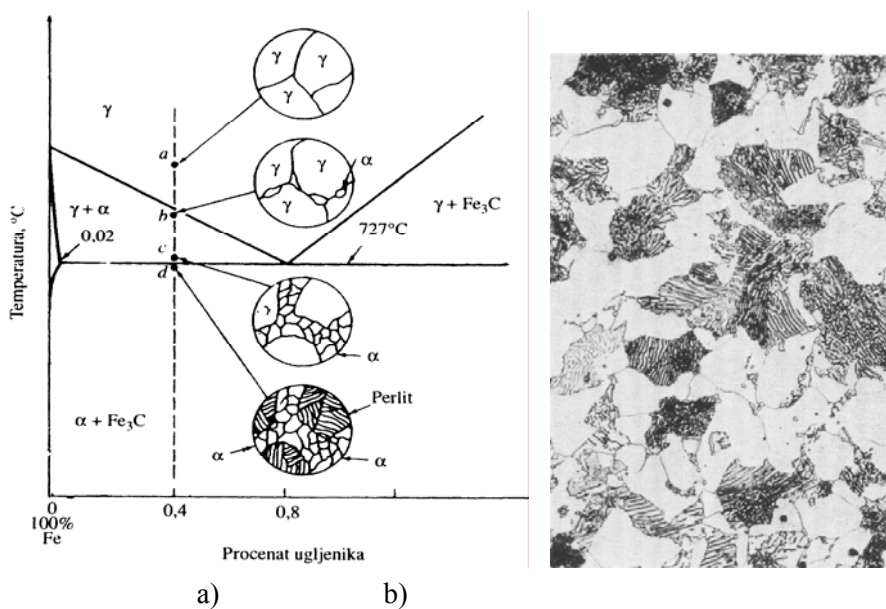
Ispod eutektoidne linije u strukturi čelika i gvožđa ne može da se nađe austenit, već perlit koji je nastao njegovim preobražajem. To znači da se, na eutektoidnoj temperaturi, austenit koji je prisutan u ledeburitu I (L_I) transformiše u perlit, a novonastali ledeburit se naziva **ledeburit II** (L_{II}).

U odnosu na eutektoidnu tačku, čelici se dele na:

- *podeutektoidne čelike sa sadržajem ugljenika od 0,025 do 0,8%, čija se struktura sastoji iz ferita i perlita;*

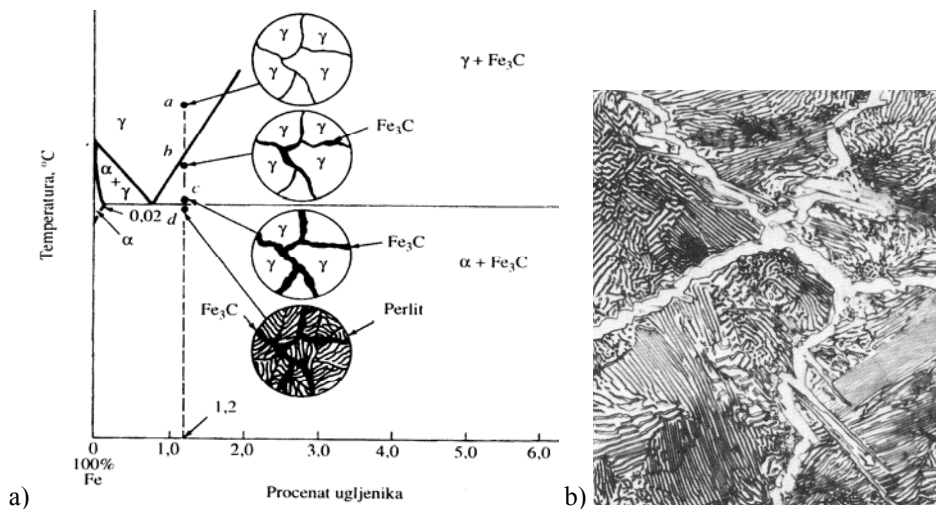
- eutektoidni čelik sa sadržajem ugljenika od 0,8%, čija se struktura sastoji od 100% perlita;
- nadeutektoidne čelike sa sadržajem ugljenika od 0,8 do 2,0%, čija se struktura sastoji od perlita i sekundarnog cementita.

Struktura podeutektoidnog čelika bilo kog sastava (npr. 0,4% C) može da se analizira ako se posmatra hlađenje austenita od tačke **a** do tačke **d**, sl. 5.6a. Hlađenjem od tačke **a** do tačke **b** formira se ferit na granicama austenitnih zrna. Daljim hlađenjem, od tačke **b** do tačke **c** količina ferita se povećava. Na eutektoidnoj temperaturi preostali austenit sa 0,8% C se transformiše u perlit, tako da je struktura podeutektoidnog čelika odmah ispod eutektoidne temperature (tačka **d**) perlitno-feritna, i ostaje stabilna do sobne temperature, sl. 5.6b.



Slika 5.6. a) Šematski prikaz obrazovanja strukture podeutektoidnog čelika; b) mikrostruktura: svetlo - ferit, tamno - perlit. Uvećanje 500x

Struktura nadeutektoidnog čelika bilo kog sastava (npr. 1,2% C) može da se analizira ako se posmatra hlađenje austenita od tačke **a** do tačke **d**, sl. 5.7a. Hlađenjem od tačke **a** do tačke **b** formira se cementit na granicama austenitnih zrna. Daljim hlađenjem od tačke **b** do **c**, količina cementita na granicama austenitnih zrna raste. Na temperaturi nešto ispod eutektoidne, tačka **d**, preostali austenit se transformiše u perlit prema eutektoidnoj reakciji. Na sl. 5.7b prikazana je mikrostruktura nadeutektoidnog čelika sa 1,2% C.

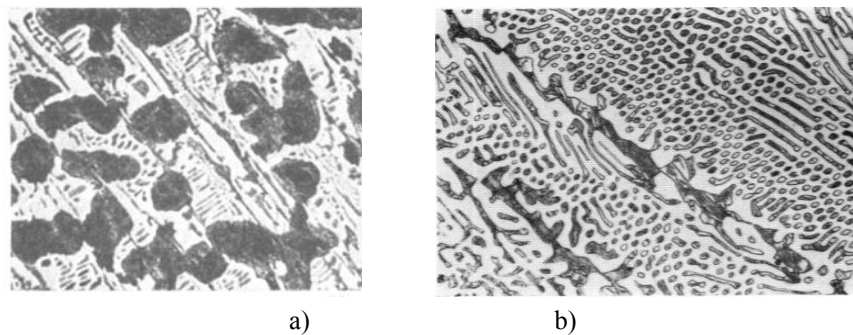


a) Šematski prikaz obrazovanja strukture nadeutektoidnog čelika; b) mikrostruktura: svetlo - cementit, tamno - lamelarni perlit. Uvećanje 1000x

U odnosu na eutektičku tačku, gvožđa se dele na:

- *podeutektička gvožđa sa sadržajem ugljenika od 2,0 do 4,3%, čija se struktura sastoji od perlita, sekundarnog cementita i ledeburita II;*
- *eutektičko gvožđe sa sadržajem ugljenika od 4,3% čija se struktura sastoji od 100% ledeburita II;*
- *nadeutektička gvožđa sa sadržajem ugljenika od 4,3 do 6,67%, čija se struktura sastoji od ledeburita II i primarnog cementita.*

Mikrostrukture podeutektičkog i nadeutektičkog gvožđa su prikazane na sl. 5.8.



Slika 5.8. Mikrostruktura gvožđa: a) podeutektičkog, b) nadeutektičkog. Uvećanje x200

Pošto se kod livenih gvožđa sa porastom sadržaja ugljenika povećava količina cementita kao krte faze, ona nisu pogodna za plastičnu deformaciju. Ova gvožđa su pogodna za livenje jer imaju relativno nisku temperaturu topljenja i malu temperaturnu razliku između likvidus i solidus linije.

5.4. DOBIJANJE GVOŽĐA ZA PRERADU U ČELIK I SIVOG LIVNIČKOG GVOŽĐA

Gvožđe za preradu u čelik i sivo livničko gvožđe najčešće se dobijaju u visokim pećima jer je postupak dobijanja u elektrodukcionim pećima znatno skuplji. Prema ranijoj podeli (prema boji preloma) gvožđe za preradu u čelik se nazivalo *belo sirovo gvožđe*, a sivo livničko gvožđe je imalo naziv *sivo sirovo gvožđe*. Osnovna razlika dva navedena gvožđa koja se na isti način dobijaju u visokoj peći u rastopljenom stanju je u hemijskom sastavu i načinu očvršćavanja koje se odvija različitim brzinama hlađenja. Sivo livničko gvožđe dobija se sporim hlađenjem, najčešće u *peščanim kalupima*, koje obezbeđuje da se ugljenik izdvoji u vidu grafita. Gvožđe za preradu u čelik se dobija bržim hlađenjem, koje se postiže livenjem u *metalnim kalupima*, pri čemu je ugljenik izdvojen u vidu *cementita*.

5.4.1. Osnovni materijali za rad visoke peći

Osnovni materijali za rad visoke peći su rude železa, gorivo i topitelji.

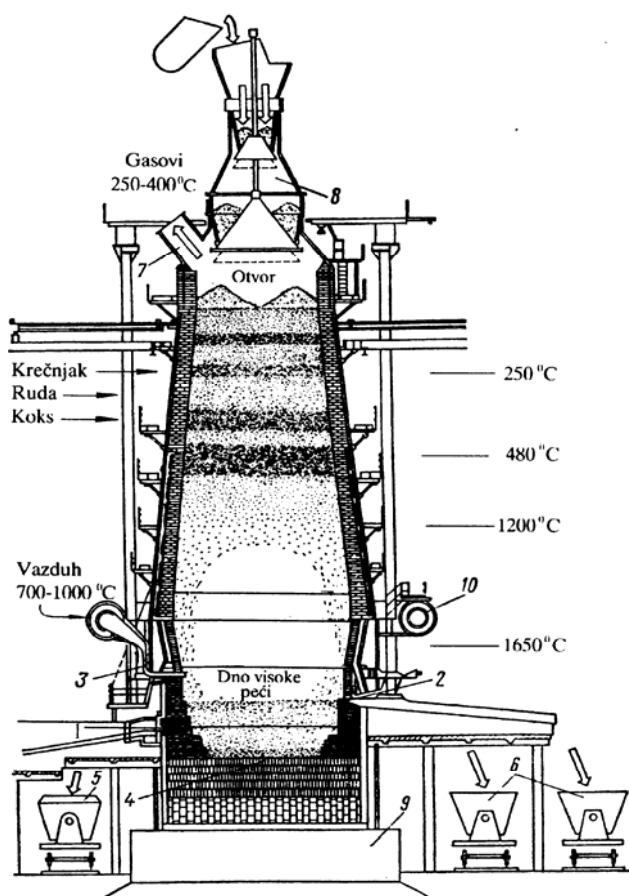
Rude železa. U prirodi se nalaze oksidne, sulfidne i karbonatne rude železa. Najčešće se koriste oksidne rude i to *hematit* (Fe_2O_3) i *magnetit* (Fe_3O_4). Sulfidne i karbonatne rude se pre ubacivanja u visoku peć prženjem prevode u oksid. Rude železa redovno sadrže i okside drugih metala: silicijum-dioksid (SiO_2), glinica (Al_2O_3), kreč (CaO), magnezijum-oksidi (MgO) koji se zovu zajedničkim imenom *jalovina*. Jalovina sadrži i jedinjenja sumpora i fosfora koja se smatraju *štetnim primesama*. Većina ruda nije pogodna za direktnu preradu, pa je zato neophodna njihova priprema, koja uglavnom obuhvata odstranjivanje jalovine, sušenje rude i drobljenje ili ukрупnjavanje (briketiranje).

Topitelji. Topitelji su čvrsti dodaci koji pri topljenju rude teško topljive sastojke iz jalovine prevode u lako topljive - **trosku**. Topitelji mogu da budu *bazni*, najčešće krečnjak (CaCO_3) ili *kiseli*, kao što je SiO_2 , koji se koristi u obliku kvarca, šljunka ili peska.

Gorivo. Gorivo ima zadatak da obezbedi potrebnu količinu toplote za odvijanje procesa u visokoj peći i neophodnu količinu ugljenika koji omogućava *redukciju rude* - oduzimanje kiseonika (*dezoksidaciju*). Ranije se kao gorivo koristio ćumur, a sada se najčešće koristi *visokopećni koks* (kameni ugalj koji sadrži najmanje 90% C). Koks je pogodniji zato što ima visoku toplotnu moć, odgovarajuću tvrdoću i potpuno sagoreva jer je porozan.

5.4.2. Procesi u visokoj peći

Visoka peć je šematski prikazana na sl. 5.9. Napravljena je od čeličnog lima, a iznutra je obložena vatrootalnim opekama. Kroz gornji otvor peći (grotlo) u određenim količinama i po određenom redosledu ubacuju se koks, ruda i topitelji (krečnjak). Peć se za vreme rada dopunjuje i radi neprekidno. U **dnu peći (pećica)** se nalaze otvori za ispuštanje rastopljenog gvožđa i troske. U donjem delu peći smeštene su *duvnice* kroz koje se uduvava pregrejani vazduh, potreban za sagorevanje koksa. Višak gasova, koji nastaju u procesu dobijanja gvožđa, napušta peć kroz gornji otvor.



legenda:

1. Otvor za ispuštanje gvožđa
2. Otvor za ispuštanje šljake
3. Duvnice
4. Vatrootalne opeke
5. Odvoz gvožđa
6. Odvoz šljake
7. Odvod gasova
8. uređaj za punjenje
9. Temelj
10. Dovod vazduha

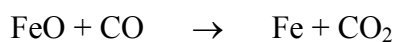
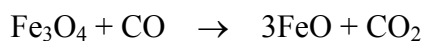
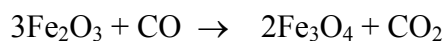
Slika 5.9. Šematski prikaz visoke peći

U oblasti temperatura od 250-480 °C sirovina se zagreva pomoću toplote viška gasova. Na temperaturi oko 480 °C počinje **redukcija** rude, koja se završava u **srednjem delu peći** (trbuh). Na temperaturama 1150-1250 °C počinje obrazovanje prvih kapi tečnog gvožđa koje se slivaju na

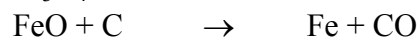
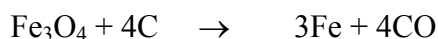
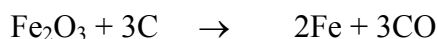
dno peći. Na 1650 °C završava se topljenje oksida jalovine, koji sa pepelom i topiteljima obrazuju tečnu trosku. Troska pliva po površini tečnog gvožđa i štiti ga od oksidacije.

Pošto je na povišenim temperaturama afinitet ugljenika i kiseonika veći nego između železa i kiseonika, to hemijski procesi u visokoj peći obuhvataju indirektnu i direktnu redukciju rude, kao i naugljeničenje tečnog gvožđa.

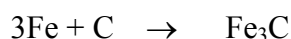
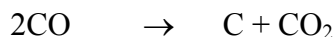
Indirektna redukcija se postupno odvija u temperaturnom intervalu 480-1200 °C pomoću ugljenmonoksida (CO)¹, prema sledećim reakcijama:



Direktna redukcija se odvija u temperaturnom intervalu 1000-1200 °C uz pomoć ugljenika (C), prema sledećim reakcijama:



Naugljeničenje se odvija pomoću ugljenika u oblasti visokih temperatura, gde je afinitet železa prema ugljeniku dovoljno visok, prema sledećim reakcijama:



Proizvodi visoke peći su: *rastopljeno gvožđe, tečna troska i visokopećni gas*. Oni nisu finalni proizvodi, već se koriste kao sirovine za dalju preradu.

Rastopljeno gvožđe u zavisnosti od hemijskog sastava i brzine očvršćavanja služi kao sirovina za preradu u čelik ili livena gvožđa. Hemijski sastav gvožđa za preradu u čelik je: 2,5-4% C, 0,9-1,4% Si, 0,5-1,5% Mn, do 0,25% P i do 0,12% S, a hemijski sastav sivog livničkog gvožđa je: 3,6-3,8% C, 1,25-3,75% Si, 0,7-1,1% Mn, 0,3-0,7% P i 0,04-0,06% S.

Troska posle očvršćavanja može da se prerađuje i koristi u građevinarstvu. Visokopećni gas koji pri izlasku iz peći ima temperaturu 250-400°C, služi za zagrevanje manjih peći u livnicama. U visokim pećima mogu da se dobiju i ferolegure, kao npr. ferosilicijum i feromangan.

¹ Ugljenmonoksid nastaje reakcijom kiseonika iz vazduha i ugljenika iz koksa u dve faze: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$; $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$.

5.5. LIVENA GVOŽĐA

Livena gvožđa su legure železa sa više od 2,0% ugljenika. Livena gvožđa imaju nisku plastičnost i relativno malu otpornost prema udaru. Koriste se zbog dobrih svojstava livenja, širokog opsega čvrstoće i tvrdoće, u većini slučajeva dobre obradivosti rezanjem, i niske cene. Ako je potrebno popraviti neka svojstva, npr. otpornost prema habanju i koroziji, livena gvožđa se dodatno legiraju. Prednosti livenih gvožđa u odnosu na čelike su bolja svojstva livenja, niža temperatura topljenja za 300-400°C i niža cena.

Struktura livenog gvožđa prvenstveno zavisi od hemijskog sastava i brzine hlađenja odlivaka.

U praksi se koriste livena gvožđa koja sadrže 2,0-4,0% C, 1-3% Si, Mn, P i S. Sadržaj Si je veoma značajan za osobine ovih legura, pa se zbog toga često klasifikuju kao trojne legure Fe-C-Si.

Livena gvožđa se dobijaju pretapanjem sivog livničkog gvožđa (uz dodatak starog gvožđa) u *kupolnim pećima*, *plamenim pećima* i *električnim pećima*.

Prema načinu sastavu i strukturi livena gvožđa se dela na:

- 1) *Sivo liveno gvožđe* (sivi liv) - ugljenik u obliku lamelarnog grafita.
- 2) *Belo liveno gvožđe* (beli-tvrđi liv) - ugljenik vezan u obliku cementita.
- 3) *Nodularno liveno gvožđe* (nodularni liv) - ugljenik u obliku kuglastog grafita (nodule).
- 4) *Temperovani liv* (temper liv) - ugljenik u obliku temper-grafita.
- 5) *Vermikularno liveno gvožđe*, kod koga je grafit izdvojen u *vermikularnom (crvastom) obliku*.
- 6) *Legirano liveno gvožđe* (legirani liv).

Hemijski sastav sivog, temper i nodularnog liva prikazan je u tab. 5.2.

Tabela 5.2. Hemijski sastav livenih gvožđa

	C	Si	Mn	S	P
sivi liv	2,5-4,0	1,0-3,0	0,25-1,1	0,025-0,25	0,05-1
temper liv	2,0-2,6	1,1-1,6	0,20-1,0	0,04-0,10	0,18 max
nodularni liv	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,0	0,03 max	0,10 max

5.5.1. Uticaj hemijskog sastava i brzine hlađenja na strukturu livova

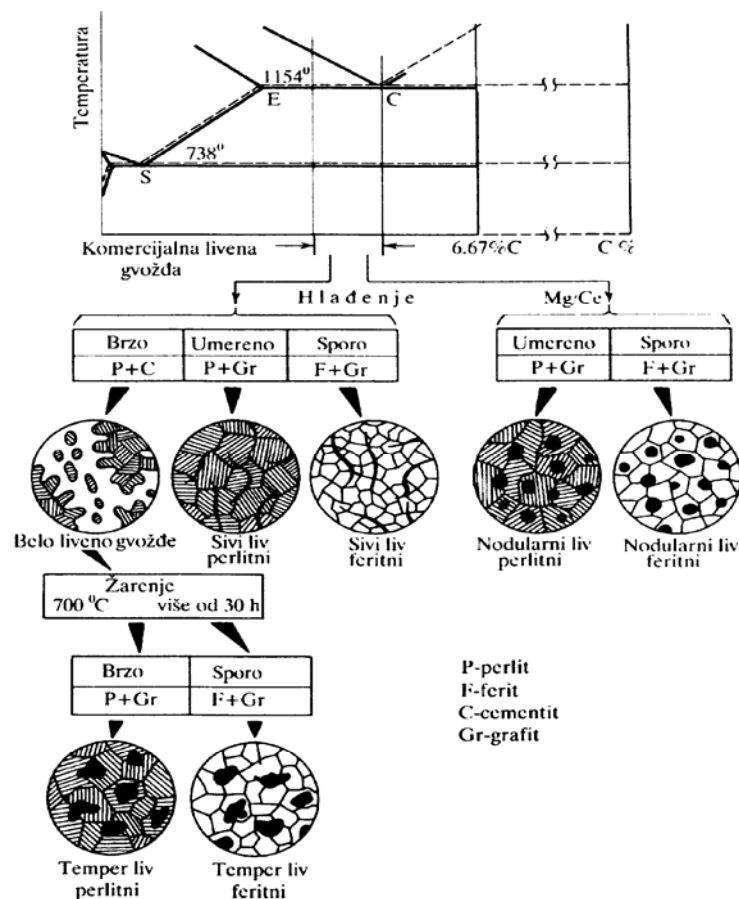
Kod navedenih livova uticaj hemijskog sastava može da se prati prema uticaju na proces izdvajanja ugljenika. Elementi se dele na one koje pomažu izdvajanje grafita (C, Si, Ni, Cu i Al), i one koji pomažu izdvajanje cementita (Mn, S, Cr i W). Povećan sadržaj C i Si, kao najuticajnijih

elemenata, deluje isto kao i povećanje preseka odlivaka da bi se dobila ista mikrostruktura. Odlivci većeg preseka hlade se sporije, što pomože izdvajanje grafita.

Sumpor se smatra štetnom primesom jer snižava tečljivost gvožđa i pospešuje stvaranje pora, a pri većem sadržaju sumpora stvara se sulfidni eutektikum po granicama metalnih zrna, koji nepovoljno utiče na mehaničke osobine. Ukoliko je prisutan mangan stvaraju se uključci MnS koji su manje štetni.

Fosfor povećava livkost, pa je posebno bitan za proizvodnju tankozidnih odlivaka. Međutim, pri većim sadržajima fosfora stvara se fosfidni eutektikum po granicama metalnih zrna, što nepovoljno utiče na osobine gvožđa. Ukoliko se fosfor javlja u obliku Fe_3P i ako se pravilno rasporedi u metalnoj osnovi povećava se otpornosti prema habanju.

Na sl. 5.10 šematski je prikazan stabilni dijagram stanja Fe-C (isprekidane linije) koji se odnosi na siva livena gvožđa.



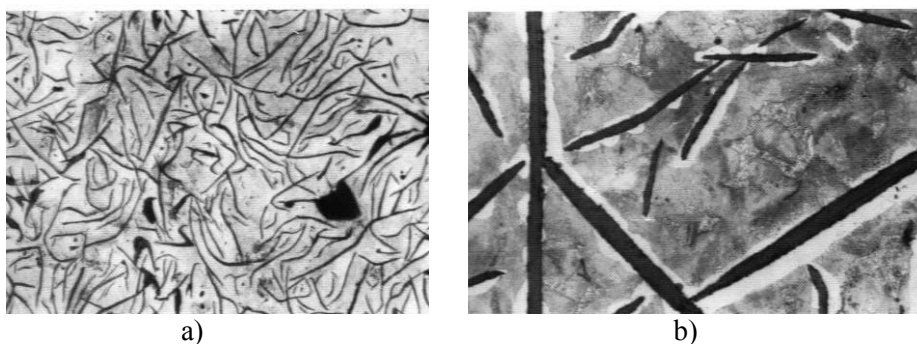
Slika 5.10. Šematski prikaz dijagrama stanja i mikrostruktura livenih gvožđa

Sa dijagrama na sl. 5.10 vidi seda su eutektička i eutektoidna temperatura u odnosu na metastabilni dijagram stanja (pune linije) pome- rene ka višim vrednostima. Na istoj slici šematski su prikazane i mikrostrukture livenih gvožđa koje se prvenstveno razlikuju po strukturi osnove i obliku grafita. Struktura osnove zavisi od brzine hlađenja i može da bude:

- perlitno-cementitna (tvrdi liv) - velika brzina hlađenja
- perlitno-grafitna (perlitni sivi liv) - srednja brzina hlađenja
- feritno-grafitna (feritni sivi liv) - mala brzina hlađenja

5.5.2. Sivi liv

Sivi liv se dobija iz sivog livničkog gvožđa sporim hlađenjem koje omogućava da se ugljenik u toku očvršćavanja izdvoji u obliku lamela grafita, sl. 5.11. Kvalitet i mehanička svojstva sivog liva zavise od struk- ture osnove, količine, veličine i raspodele lamela grafita. Metalna osnova sivog liva može da bude feritna, perlitna ili mešovita, feritno-perlitna. Što je više perlita u livu to su zatezna čvrstoća i tvrdoća veće. Lamele grafita nepovoljno utiču na svojstva sivog liva, a prvenstveno na žilavost, jer presecaju metalnu osnovu, čime se smanjuje otpornost na udarno optere- ćenje. Stoga je sadržaj ugljenika ograničen na 4%. Sa usitnjavanjem la- mela grafita zatezna čvrstoća i žilavost sivog liva se povećavaju. Silicijum značajno povećava livkost, a smanjuje žilavost.



Slika 5.11. Mikrostruktura sivog livenog gvožđa: a) feritna osnova sa lamelama grafita (tamno); b) perlitna osnova sa lamelama grafita (tamno). Uvećanje 100 ×

Sivi liv je otporan na habanje i koroziju, dobro se obrađuje rezanjem, dobro provodi toplotu i prigušuje vibracije. Odlivci od sivog liva su jeftiniji od ostalih livova.

Sivi liv se označava prema JUS C.J2.020 slovnim simbolima SL i cifarskim simbolima koju definišu vrednost zatezne čvrstoće, izražene u MPa. Na primer, oznaka SL300 znači da je reč o sivom livu zatezne čvrstoće 300 MPa.

Vrste i mehanička svojstva sivih livova su prikazana u tab. 5.3. Sivi liv SL150 se koristi za manje opterećene delove kao što su postolja mašina, kućišta menjača, kanalizacioni i sanitarni liv. Sivi livovi SL200 i SL250 se koriste za vodovodne cevi i armature, za kočione doboše motornih vozila. Sivi livovi SL300 i SL350 se koriste za cevi pod pritiskom, za delove izložene habanju i visokom pritisku, za delove kompresora, turbina i dizel motora.

Tabela 5.3. Vrste i mehanička svojstva sivog liva

Oznaka	Napon tečenja, $R_{p0,2}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća, R_m (MPa)	Izduženje %	Žilavost J
SL 150	100	150	0,6	8-13
SL 200	130	200	0,5	8-15
SL 250	170	250	0,5	13-22
SL 300	205	300	0,5	16-31
SL 350	235	350	0,5	24-47

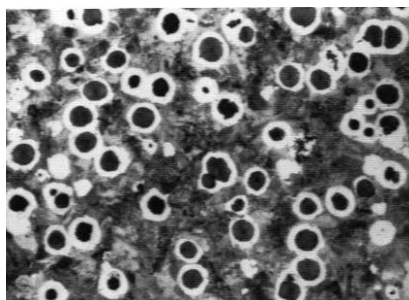
Modificiranjem sivog liva, odnosno dodavanjem 0,3-0,8% ferosilicijuma u rastopljeni liv neposredno pred izlivanje, dobija se *modificirani sivi liv*. Modificiranjem se lamele grafita smanjuju i prevode u povoljniji oblik. Ovaj liv u poređenju sa sivim livom ima niz prednosti kao što su veća zatezna čvrstoća, tvrdoća i žilavost.

5.5.3. Tvrdi liv

Očvršćavanje i mikrostruktura belih livova su u saglasnosti sa metastabilnim dijagramom stanja, sl. 5.4. Ako je po celom preseku odlivka ugljenik vezan u obliku cementita, liv se naziva *beli tvrdi liv* (BTL). Ako pri hlađenju odlivka u površinskom sloju nastane tvrda cementitna struktura, a u unutrašnjosti odlivka struktura sivog liva, dobija se *tvrdokorni tvrdi liv* (TTL). Visoka površinska tvrdoća ovog liva obezbeđuje otpornost na habanje, što ga uz dovoljno žilavo jezgro čini pogodnim za izradu delova, kao što su kugle mlinova, valjci, vagonski točkovi i delovi drobilica.

5.5.4. Nodularni liv

Nodularni liv se dobija na isti način kao modificirani sivi liv, s tim što se umesto ferosilicijuma dodaju magnezijum ili cerijum, koji omogućavaju izdvajanje grafita u obliku nodula, sl. 5.12. Nodularni liv ima znatno veću čvrstoću i žilavost od sivog liva, što je posledica izdvojenog grafita u obliku nodula i smanjenog sadržaj sumpora i fosfora, tab. 5.2. Struktura metalne osnove nodularnog liva zavisi od sastava i brzine hlađenja i ista je kao kod sivog liva.



Slika 5.12. Mikrostruktura nodularnog liva. Uvećanje 100×

Prema JUS C.J2.022 oznaka za nodularni liv je NL, uz koju se dodaje brojčana vrednost zatezne čvrstoće, izražene u MPa, i izduženja u procentima. Na primer oznaka NL700-2 znači daje reč o nodularnom livu zatezne čvrstoće 700 MPa i izduženja 2%.

Nodularni liv se dobro obrađuje rezanjem, ima sposobnost da prigušuje vibracije i otporan je na habanje. Zahvaljujući relativno visokoj zateznoj čvrstoći nodularni liv se upotrebljava se za odgovorne delove presa, mlinoва, hidroturbina, automobila. Vrste, mehanička svojstva i struktura osnove nodularnog liva su prikazani u tab. 5.4.

Tabela 5.4. Vrste, mehanička svojstva i struktura osnove nodularnog liva

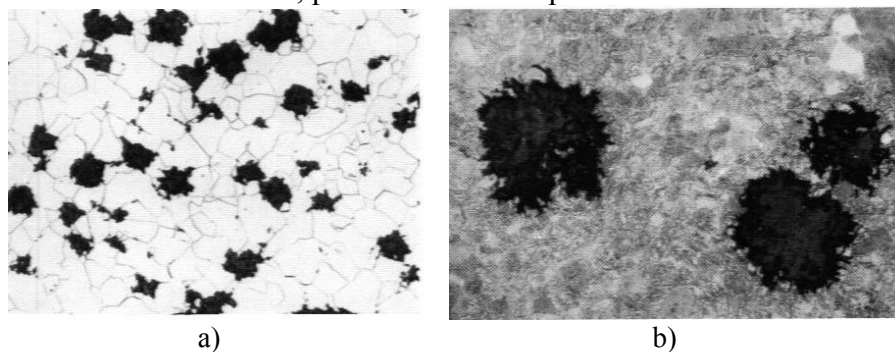
Oznaka	Napon tečenja, $R_{p0,2}$ MPa	Zatezna čvrstoća, R_m MPa	Izduženje %	Struktura osnove
NL 370-17	250	370	17	feritna
NL 400-12	280	400	12	feritna
NL 500-7	320	500	7	feritno - perlitna
NL 600-3	380	600	3	perlitno - feritna
NL 700-2	440	700	2	pretežno perlitna
NL 800-2	500	800	2	perlitna

5.5.5. Temper liv

Temper liv se dobija dugotrajnom termičkom obradom (žarenjem) belog liva na visokim temperaturama da bi se ugljenik koji je bio vezan u cementitu, izdvojio u obliku temper-grafita. Na osnovu hemijskog sastava, temperature, vremena i atmosfere u peći pri žarenju, odnosno strukture, razlikuju se dve vrste temper liva - *beli* i *crni*, sl. 5.13. Beli temper liv se dobija žarenjem u *oksidacionoj* atmosferi (najčešće u hematitu), pri čemu osim razlaganja cementita, dolazi i do razugljeničenja² odlivka. Crni temper liv se dobija žarenjem u *neutralnoj* atmosferi (kvarcni pesak),

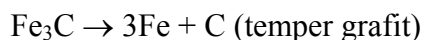
² razugljeničenje je smanjenje sadržaja ugljenika

pri čemu dolazi samo do razlaganja cementita. Struktura osnove temper liva može da bude feritna, perlitna ili feritno-perlitna.

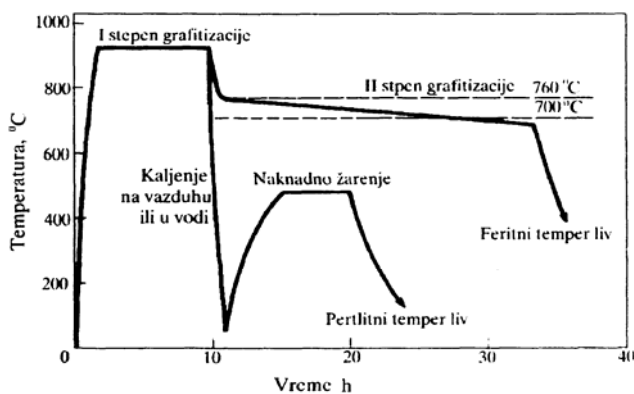


Slika 5.13. Mikrostruktura temper liva: a) beli temper liv; b) crni temper liv. Uvećanje 100×

Termička obrada temper liva sastoji se iz *grafitizacije* i *hlađenja odlivaka*. Grafitizacija je proces dobijanja grafita razlaganjem cementita:



U I fazi grafitizacije odlivci se progrevaju dugotrajno na 940-1020 °C, sl. 5.14. Za dobijanje temper liva sa feritnom osnovom posle završene I faze grafitizacije potrebno je veoma sporo hlađenje u temperaturnom intervalu 700-760 °C, da bi se sav ugljenik izdvojio u obliku grafita (II faza grafitizacije). Za dobijanje temper liva sa perlitnom osnovom posle završene I faze grafitizacije potrebno je naknadno kraće žarenje na temperaturi oko 500 °C, sl. 5.14.



Slika 5.14. Termička obrada temper liva

Prema JUS C.J2.021 oznaka temper liva se sastoji iz slovnih simbola: BTEL (beli temper liv), CTEL (crni temper liv). Uz slovnu oznaku pišu se cifarski simboli, pri čemu prve cifre predstavljaju zateznu čvrstoću iz-

raženu u MPa smanjenu 10 puta, a druge dve cifre predstavljaju izduženje u procentima³. Na primer BTEL 40-05 znači da je reč o belom temper livu zatezne čvrstoće 400 MPa i izduženja A=5%, tab. 5.4.

Temper liv ima dobru zateznu čvrstoću, žilavost, otpornost na koroziju, obradivost rezanjem i livkost. Mehanička svojstva nekih temper livova su prikazana u tab. 5.4.

Tabela 5.4. Mehanička svojstva nekih temper livova

Oznaka liva	Prečnik epruvete, mm	Napon tečenja R _{p0,2} , MPa	Zat. čvrstoća, R _m , MPa	Izduženje A, %	Tvrdoća HB
BTEL 35-04	12		350	4	220
BTEL 40-05	12	220	400	5	220
CTEL 35-10	12 ili 15	200	350	10	150

Temper liv se najviše primenjuje za izradu tankozidnih delova u automobilskoj industriji, klipnjača motora, viljuški kardana, kao i za delove poljoprivrednih i građevinskih mašina.

5.5.6. Vermikularni liv

U strukturi vermikularnog liva, pored vermikularnog grafita, nalaze se i nodule grafita (najviše do 30%). Ovaj liv se prema osobinama nalazi između sivog i nodularnog liva. Koristi se za delove koji su izloženi promenljivim mehaničkim opterećenjima, delove motora SUS, brodskih dizel motora, traktora i transportnih mašina.

5.5.7. Legirani liv

Legirani liv se dobija dodavanjem legirajućih elemenata (npr. Ni, Cr, Mo, Mg, Si, Cu, Al i Mn) ostalim livovima. Legirajući elementi doprinose usitnjavanju zrna, ravnomernijoj raspodeli, usitnjavanju i povoljnijem obliku grafita, što popravljaju mehanička svojstva. Osim toga, legirajući elementi mogu da utiču na strukturu metalne osnove, tako da se osim feritnih i perlitnih livova dobijaju i austenitni livovi, kao i kombinacije ovih struktura. Prema sadržaju legirajućih elemenata, legirani livovi se dele na:

- niskolegirane, do 3% legirajućih elemenata,
- srednjelegirane, od 3 do 10% legirajućih elemenata i
- visokolegirane, preko 10% legirajućih elemenata.

U zavisnosti od svojstava i namene, livovi se dele na:

- otporne na habanje, legirani sa Cr, Mo, Mg, Ni i Si,
- koroziono postojane, legirani uglavnom sa Si i Cr,

³ Ako je izduženje manje od 10%, prva cifra je 0.

- hemijski postojane, legirani sa Ni, Mn, Cu, Si i Cr,
- vatrootporne, legirani sa Cr, Ni, Si i Al, i
- sa posebnim fizičkim svojstvima, legirani sa Ni, Cu, Cr i Si.

Za svaki od ovih livova postoji odgovarajuće označavanje po JUS. Osnovna prednost legiranih livova su njihova dobra svojstva, dok je osnovna mana visoka cena.

PITANJA:

1. Šta je železo i u kojim se alotropskim modifikacijama javlja?
2. Koji je praktični značaj dijagrama stanja Fe-Fe₃C?
3. Šta su ferit, austenit i cementit i koje su njihove osobine?
4. Koju strukturu ima eutektoidni čelik, a koju eutektičko gvožđe?
5. Kako se obeležava po JUS sivi liv zatezne čvrstoće 250 MPa, a kako nodularni liv zatezne čvrstoće 400 MPa i izduženja 20%?
6. Šta je grafitizacija, šta se postiže legiranjem sivog liva Mn, Si, Cr i Ni?
7. Kakvu kristalnu rešetku ima grafit, a kakvu cementit i kakve su im osobine?
8. Šta čini osnovne sirovine za dobijanje gvožđa za preradu u čelik i sivog livničkog gvožđa?
9. Šta je uloga goriva, a šta topitelja pri dobijanju tečnog gvožđa?
10. Pomoću čega se odvija naugljenisanje u visokoj peći?
11. Šta je direktna, a šta indirektna redukcija i koji je njihov značaj?
12. Koji su proizvodi visoke peći i čemu služe?
13. Koja je osnovna podela livenih gvožđa?
14. U kom obliku se javlja ugljenik u sivom livenom gvožđu?
15. Koja je osnovna podela temper livova?
16. U kom obliku se javlja ugljenik u temper livu?
17. Šta je nodularni liv i kakve su njegove karakteristike?
18. Koje su prednosti, a koji nedostaci legiranih livova?
19. Kakve se osobine postižu legiranjem sivog liva?
20. Kako mangan smanjuje štetan uticaj sumpora u livenim gvoždima?