



Mašinski fakultet, Podgorica

Mašinski Materijali - I dio -

**Doc. dr Nebojša Tadić
MTF, Podgorica**

1. Nauka o materijalima i inženjerstvo materijala

Nauka o materijalima je naučna disciplina koja se bavi izučavanjem odnosa tj. korelacija između *strukture* i *osobina materijala*.

Inženjerstvo materijala je disciplina koja koriste osnovna i primenjena znanja o materijalima, kako bi se od materijala napravio gotov proizvod, a u osnovi se odnosi na projektovanje strukture materijala za postizanje unaprijed određenih osobina.

Uopšteno posmatrano pod *strukturu materijala* podrazumijeva se raspored unutrašnjih komponenti materijala. U tom smislu razlikuju se:

- struktura atoma;
- kristalna struktura materijala;
- mikroskopska struktura materijala;
- makroskopska struktura materijala.

Osobine materijala mogu biti (*Tabela 1*):

- hemijske;
- fizičke;
- mehaničke;
- tehnološke.

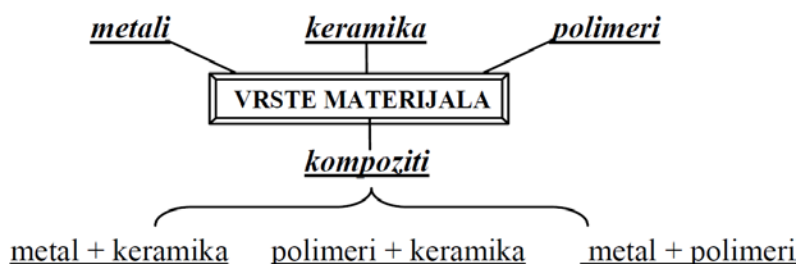
Tabela 1. Pregled osobina materijala

Hemijske	Fizičke	Mehaničke	Tehnološke
– atomska težina; – hemijski afinitet; – bazični karakter; – kiselinski karakter; – koroziona postojanost.	– gustina; – temperatura topljenja; – toplot. provodljivost; – elektr. provodljivost; – magnetna osobine; – optičke osobine.	– elastičnost; – plastičnost; – čvrstoća; – tvrdoća; – žilavost.	– obradivost (livenjem, deformacijom, rezanjem, glodanjem, bušenjem, itd); – termička obradivost; – zavarljivost; – trajnost (postojanost); – otpornost na habanje.

2. Vrste tehničkih materijala

Najčešće korišćeni tehnički materijali u mašinstvu su (*Slika 1*):

- metali;
- keramike;
- polimeri,
- kompoziti.



Slika 1. Osnovna podjela tehničkih materijala u mašinstvu

Metalni materijali su neorganske materije koje se sastoje iz jednog ili više metala, a

mogu da sadrže i neke nemetale kao što su ugljenik, azot, silicijum, itd. Imaju karakteristične osobine kao što su: metalni sjaj, dobri su provodnici električne i toplote energije, neprovidni su. Zatim, imaju veliku čvrstoću i tvrdoću ali su i deformabilni što su sve razlozi njihove široke primjene kao materijala za izradu alata, djelova mašina, konstrukcija, ... itd.

Keramike su neorganski materijali koji se sastoje od jedinjenja metala i nemetala (najčešće oksida, karbida i nitrida). Širok spektar materijala koji pripada ovoj grupi uključuje gline, cementa i stakla. Keramički materijali imaju sledeće karakteristične osobine: malu električnu i toplotnu provodljivost, otporni su na koroziju i hemijske uticaje, zadržavaju čvrstoću na visokim temperaturama, otporni su na habanje, imaju visoku tvrdoću, ali si i krta.

Polimeri su materijali sastavljeni većinom od organskih jedinjenja pretežno napravljenih od ugljenika i vodonika i drugih nemetala (npr. kiseonika, azota i silicijuma). Oni su sastavljeni od velikih molekularnih, najčešće lančanih struktura koje u osnovi imaju atome ugljenika. Polimeri uključuju poznate materijale poput plastike i gume. Neki od najpoznatijih polimera su polietilen (PE), najlon, polivinil hlorid (PVC), polikarbonat (PC), polistiren (PS) i silikonska guma. Karakteristične osobine polimera su: mala gustina, laki su, niska toplotna i električna provodljivost, niska vrijednost čvrstoće i krutosti, visoka plastičnost, visok koeficijent toplotnog širenja, otporni su na koroziju i na većinu hemijskih uticaja, imaju tendenciju omekšavanja ili razlaganja na umjerenim ili visokim temperaturama.

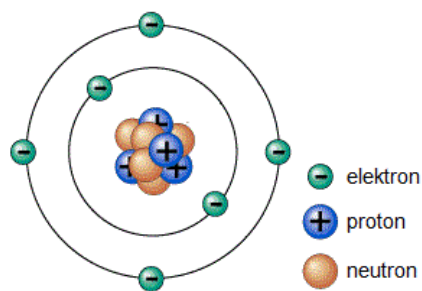
Kompoziti predstavlja familiju tehničkih materijala dobijenih kombinacijom dva ili više različitih materijala (metala, keramika i polimera) koji se ne rastvaraju jedni u drugima. Ovim se postiže da kompoziti dobiju najbolju kombinaciju osobina od komponenti od kojih su napravljeni. Prema obliku konstituenata odnosno komponenti od kojih su izrađeni razlikuju se: kompozitni materijali ojačani česticama, kompozitni materijali ojačani vlaknima i laminarni kompozitni materijali koji se sastoje od slojeva. Tipičan primjer kompozita je *fiberglas*, kod koga se staklena vlakna ugrađuju u polimerni materijal (epoksi ili poliester). Ova staklena vlakna su relativno čvrsta i kruta (ali i krta), dok su polimeri žilavi i fleksibilni (ali i male čvrstoće). Rezultujući fiberglas je relativno čvrst, krut, fleksibilan i žilav.

3. Građa materijala

3.1 Atomska građa materijala

Osobine materijala, u cjelini posmatrano, uslovljene su *građom atoma*, međuatomskim vezama i kristalnom strukturom. Tako da se pri proučavanju materijala uvijek polazi od atoma kao najsitnijih elementarnih čestica od kojih su građeni materijali.

Prema pojednostavljenom pristupu atom se sastoji od jezgra u kome je sadržana skoro čitava masa atoma. Oko jezgra po određenim orbitama (tzv. *energetskim nivoima*) kruže elektroni (*Slika 2*). Jezgro se sastoji od pozitivno naelektrisanih čestica protona i neutralnih neutrona. Kod neutralnog atoma broj protona i elektrona je jednak. Elektroni imaju zanemarivo malu masu, međutim, zbog velike brzine kretanja oko jezgra imaju veliku kinetičku energiju.



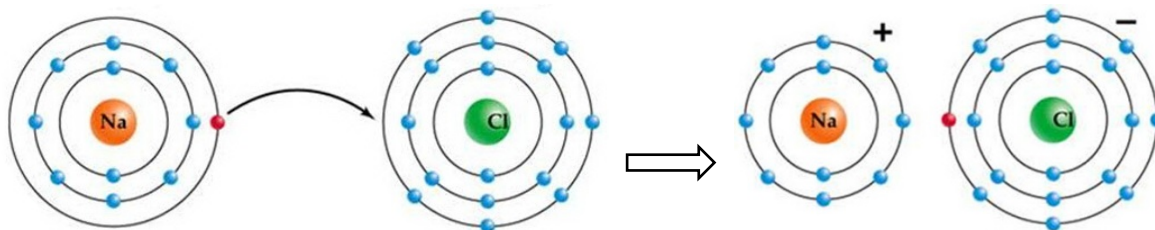
Slika 2. Šematski prikaz atoma

Atomi pojedinih elemenata razlikuju se međusobno po broju protona u jezgru (odnosno elektrona kod neutralnog atoma), pa su i tim redom uvršteni u *Periodni sistem elemenata* (*Slika 3*). Elementi su složeni po rastućem rednom broju u horizontalnim redovima (periodama) i po vertikalnim nizovima (grupama) prema rasporedu elektrona u spoljašnjim orbitama. Ukupno ima 7 perioda i 18 grupa elemenata. Elementi svrstani u grupama imaju slične fizičke i hemijske osobine, tako da se razlikuju metali, nemetali, metaloidi i plemeniti gasovi. Prva 94 elementa postoje prirodno. Elementi sa atomskim brojem iz intervala 95÷118 sintetizovani su u laboratorijama ili nuklearnim reaktorima.

3.2 Međuatomske veze u materijalima

Između atoma i molekula istih ili raznorodnih elemenata mogu da se obrazuju četiri različite vrste hemijskih veza: *jonska*, *kovalentna*, *metalna* i *Van der Valsova (međumolekularna)*. Vrsta veze direktno utiče na osobine materijala.

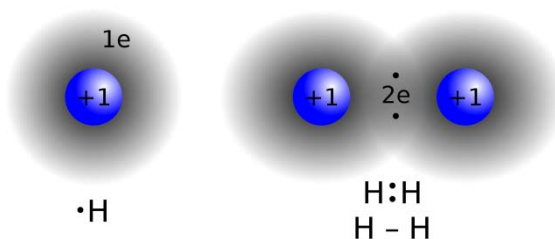
Jonska veza uspostavlja se između atoma metala koji teži da odaje elektrone i atoma nemetala koji teži da prima elektrone. Atom metala postaje pozitivno naelektrisan jon, a atom nemetala negativno naelektrisan jon (Slika 4). Kako nema slobodnih elektrona ovakvi materijali u čvrstom stanju su elektro neutralni i imaju izolaciona električna svojstva. Ova veza je karakteristična za keramičke materijale.



Slika 4. Nastanak jonske veze na primjeru natrijum-hlorida (NaCl)

Kovalentna veza nastaje najčešće između dva atoma jednog te istog elementa tako što oni odaju valentne elektrone (elektroni poslednjeg elektronskog omotača), koji postaju zajednički za oba atoma (Slika 5). To su obično molekuli vodonika, hlora, fluora, azota, fosfora, kiseonika, kao i kristali dijamanta, germanijuma, silicijuma, kalaja, sumpora, selena i dr. Pored toga, ova veza prisutna je u mnogim neorganskim i gotovo svim organskim jedinjenjima.

Kovalentna veza je zasićena veza, tako da je svaki atom sposoban da obrazuje vezu samo sa određenim brojem atoma susjeda. Ova veza je i jaka veza, tako da materijali sa kovalentnim vezama imaju malu sposobnost obrade deformacijom tj. krte su, ali su zato čvrsti i tvrdi. U čvrstom stanju ovi materijali slabo provode električnu energiju, jer su svi valentni elektroni jako vezani između susjednih atoma.



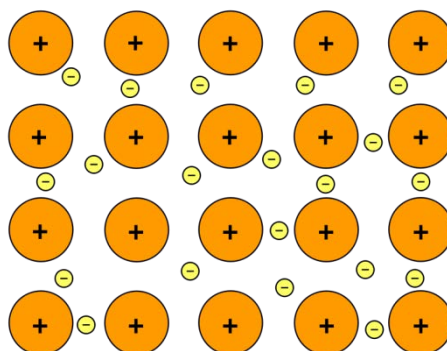
Slika 5. Šematski prikaz kovalentne veze na primjeru molekula vodonika (H_2)

Metalna veza izrazito je zatupljena kod elemenata I, II i III grupe periodnog sistema. Pošto se ovi elementi nazivaju metalima to je i ova veza nazvana metalna.

Metalna veza se ostvaruje pomoću valentnih elektrona koji su slabo vezani za pozitivne jone (matične atome), lako ih napuštaju i haotično se kreću po čitavom čvrstom tijelu u obliku tzv. *elektronskog oblaka* (Slika 6). Zbog toga se oni nazivaju slobodni elektroni. Prema tome, postojanje metala u čvrstom stanju rezultat je privlačnog dejstva između pozitivno naelektrisanih jona, sa jedne strane, i elektronskog gasa, sa druge strane.

Slobodni elektroni ne pripadaju samo jednom atomu, već svim atomima istovremeno povezujući ih kao lijepak u čvrstu cjelinu, odakle slijedi i visoka čvrstoća i tvrdoća metala. Međusobno pomjeranje atoma klizanjem ne narušava metalnu vezu jer elektroni ne razlikuju „svoje“ atome od ostalih, pa se veza stalno održava. Ovakvo vezivanje omogućava znatnu

elastičnu i plastičnu deformaciju metala. Takođe, usled postojanja slobodnih elektrona metali su dobri provodnici električne i toplotne energije.

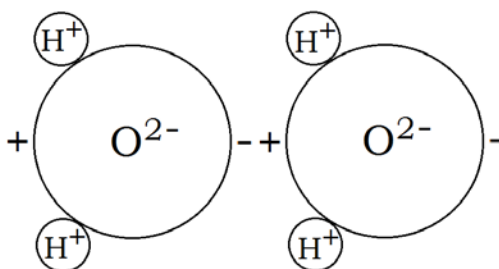


Slika 6. Šematski prikaz metalne veze na primjeru kristala cinka (Zn)

Van der Valsova (međumolekularna) veza javlja se između molekula usled nesimetrične raspodjele naelektrisanja odnosno privlačenja dipola. Naime, u pojedinim trenucima dešava se da je raspodela negativnog naelektrisanja oko atomskog jezgra takva da se centri naelektrisanja ne poklapaju. Pozitivno naelektrisan kraj jednog molekula privlači negativno naelektrisan kraj drugog molekula (Slika 7).

Međumolekularne veze obrazuju se kod lako isparljivih materija kao što su vosak, voda, led, zatim tečno i čvrsto stanje inertnih gasova, kao i kod kristala joda, sumpora, selena, telura i među lancima polimera (atomi lanaca su povezani kovalentno).

Ovo je veza je veoma slaba i razbijaju je male toplotne vibracije atoma.



Slika 7. Van der Valsove veze između dva molekula vode (H₂O)

4. Struktura materijala

Sve materije mogu se sa stanovišta njihove unutrašnje građe, podijeliti na *kristalne* i *amorfne* (nekrystalne).

4.1 Amorfna građa materijala

Osnovna karakteristika amornih materijala ogleda se u potpunoj neuređenosti rasporeda atoma tj. neuspostavljanju periodičnog rasporeda atoma u prostoru. Ovo je tipično za građu materija u tečnom stanju, mada su atomi kod tečnosti na većem međusobnom rastojanju nego kod čvrstih materijala. Ipak, postoji suštinska razlika između čvrstih amornih tijela i tečnosti. Npr. promjena rasporeda atoma kod tečnosti funkcija je malih spoljašnjih sila i kratkog vremena dejelovanja dok je kod kod čvrstih amornih tijela ono funkcija znatno većih sila i mnogo dužeg vremena.

Svi materijali koji se nalaze u amornom stanju odlikuju se sledećim opštim fizičko-

hemijskim karakteristikama:

- imaju iste osobine u različitim pravcima (izotropni su);
- pri topljenju, prvo omekšavaju, prelazeći iz čvrstog u viskozno, a tek posle toga u tečno stanje, i pri tome se viskozitet i sva druga svojstva mijenjaju kontinualno;
- topljenje i očvršćavanje su povratni procesi (ukoliko pri očvršćavanju ne dođe do kristalizacije).

Primjeri amorfnih materijala su: staklo, tanki filmovi, nanostrukturni materijali, polimeri, neke vrste keramika, gelovi, itd.

4.2 Kristalna građa materijala

Kristali su pravilna geometrijska tijela, omeđena površinama koje se sijeku u ivicama, a ivice u uglovima. Kristali imaju pravilnu unutrašnju građu. Tipični predstavnici kristalnih materijala su **metali**.

Od ukupnog broja elemenata u periodnom sistemu skoro tri četvrtine čine metali. Svi metali na normalnoj temperaturi izuzev žive (Hg) su kristali tj. nalaze se u čvrstom stanju.

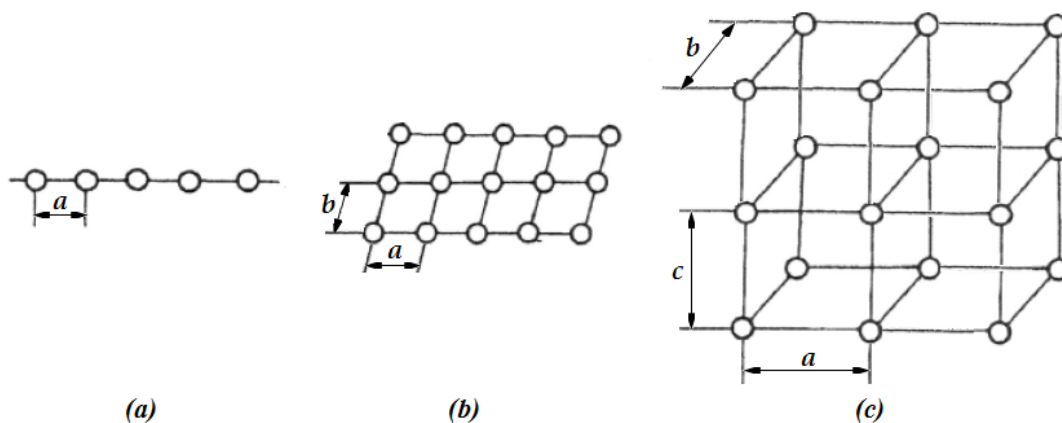
Kod čvrstih metalnih tijela atomi se u prostoru pakuju (slažu) na veoma malim rastojanjima, približno jednakim prečniku atoma. Atomi metala pakovani su ne samo na malim rastojanjima, nego se taj raspored u prostoru, za razliku od gasovitog i tečnog stanja, odlikuje i određenom pravilnošću i zakonomjernošću.

Kao prvu aproksimaciju, atome posmatramo kao loptice koje se međusobno pakuju. Pravilnim rasporedom takvih loptica na određenim konstantnim rastojanjima u jednom pravcu u prostoru, dobija se tzv. *tačkasti niz* (Slika 8a). Osnovni parametar toga niza je rastojanje između centara susjednih atoma koji se obilježava sa „a“.

Međusobnim kombinovanjem dva ili više tačkastih nizova dobija se tzv. *kristalografška ravan* (Slika 8b). Konstantno rastojanje između centara atoma u jednom pravcu označava se sa „a“, a u drugom pravcu sa „b“.

Međusobnim kombinovanjem dvaju ili više kristalografških ravni dobija se tzv. *kristalna ili prostorna (trodimenzionalna) rešetka* (Slika 8c). *Kristalna rešetka je geometrijska predstava pravilnog i zakonomjernog rasporeda atoma u prostoru, uz konstantna rastojanja između centara susjednih atoma u određenim pravcima*. Iz definicije kristalne rešetke slijedi da su paralelni pravci u rešetke identični, da su sve paralelne ravni identične, odnosno da je okolina bilo koje tačke u kristalu identična. Prostorna rešetka je bitna karakteristika metala i legura.

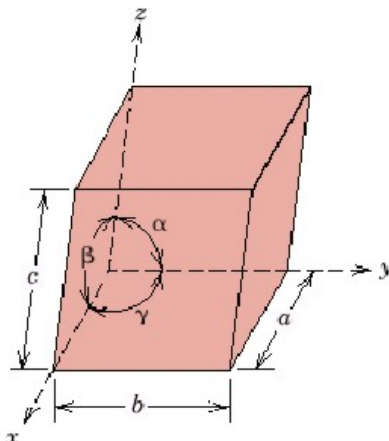
Atomi se smještaju u čvorovima rešetke, a rastojanja između centara susjednih atoma raspoređenih u prostoru nazivaju se konstante ili parametri rešetke (a , b , c). Njihove apsolutne vrijednosti kao i prečnici atoma su reda veličine $10^{-10} m$.



Slika 8. Pravilan raspored atoma: a) tačkasti niz, b) kristalna ravan i c) kristalna rešetka

4.2.1 Kristalni sistemi

Određivanje položaja kristala u prostoru vrši se pomoću kristalografskih osa, koje predstavljaju zamišljene pravce koji prolaze kroz idealan centar kristala i međusobno zaklapaju određene uglove, koji se nazivaju osnim uglovima. Osnim ugao između osa x i y obilježava se sa γ , ugao između osa y i z sa α i ugao između osa z i x sa β (Slika 9).



Slika 9. Kristalografske ose, osni uglovi i parametri rešetke

Uzimajući u obzir raspored osa u prostoru, tj. veličinu osnih uglova, kao i rastojanja između atoma u kristalnoj rešetki, svi kristali se svrstavaju u sedam kristalografskih sistema (Tabela 2). Najveći broj metala pripada kubnom, heksagonalnom i romboedarskom sistemu. Sasvim, mali broj metala se javlja u tetragonalnom i ortorombičnom sistemu, dok u trikliničnom i monokliničnom sistemu metali ne kristališu.

Tabela 2. Kristalni sistemi, njihove karakteristike i primjeri

Kristalni sistemi	Parametri rešetke	Osnim uglovi	Primjeri
Kubni	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Fe, Al, Cu, Au, Ag, Ni, Pb
Tetragonalni	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Sn_β , TiO_2 , SnO_2 , PbWO_4
Ortorombični	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Fe_3C , Ga, S
Romboedarski	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	As, Sb, Bi
Heksagonalni	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Zn, Cd, Mg, Ti, Be, Sc, Se
Monoklinični	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Triklinični	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	K_2CrO_7 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

4.2.2 Elementarna ćelija

Pošto kristalnu rešetku čini beskonačno mnogo atoma pravilno i zakonomjerno raspoređenih u prostoru, geometrijsko predstavljanje takve rešetke bi bilo neracionalno ili skoro nemoguće. Iz tog razloga je uveden pojam *elementarne (jedinične, osnovne) ćelije*. Elementarna ćelija nastaje kada se iz kristalne rešetke izdvoji najmanji dio koji sadrži sva karakteristična obilježja date rešetke, kao što su elementi simetrije, raspored atoma i sl. (Slika 10).

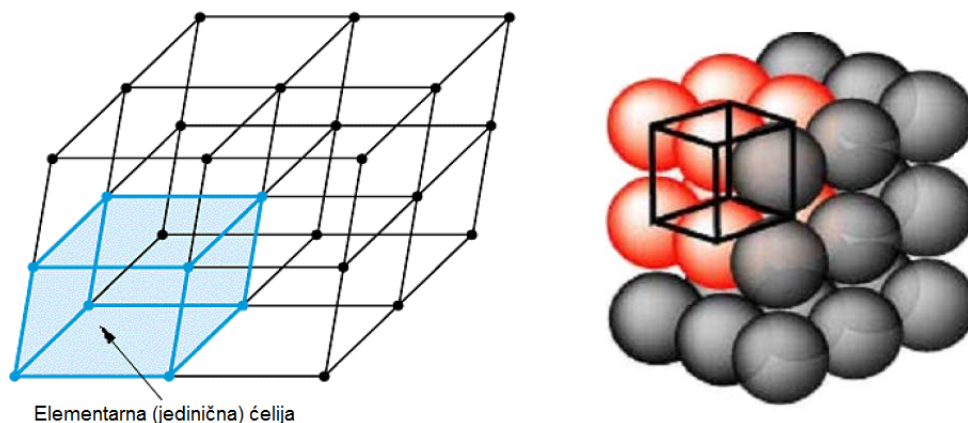
Pod pojmom *elementarne ćelije* podrazumijeva se najmanji kompleks atoma koji sadrži sva karakteristična obilježja date rešetke, a čijom se translacijom u prostoru dobija kristalna rešetka.

Definiciju prostorne rešetke zadovoljava svega 14 mogućih načina rasporeda atoma (molekula) u prostoru, što znači da postoji 14 tipova elementarnih ćelija (Slika 11).

Predstava elementarne ćelije ukazuje na značajne razlike u gustini pakovanja atoma u

prostoru. Popunjenost ukupne zapremine atomima u rešetki definiše se kao kompaktnost strukture, a kao pokazatelji kompaktnosti uzimaju se:

- *koeficijent kompaktnosti* – predstavlja odnos između zapremine popunjene atomima i ukupne zapremine elementarne ćelije;
- *koordinacioni broj* – predstavlja broj atoma koji se nalazi na najmanjem jednakom rastojanju od posmatranog atoma;
- *pripadajući broja atoma* – predstavlja broj atoma koji pripada jednoj elementarnoj ćeliji.



Slika 10. Kristalna rešetka i elementarna ćelija

<p>KUBNA $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p>	<p>P </p>	<p>I </p>	<p>F </p>	
<p>TETRAGONALNA $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p>	<p>P </p>	<p>I </p>		
<p>ORTOROMBIČNA $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p>	<p>P </p>	<p>I </p>	<p>F </p>	<p>C </p>
<p>HEKSAGONALNA $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$</p>	<p>P </p>	<p>ROMBOEDARSKA $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$</p>	<p>P </p>	
<p>MONOKLINIČNA $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 120^\circ$</p>	<p>P </p>	<p>C </p>		
<p>TRIKLINIČNA $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$</p>	<p>P </p>			

P - prosta
 I - prostorno-centrirana
 F - površinski centrirana
 C - bazno centrirana

14 vrsta jediničnih ćelija
 7 osnovnih kristalnih sistema

Slika 11. Osnovni tipovi elementarnih ćelija

Većina metala kristališe u jednoj od sledeće tri kristalne rešetke: *prostorno centriranoj kubnoj, površinski centriranoj kubnoj i gusto složenoj heksagonalnoj rešetki.*

4.2.3 Prostorno centrirana kubna (prost-c-k) rešetka

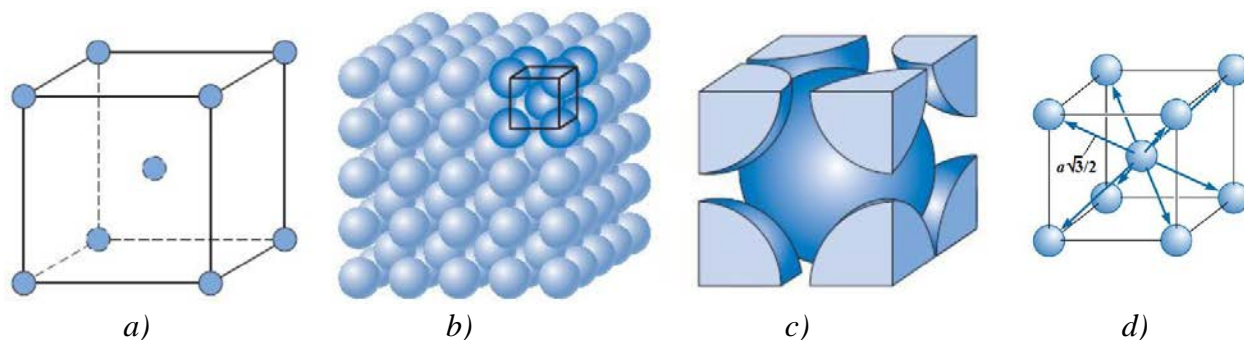
Ova rešetka ima po jedan atom u rogljevima elementarne ćelije i jedan atom smješten na presjeku prostornih dijagonala elementarne ćelije (Slika 12a). Karakteristična je za metale: Fe_α, Cr, W, V, Mo i dr.

Pakovanje atoma (Slika 12b) vrši se tako što se centri atoma drugog atomskog sloja smještaju u centre međuprostora četiri atoma prvog sloja. Centri atoma trećeg atomskog sloja nalaze se tačno iznad centara atoma prvog sloja.

Koeficijent kompaktnosti kod prost-c-k rešetke je 0,68 i kod nje nema gusto pakovanih slojeva atoma, mada ima gusto pakovanih nizova atoma.

Broj atoma koji pripada jednoj elementarnoj ćeliji prost-c-k rešetke je $N = 2$ (Slika 12c).

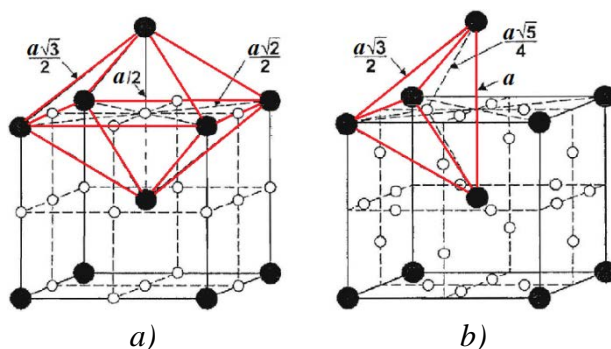
Koordinacioni broj tj. broj atoma koji se nalazi na najkraćem jednakom rastojanju ($a\sqrt{3}/2$) od posmatranog atoma je $KB = 8$ (Slika 12 d).



Slika 12. Šematski prikaz prost-c-k rešetke:

a) elementarna ćelija, b) pakovanje atoma, c) pripadajući broj atoma i d) koordinacioni broj

Kod prostorno centrirane kubne rešetke postoje dvije vrste međuatomskih praznina (rupa), koje se razlikuju po obliku i veličini. To su tzv. *oktaedarske* i *tetraedarske* praznine (Slika 13). Broj oktaedarskih rupa u ovoj elementarnoj ćeliji je 6, a tetraedarskih je 12.



Slika 13. Praznine kod prost-c-k rešetke: a) oktaedarske i b) tetraedarske

4.2.4 Površinski centrirana kubna (pov-c-k) rešetka

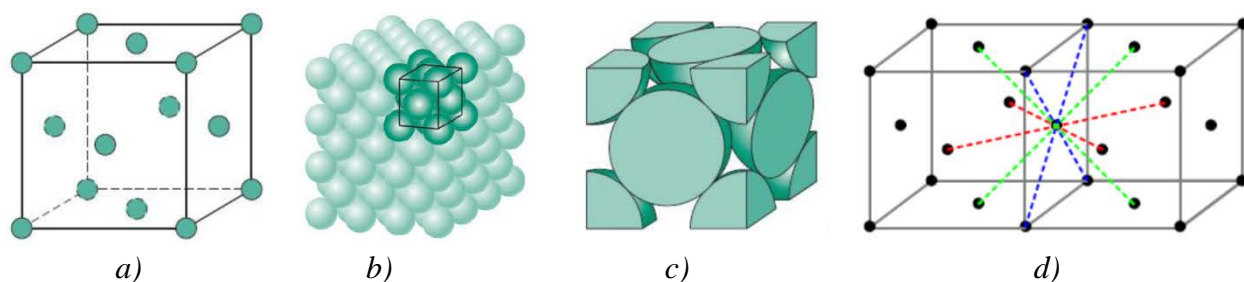
Kod pov-c-k rešetke atomi su smješteni u rogljevima i na sredinama stranica elementarne ćelije (Slika 14a). Karakteristična je za metale: Fe_γ, Al, Cu, Ni, Au, Ag, Pt i dr.

Atomi se pakuju po principu najgušćeg pakovanja, tako da je svaki atom u ravni okružen sa šest najbližih susjeda (Slika 14b). Pakovanje atomskih ravni odvija se po sistemu pakovanja A-B-C-A tj. da se centri atoma četvrtog sloja nalaze iznad centara atoma prvog sloja.

Broj atoma koji pripada jednoj elementarnoj ćeliji pov-c-k rešetke je $N = 4$ (Slika 14c).

Koordinacioni broj je $KB = 12$, što znači da se oko bilo kog atoma na najkraćem

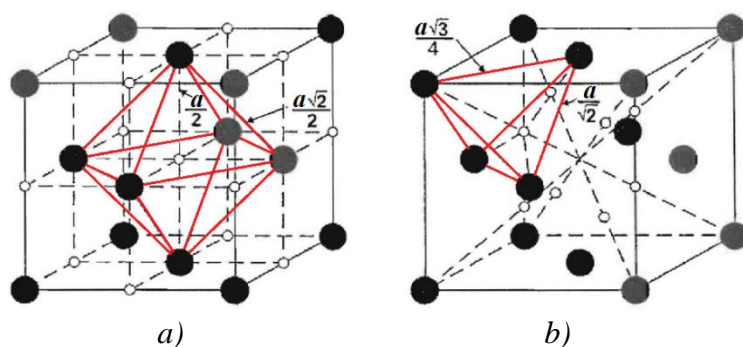
rastojanju ($a\sqrt{2}/2$) nalazi dvanaest atoma najbližih susjeda (Slika 14d).



Slika 14. Šematski prikaz pov-c-k rešetke:

a) elementarna ćelija, b) pakovanje atoma, c) pripadajući broj atoma i d) koordinacioni broj

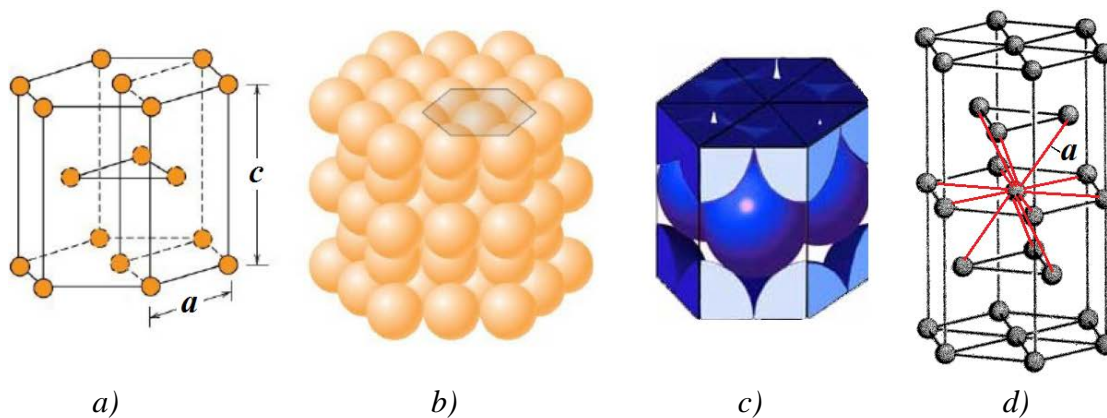
Koeficijent kompaktnosti kod pov-c-k rešetke je 0,74, tako da neuatomske prznine čine oko 1/4 ukupne zapremine. Ove prznine, takođe, mogu biti oktaedarske i tetraedarske (Slika 15). Broj oktaedarskih prznina jednak je broju čvorova rešetke, tj. četiri prznine po elementarnoj ćeliji. Broj tetraedarskih prznina je dva puta veći od broja čvorova rešetke.



Slika 15. Praznine kod pov-c-k rešetke: a) oktaedarske i b) tetraedarske

4.2.5 Gusto složena heksagonalna (g-s-h) rešetka

Elementarna ćelija gusto složene heksagonalne kristalne rešetke je šestostrana prizma, kod koje su atomi raspoređeni na rogljevima, centrima bazisa i tri atoma u unutrašnjosti prizme (Slika 16a). Ovu rešetku karakterišu dva parametra „c“ i „a“ čiji je odnos $c/a = 1,633$. Karakteristična je za metale: Zn, Cd, Ti, Sc, Zr i dr.



Slika 16. Šematski prikaz g-s-h rešetke:

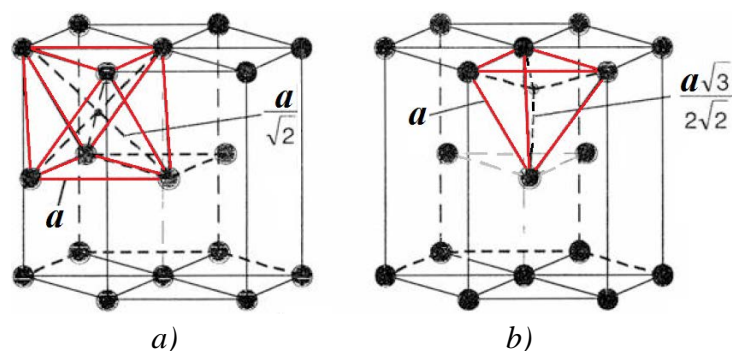
a) elementarna ćelija, b) pakovanje atoma, c) pripadajući broj atoma i d) koordinacioni broj

Pakovanje atoma kod g-s-h rešetke odvija se po sistemu slaganja atomskih ravni A-B-A, što znači da se centri atoma trećeg atomskog sloja nalaze tačno iznad centara atoma prvog atomskog sloja (Slika 16b). G-s-h rešetka, kao i pov-c-k rešetka, spada u grupu najgušće pakovanih rešetki, tako da je njen koeficijent kompaktnosti 0,74.

Broj atoma koji pripada jednoj elementarnoj ćeliji g-s-h rešetke je $N = 6$ (Slika 16c).

Koordinacioni broj je $KB = 12$, sa rasporedom atoma najbližih susjeda, koji se nalaze na najkraćem međusobnom rastojanju „ a “ (Slika 16 d).

Nepopunjeni dio zapremine rešetke sastoji se od oktaedarskih i tetraedarskih praznina (Slika 17). Ovi međuprostori su po obliku, veličini i koordinaciji potpuno identični onima u pov-c-k rešetki.



Slika 17. Praznine kod g-s-h rešetke: a) oktaedarske i b) tetraedarske

4.3 Kristalografsko označavanje

Analiza strukture i osobina kristala nije moguća bez definisanja pojedinih pravaca i ravni u kristalu tj. kristalnoj rešetki. Ovo je naročito važno za metale i legure čija se svojstva menjaju sa promjenom orijentacije kristala.

U cilju analitičkog opisivanja položaja atoma, kristalografskih pravaca i kristalografskih ravni u kristalnoj rešetki, uveden je sistem tzv. *kristalografskog označavanja*.

4.3.1 Indeksi kristalografskih ravni

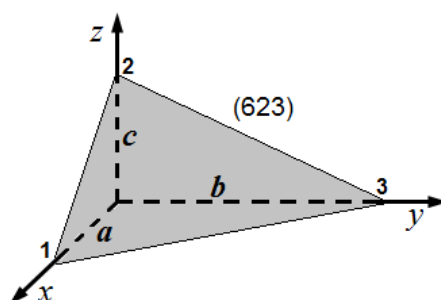
Svaka elementarna ćelija sastoji se iz sistema kristalografskih ravni. Položaj neke kristalografske ravni u prostornoj rešetki određen je odsječcima koje ta ravan pravi na kristalografskim osama. Odsječci koje određena ravan pravi na kristalografskim osama, nazivaju se *parametrima* te ravni ili *parametarskim koeficijentima*. Ovi koeficijenti se označavaju slovima: a – odsječak na x -osi, b – odsječak na y -osi i c – odsječak na z -osi. Ti parametri mogu biti pozitivni ili negativni u zavisnosti od loga da li su odsječci napravljeni na pozitivnim ili negativnim djelovima koordinatnih osa u kristalografskom sistemu.

Ravni koje su paralelne sa određenom kristalografskom osom imaju parametar na toj osi koji se mjeri kao *beskonačno veliki* i obilježava se sa „ ∞ “.

Iz određenih analitičkih i kristalografskih razloga prihvaćeno je da se ravni u kristalnim rešetkama ne opisuju sa parametrima (parametrijskim koeficijentima), već sa tzv. *Millerovim indeksima* – h , k i l . *Millerovi indeksi predstavljaju recipročne vrijednosti parametarskih koeficijenata svedeni na najmanje cijele brojeve*. Napisani navedenim redosledom i stavljeni u malu zagradu predstavljaju simbole ravni (hkl). Millerovi indeksi su ne samo cijeli, već i najmanji cijeli brojevi (obično ne veći od sedam). Prema tome simbol (hkl) predstavlja kristalografsku ravan koja na kristalografskim osama sa jedinicama a , b i c pravi odsječke a/h , b/k i c/l .

Na primjer, kristalografska ravan prikazana na slici 18 pravi na kristalografskim osama x , y i z odsječke $a = 1$, $b = 3$ i $c = 2$. Recipročne vrijednosti ovih odsječaka su $1/a = 1/1$, $1/b = 1/3$ i

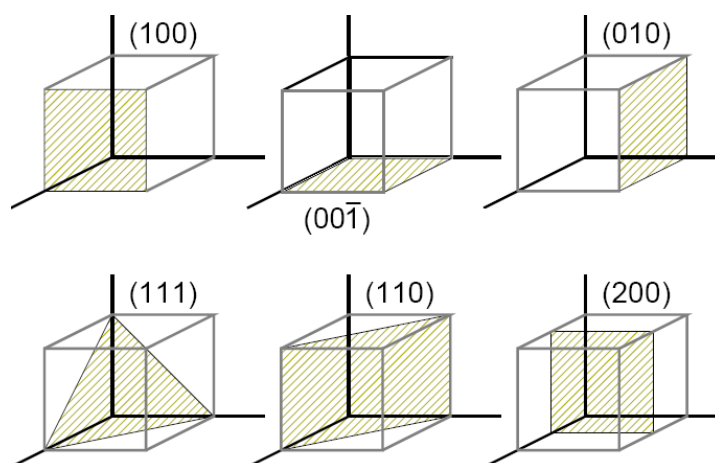
$1/c = 1/2$. Najmanji zajednički sadržalac brojnih vrijednosti ovih odsečaka je 6, pa se dobija: $h = 6/1 = 6$, $k = 6/3 = 2$ i $l = 6/2 = 3$. Dakle, Millerovi indeksi date ravni su (623).



Slika 18. Primjer određivanja Millerovih indeksa kristalografske ravni

Znak „-“ iznad indeksa znači da ravan pravi odsječak na negativnom dijelu date kristalografske ose. Ako je ravan paralelna nekoj od kristalografskih osa, odgovarajući Millerov indeks je nula (ravan seče tu kristalografsku osu u beskonačnosti, pa je recipročna vrednost odsečka jednaka nuli).

Na slici 19 prikazane su neke od najvažnijih ravni kubnog kristalnog sistema.



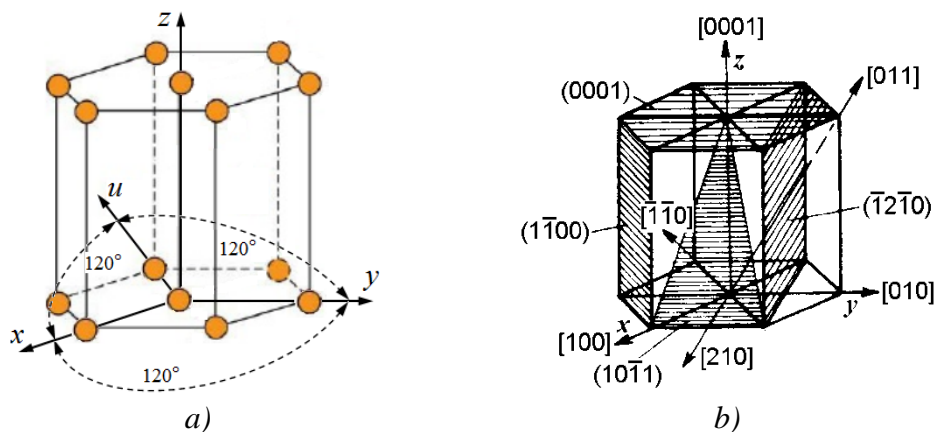
Slika 19. Millerovi indeksi nekih najvažnijih kristalografskih ravni u kubnom sistemu

Ravni koje imaju iste indekse, ali su različitog predznaka, obrazuju tzv. *familiju ravni* i obilježavaju se Millerovim indeksima u vitičastim zagradama $\{hkl\}$. Na primjer, simbol $\{100\}$ uključuje sve kubne ravni: (100), (010), (001), $(\bar{1}00)$, $(0\bar{1}0)$ i $(00\bar{1})$. Ravni iz familije ravni $\{hkl\}$ među sobno se sijeku i obrazuju pravilne geometrijske oblike, kao na primjer ravni $\{100\}$ obrazuju heksaedar (kocku), ravni $\{111\}$ oktaedar, ravni $\{110\}$ dodekedar, i itd. Za osobine kristalnih materijala najznačajnije su *heksaedarske*, *oktaedarske* i *dodekaedarske* ravni.

Za razliku od kubne rešetke, za čiju orijentaciju se koriste tri kristalografske ose (x , y i z), za orijentaciju heksagonalne rešetke koriste se četiri kristalografske ose: x , y , u i z (Slika 20a).

Ose x , y i u nalaze se u jednoj ravni i međusobno zaklapaju uglove od 120° , dok je z -osa normalna na njih. Svaka ravan u heksagonalnom sistemu definisana je sa četiri parametarska koeficijenta (odsječaka). Svođenje parametarskih koeficijenata na indekse ravni vrši se na isti način kao i kod kubnog sistema. Obilježavanje ravni u ovom sistemu vrši se pomoću *Miller-Bravaisovih* indeksa: i to tri indeksa h , k , i , koji karakterišu odsječke u bazisnoj ravni, a četvrti indeks l , karakteriše odsječak duž z -osa. Prema tome, obilježavanje ravni u heksagonalnom sistemu se vrši sa indeksima $(hkil)$, s tim što iz kristalografskih (geometrijskih) razloga mora biti zadovoljen uslov da je: $h + k + i = 0$.

Osnovne ravni u heksagonalnom sistemu date su na slici 20b.



Slika 20. Kristalografske ose (a) i najvažniji ravni i pravci (b) kod heksagonalnih sistema

4.3.2 Indeksi pravaca

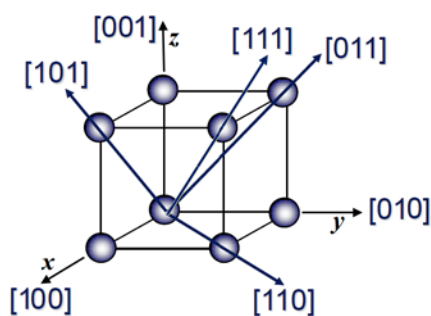
Svaka prava u prostoru određena je sa dvije tačke kroz koje prolazi. Kod kristalne rešetke sa odgovarajućim kristalografskim sistemom, iz familije paralelnih pravih, bira se ona koja prolazi kroz koordinatni početak. Dakle, koordinatnim početkom se definiše položaj jedne tačke, a druga tačka može biti bilo koja kroz koju ta prava prolazi. Koordinate te tačke, izražene preko parametara elementarne ćelije, svedeni na najmanje cijele brojeve uzimaju se kao simboli datog pravca.

Prema tome *kristalografski indeksi pravaca su komponente vektora pravca razložene duž svake koordinatne ose i svedene na najmanje cijele brojeve*. Označavaju se slovima u , v i w , a stavljaju se u uglaste (srednje) zagrade $[uvw]$.

Na primjer, ako su koordinate vektora pravca $x=a$, $y=2b$ i $z=c/4$, kada se svedu na najmanje cijele brojeve dobijaju se kristalografski indeksi datog pravca $[481]$.

U kubnom sistemu važi pravilo da su pravci i ravni sa istim indeksima međusobno normalni. Za označavanje familije pravaca, tj. pravaca sa istim indeksima ali različitog predznaka, koristi se tzv. *strelasta zagrada* tj. $\langle uvw \rangle$. Na primjer simbol $\langle 100 \rangle$ predstavlja pravce: $[100]$, $[010]$, $[001]$, $[\bar{1}00]$, $[0\bar{1}0]$ i $[00\bar{1}]$.

Neki od karakterističnih pravaca u kubnom sistemu prikazani su na slici 21, a u heksagonalnom na slici 20b.



Slika 21. Kristalografski pravci u kubnoj rešetki

4.4 Realna građa metala

U dosadašnjim razmatranjima kristali su smatrani idealnim tj. da su pravilne unutrašnje građe i pravilnog spoljašnjeg oblika. Međutim, realni kristali nijesu sastavljeni čak ni od identičnih atoma, a pored toga raspored tih atoma nije uvijek pravilan i zakonomjerman. Većina osobina metalnih materijala ne zavisi samo od pravilnog i zakonomjeronog rasporeda atoma u prostoru već i od mjere odstupanja od te pravilnosti.

Kristalna građa, koja ne odgovara pravilnom rasporedu atoma u prostoru i koja samim tim nema pravilnu unutrašnju građu, a time ni pravilan spoljašnji oblik, naziva se *realnom građom*, a kristali realnim kristalima, zrnima ili kristalitim. Sve greške u kristalnoj rešetki dijele se na:

- tačkaste (bezdimenzionalne),
- linijske (jednodimenzionalne),
- površinske (dvodimenzionalne).

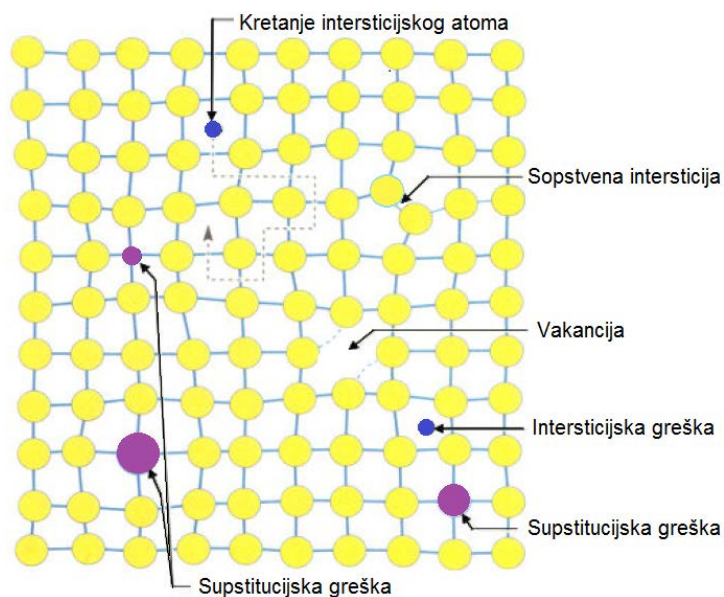
4.4.1 Tačkaste greške

Tačkaste greške su usko lokalizovani poremećaji u pravilnom rasporedu atoma u rešetki. Po pravilu nastaju zbog odsustva osnovnog atoma u kristalnoj rešetki, prisustva atoma primjesa (nečistoća) ili prisustva osnovnog atoma rešetke na „pogrešnom“ mjestu (Slika 22).

Odsustvo osnovnog atoma sa „odgovarajućeg“ mjesta u kristalnoj rešetki uslovljava nastanak tzv. *vakancija* (praznina).

Kada atomi primjesa zauzmu mjesta osnovnih atoma u rešetki nastaju *supstitucijske greške*, a kada se atomi primjesa smještaju između osnovnih atoma rešetke, nastaju *intersticijske greške*.

Ako se osnovni atom rešetke nađe na „pogrešnom“ mjestu u rešetki, tj. između ostalih osnovnih atoma, nastaje greška usljed tzv. *sopstvene intersticije*.



Slika 22. Šematski prikaz kombinacije tačkastih defekata kristalne rešetke

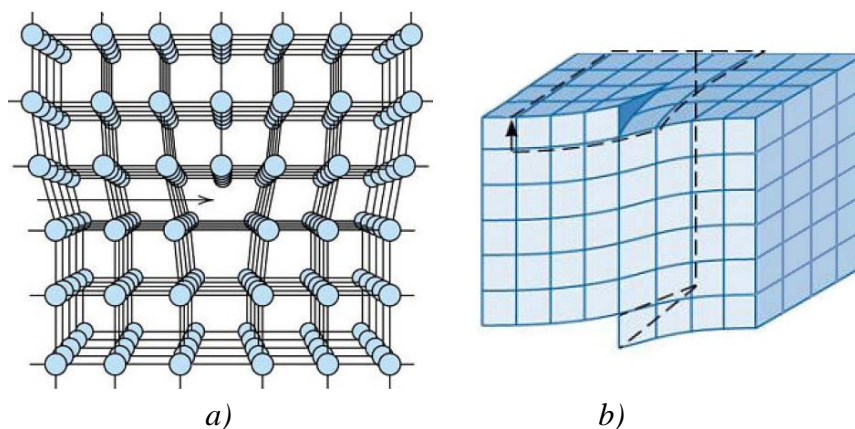
4.4.2 Linijske greške

Ove greške skoncentrisane su oko jedne linije, koja predstavlja granicu između dva idealno građena područja kristala, koja se nalaze u međusobnom raskoraku.

Linijska greška, koja predstavlja granicu između dijela kristala koji je „pomjeren“ i dijela kristala koji je ostao nepromijenjen, i koja se nalazi u jednoj ravni, naziva se *dislokacija*. Dislokacija predstavlja specifičnu konfiguraciju atoma, pomjerenih iz svojih ravnotežnih položaja duž zamišljene linije, što u krajnjem uslovljava deformaciju rešetke.

Dislokacije se dijele na ivične i zavojne (Slika 23).

Uticaj dislokacija je izuzetno velik na mehaničke osobine materijala, naročito na sposobnost za plastičnu deformaciju.



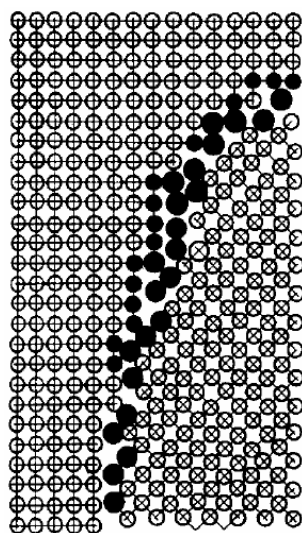
Slika 23. Ivična dislokacija (a) i zavojna dislokacija (b)

4.4.3 Površinske greške

U površinske greške spadaju greške planarne (ravanske) prirode: *granice zrna*, *granice subzrna*, *granice dvojnika*, *greške u redosledu*, kao i nehomogenosti tipa *mikropukotina*, *uključaka* i sl.

Granice zrna su one površinske greške koje odvajaju kristale različitih orijentacija u jednom polikristalnom agregatu (Slika 24). To su oblasti sa izrazitim narušavanjem pravilnosti kristalne građe, tj. sa izrazito velikom koncentracijom dislokacija i tačkastih grešaka.

Greške u redosledu nastaju zbog nepravilnog slaganja pojedinih atomskih slojeva. Atomi u ravni ili u dijelu ravni kristala mogu zauzeti položaje koji ne odgovaraju redosledu datog sloja u rešetki. Ako je jedan dio ravni izbačen, ubačen ili pak pomjeren javljaju se defekti u slojevima koji su „opkoljeni“ pravilnom rešetkom i od nje su odvojeni dislokacijama.



Slika 24. Šematski prikaz granice zrna

1. POJAM LEGURE, KOMPONENTE, FAZE

Pod legurama se podrazumijevaju složene supstance sastavljene iz dva ili više elemenata, od kojih najmanje jedan mora da bude metal.

Građa legura je složenija od građe čistih elemenata, koji ulaze u njen sastav. Osobine legura zavise od sadržaja pojedinih elemenata i njihovog međusobnog dejstva u čvrstom stanju.

Samostalne metalne i nemetalne supstance (elementi, ali i jedinjenja) koje čine leguru nazivaju se komponentama. U opštem slučaju komponente se označavaju sa A, B, C, D itd. Prema broju komponenti koje sadrže, legure se dijele na dvokomponentne, trokomponentne i višekomponentne legure. Pod komponentama se podrazumijevaju samo one supstance koje se namjerno dodaju, radi postizanja određenih osobina legura. Ostale supstance, koje se, iz bilo kojih razloga nalaze u legurama, a nepoželjne su, nazivaju se nečistoće ili primjese.

Homogeni dijelovi nekog sistema (legure), koji u svakoj svojoj tački imaju isti sastav i iste osobine i koji su međusobno razdvojeni graničnim površinama nazivaju se faze. Prema broju faza razlikuju se jednofazne, dvofazne, trofazne i vešefazne legure.

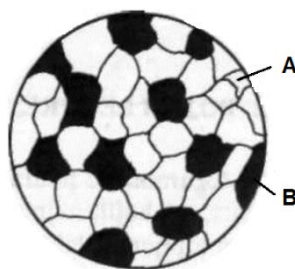
U zavisnosti od međusobnog fizičko-hemijskog dejstva komponenti prilikom kristalizacije, mogu nastati: *mehaničke smješe, čvrsti rastvori, hemijska jedinjenja i intermedijatne faze.*

1.1 Mehanička smješa faza

Mehanička smješa nastaje kao rezultat jednovremene kristalizacije dvije ili više komponenti, koje međusobno hemijski ne reaguju, niti se rastvaraju u čvrstom stanju (*Slika 25*).

Metalografska analiza mehaničke smješe pokazuje da se struktura legure sastoji iz dvije vrste zrna mehanički međusobno izmiješanih. Jedna vrsta zrna odgovara komponenti A, a druga komponenti B. Rendgenografska analiza pokazuje prisustvo dvije rešetke. Jedna rešetka odgovara rešetki komponente A, a druga rešetki komponente B.

Osobine zrna (kristala) A i B su identične osobinama čistih komponenti. Inače, osobine mehaničke smješe se nalaze između osobina čistih komponenti, a zavisne su od njihovog relativnog učešća u leguri, kao i od oblika i veličine zrna.



Slika 25. Mikrostrukturalna šema mehaničke smješe čistih komponenti A i B

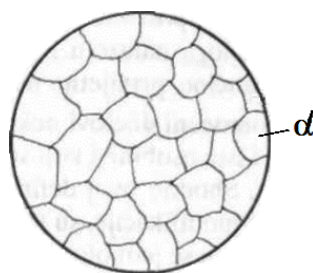
1.2 Čvrsti rastvori

Kada se dvije ili više raznorodnih atomskih vrsta (komponenti) miješa u tečnom stanju tako da prave homogenu smješu, onda se kaže da se radi o *rastvorljivosti komponenti u tečnom stanju*. Većina legura posjeduje potpunu rastvorljivost komponenti u tečnom stanju. Takve homogene smješe u tečnom stanju se nazivaju *rastopi* i obilježavaju se sa slovom R.

Ako se homogenost legure sačuva pri kristalizaciji, onda se govori i o *rastvorljivosti u*

čvrstom stanju. Smješe različitih atomskih vrsta postoje u određenom koncentracijskom području, pri čemu se zadržava rešetka jedne od komponenti, nazivaju se *čvrsti rastvori*. Čvrsti rastvori se obilježavaju grčkim slovima α , β , γ itd.

Šematski prikaz mikrostrukture jednog čvrstog rastvora dat je na slici 26.



Slika 26. Mikrostrukturna šema čvrstog rastvora α

Čvrsti rastvori nastaju na *bazi jedne od komponenti* ili na *bazi hemijskog jedinjenja*.

Čvrsti rastvori na bazi jedne od komponenti u leguri naslaju tako, što se u rešetki te komponente smještaju atomi druge komponente. Komponenta koja zadržava kristalnu rešetku naziva se *osnovna komponenta* ili *rastvarač*, a komponenta koja se rastvara naziva se *rastvorena* ili *legirajuća komponenta*.

U zavisnosti od načina raspoređivanja atoma u rešetki rastvarača, razlikuju se dvije vrste čvrstih rastvora i to *supstitucijski* i *intersticijski čvrsti rastvori*.

Supstitucijski čvrsti rastvori nastaju tako što atomi rastvorene komponente zamjenjuju atome rastvarača u njegovoj kristalnoj rešetki (*supstitucija = zamjena*).

Intersticijski čvrsti rastvori nastaju tako, što se atomi komponente koja se rastvara, raspoređuju u međuatomske praznine osnovne komponente (*intersticija = ulaganje*).

Kod čvrstih rastvora na *bazi hemijskog jedinjenja* A_nB_m zadržava se rešetka hemijskog jedinjenja, a atomi komponente koja se rastvara (B) zamjenjuju u rešetki jedinjenja izvjestan broj atoma komponente (A). Ovo znači da se komponenta (B) rastvara u hemijskom jedinjenju A_nB_m .

Moguća je rastvorljivost i trećeg elementa (C) u hemijskom jedinjenju. U tom slučaju atomi komponente (C) u kristalnoj rešetki jedinjenja zamjenjuju bilo atome komponente A, bilo atome komponente B. Hemijsko jedinjenje obrazuje se između elemenata koji imaju različite tipove kristalnih rešetki i veliku razliku u elektronskoj građi atoma.

1.3 Intermedijatne faze

U mnogim sistemima sa dvije ili više komponenti, uz određene koncentracijsko temperaturne uslove, mogu se javiti faze koje se, po pravilu, karakterišu kristalnom rešetkom različitom od rešetki komponenti iz kojih su nastale. Po tome, te faze liče na hemijska jedinjenja, ali se od njih, po pravilu razlikuju, širinom koncentracijskog područja i nepravilnim rasporedom atoma u rešetki, što je karakteristika čvrstih rastvora. Zbog toga se ove faze nazivaju intermedijatne faze.

2. PRAVILO FAZA

Stanje neke legure (sistema) određeno je njenim *sastavom* (*koncentracijom komponenti*), *temperaturom* i *pritiskom*. Sastav, temperatura i pritisak su promjenljive veličine, koje opredjeljuju stanje ravnoteže između pojedinih faza u sistemu. Ako se ove veličine mogu mijenjati nezavisno jedna od druge, a da pri tome ne dođe do promjene broja faza u sistemu, nazivaju se nezavisno promjenljive.

Stanje neke legure je različito za svaku pojedinačnu vrijednost nezavisno promjenljivih.

Za prikazivanje stanja legura koriste se *dijagrami stanja*. *Dijagram stanja* predstavlja grafički prikaz stanja serije legura nekog sistema.

Dijagram stanja predstavlja stabilno stanje, odnosno stanje koje u datim uslovima ima minimum slobodne energije. Dijagram stanja nazivamo i *ravnotežni dijagram*, jer pokazuje koje se faze nalaze u međusobnoj ravnoteži pri datim uslovima.

Promjene stanja prikazane na dijagramu, odnose se na *ravnotežne uslove*, tj. uslove za koje nije karakteristično izraženo *pregrijavanje* i *pothlađenje*. Pri proizvodnji tehničkih legura ovakvi uslovi ne mogu se obezbijediti, pa dijagram stanja predstavlja samo teorijski slučaj, a u praksi se koristi za razmatranje preobražaja pri malim brzinama zagrijavanja ili hlađenja.

Opšta zakonitost fazne ravnoteže najpotpunije se izražava pomoću tzv. *pravila faza*, odnosno *Gibbsovog zakona*:

$$f = k - p + n,$$

gdje su:

- f - broj stepeni slobode sistema,
- k - broj komponenti, koje obrazuju sistem,
- p - broj faza, koje se nalaze u ravnoteži,
- n - broj spoljašnjih faktora.

Pod brojem *stepeni slobode* sistema podrazumijeva se broj *spoljašnjih* i *unutrašnjih faktora ravnoteže* koji se mogu nezavisno mijenjati, a da ne dođe do promjene broja faza u sistemu.

U *spoljašnje faktore ravnoteže* ubrajaju se temperatura i pritisak ($n = 2$), pa jednačina pravila faza dobija oblik:

$$f = k - p + 2.$$

U *unutrašnje faktore* ubraja se koncentracija jedne ili više komponenti, u zavisnosti od broja komponenti koje grade leguru. Broj unutrašnjih faktora, odnosno nezavisno promjenljivih je uvijek manji za jedinicu od broja komponenti.

Pritisak se u stvarnim uslovima mijenja u veoma uskim granicama tako da praktično ne utiče na fazne preobražaj. Ako se prihvati da se svi fizički preobražaji dešavaju pri konstantnom pritisku, to se broj spoljašnjih faktora ravnoteže smanjuje za jedan ($n = 1$) i jednačina pravila faza u tom slučaju dobija konačni oblik:

$$f = k - p + 1.$$

Kada je broj stepeni slobode sistema jednak nuli ($f = 0$) kaže se da je sistem *nonvarijantan* ili *nulavarijantan*. To znači da se nijedan od faktora koji opredjeljuju stanje sistema (sastav, temperatura, pritisak) ne mogu promijenjeti a da ne dođe do narušavanja ravnoteže, odnosno promjene broja faza u sistemu.

Kada je broj stepeni slobode jednak jedinici ($f = 1$), sistem je *monovarijantan* ili *jednovarijantan*. Tada je moguća promjena jednog od faktora ravnoteže, a da ne dođe do promjene broja faza. Ostali faktori se mogu mijenjati, ali samo u zavisnosti od nezavisno promjenljive, pa ne utiču na promjenu broja faza.

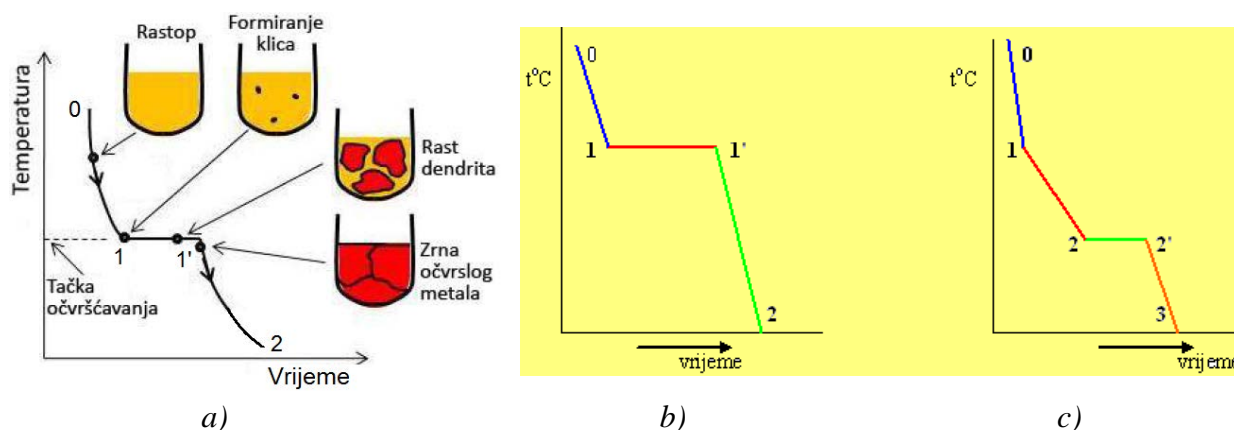
Ako sistem ima dva stepena slobode ($f = 2$), naziva se *divarijantan* ili *dvovarijantan*, pa je moguća promjena dva faktora a da pri tome ne dođe do promjene broja faza u sistemu.

Zahvaljujući pravilu faza može se na jednoznačan način konstruisati *kriva hlađenja*, odnosno *zagrijavanja* nekog metala ili legure.

Kriva hlađenja ili *zagrijavanja predstavlja grafički prikaz promjene temperature u zavisnosti od vremena, pri ravnotežnim uslovima.*

Kriva hlađenja čistog metala u koordinatnom sistemu *vrijeme-temperatura* prikazana je na

slici 27a,b. Analiza fazne ravnoteže u tački 0, pokazuje da je broj stepeni slobode sistema 1 ($f=k-p+1=1-1+1=1$), što znači da se u toku vremena mijenja samo jedna promenljiva (temperatura). U sistemu je prisutna samo tečna faza - *rastop*. Na krivoj hlađenja to je prikazano intervalom 0–1. U tački 1, proces kristalizacije odvija se u prisustvu dvije faze (*tečna* i *čvrsta*). Tada je sistem nonvarijantan ($f=1-2+1=0$) pa se proces odvija uz konstantnu temperaturu. Na krivoj hlađenja to je prikazano horizontalnim odsječkom 1–1' (zastoj na krivoj). Opadajući dio krive 1'–2 odnosi se na hlađenje čvrste faze ($f=1$).



Slika 27. Krive hlađenja: čistog metala (a,b) i legure (c)

Kriva hlađenja jedne dvokomponentne legure (koja kristališe gradeći smještu dvije različite čvrste faze) prikazana je na slici 27c. Temperaturni interval 0–1 odgovara hlađenju rastopa. U tom rasponu sistem je divarijantan ($f=2-1+1=2$). U tački 1 počinje kristalizacija jedne od komponenti, a u ravnoteži se nalaze dvije faze (tečna i čvrsta). Sistem je monovarijantan ($f=2-2+1=1$), pa se na krivoj hlađenja javlja blaži pad temperature (dio 1–2), uslovljen oslobađanjem latentne toplote kristalizacije faze koja kristališe. Horizontalni dio 2–2' odgovara ravnoteži trofaznog sistema, jer samo tada dvokomponentni sistem ima broj stepena slobode jednak nuli ($f=2-3+1=0$). Dio 2'–3 odgovara hlađenju već očvrstle legure, kada je sistem monovarijantan ($f=2-2+1=1$).

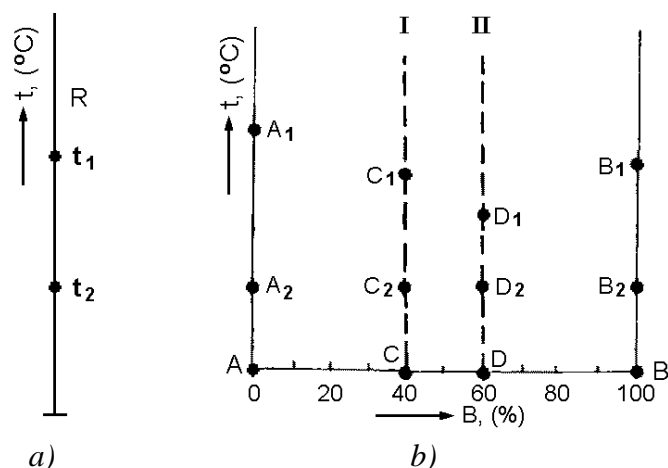
3. RAVNOTEŽNI DIJAGRAM STANJA

Dijagram stanja (fazni dijagram) je grafička predstava promjene stanja sistema u zavisnosti od temperature i koncentracije, pod pretpostavkom da je pritisak konstantan.

Kada je sistem jednokomponentan, dijagram stanja ima samo jednu dimenziju – temperaturnu skalu (Slika 28a), jer je kod ovog sistema pored pritiska i koncentracija konstantna. Odgovarajuće tačke na temperaturnoj osi pokazuju ravnotežne temperature promjene faznog stanja.

Kod dvokomponentnog sistema dijagram stanja je dvodimenzionalan. Za njegovo predstavljanje se koriste pravougaone koordinate. Na apscisi se nanosi koncentracija komponenti, a na ordinatu temperatura (Slika 28b). Ukupan sadržaj obje komponente u leguri je 100%, pa svakoj tački na apscisi odgovara tačno određeni sadržaj svake od komponenti. Legura koja odgovara tački C sastoji se od 40% komponente B i 60% komponente A. Legura predstavljena tačkom D sastoji se od 60% komponente B i 40% komponente A. Udaljenjem od tačke A raste sadržaj komponente B i smanjuje se sadržaj komponente A i obrnuto. Na osnovu toga sledi da krajnje tačke na apscisi odgovaraju čistim komponentama, a sve ostale tačke između njih odgovaraju dvojnim legurama.

Temperatura topljenja komponente A nanosi se na ordinatu koja odgovara ovoj komponenti (tačka A₁), dok se temperatura topljenja komponente B nanosi na ordinatu koja odgovara toj komponenti (tačka B₁).



Slika 28. Načini grafičkog opisivanja stanja jednokomponentnog (a) i dvokomponentnog (b) sistema

Svaka vertikalna linija (I, II) predstavlja promjenu temperature legure tačno određenog sastava. Prelaz legure iz jednog faznog stanja u drugo pri promjeni temperature označava se tačkom na odgovarajućoj vertikali (tačke C₁, D₁, C₂ i D₂). Povezivanjem tačaka analognih transformacija za seriju legura nekog sistema dobijaju se linije (krive), koje razdvajaju oblasti različitog faznog stanja, odnosno dobija se fazni ili ravnotežni dijagram stanja.

Prema tome, svaka linija na dijagramu stanja odgovara nekom faznom preobražaju i promjeni strukture legure, pa se zato ove linije nazivaju *linije preobražaja* (transformacije). Polja ograničena linijama preobražaja se nazivaju *istorodnim faznim poljima*.

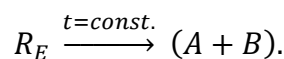
Tačka koja odgovara temperaturi početka kristalizacije (tačka 1), naziva se *likvidus tačka*, a tačka koja odgovara temperaturi završetka kristalizacije (tačka 2) naziva se *solidus tačka*.

Linija preobražaja koja povezuje likvidus tačke naziva se *likvidus linija*. Linija preobražaja koja povezuje solidus tačke naziva se *solidus linija*. Iznad likvidus linije sve legure nalaze se u tečnom stanju, a ispod solidus linije u čvrstom stanju.

3.1 Dijagram stanja legura koje obrazuju mehaničku smjesu čistih komponenti

Kao rezultat potpune rastvorljivosti komponenti A i B u tečnom stanju, javlja se jedna tečna faza - *rastop*. Kao rezultat *potpune nerastvorljivosti komponenti u čvrstom stanju*, u sistemu se javljaju dvije čvrste faze, i to čista komponenta A i čista komponenta B. S obzirom da se radi o mehaničkoj smješi komponenti, to znači da istovremeno iz rastopa kristališu dvije vrste zrna koje odgovaraju čistim komponentama. Tada se u ravnoteži nalaze tri faze. Sistem je nonvarijantan, pa se kristalizacija odvija pri konstantnoj temperaturi, što se na dijagramu stanja prikazuje izotermalom (horizontalnom linijom). Opšti dijagram stanja legura koje obrazuju mehaničku smjesu čistih komponenti prikazan je na slici 29.

Mehanička smjesa dvije (ili više) vrste kristala, koji istovremeno očvršćavaju iz rastopa pri konstantnoj temperaturi, naziva se *eutektikum*. Reakcija pri kojoj se to odigrava naziva se *eutektička reakcija*:

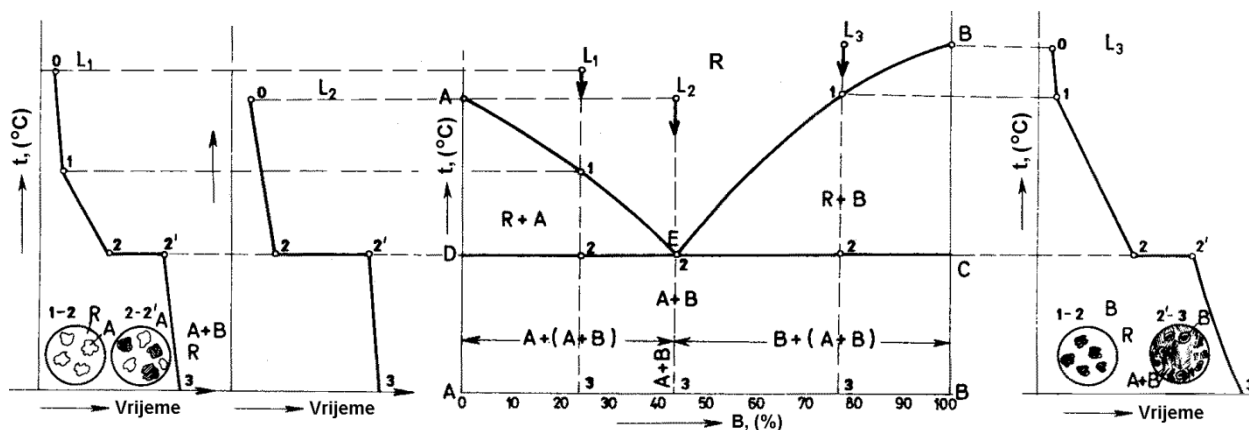


Tačka E se naziva *eutektička tačka*. Ona se nalazi na eutektičkoj temperaturi i pokazuje eutektički sastav. Legura sa eutektičkim sastavom ima najnižu tačku topljenja od svih mogućih legura u sistemu komponenti A i B. Eutektička tačka istovremeno predstavlja i *likvidus* i *solidus* tačku. Izotermala DEC se naziva *eutektikala* i na njoj se razlaže homogeni rastop u heterogenu smjesu kristala. Legure čiji se sastav nalazi lijevo od eutektičke koncentracije nazivaju se *podeutektičke*, a one čiji se sastav nalazi desno od eutektičke koncentracije nazivaju se *predeutektičke*.

se *nadeutektičke legure*. Legura sa eutekličkim sastavom naziva se *euteklička legura*.

Da bi počela euteklička reakcija (jedновременna kristalizacija komponenti) neophodan je jednoznačno određen sastav legure. Zbog toga, primarna kristalizacija počinje izdvajanjem viška komponente A ili B u zavisnosti od toga da li se radi o podutekličkim ili nadeutekličkim legurama. Shodno tome, po liniji AE izdvajaju se primarni kristali A komponente, a po liniji EB primarni kristali B komponente. U oba slučaja primarna kristalizacija se nastavlja do eutekličke linije DEC, kada se jednovremeno iz rastopa izdvajaju obje komponente (A+B). Kriva hlađenja podeutekličke legure L_1 prikazana je na slici 29. U intervalu 0-1 dolazi do ravnomjernog hlađenja rastopa. U tački 1, počinje izdvajanje primarnih kristala komponente A. U intervalu 1-2 nastavlja se izdvajanje viška komponente A, dok se koncentracija rastopa mijenja po likvidus liniji 1-E. U tački 2, počinje jednovremeno izdvajanje smješe kristala dvije komponente iz rastopa, čija koncentracija odgovara projekciji tačke E na koncentracijsku osu. S obzirom, na nonvarijantnu ravnotežu ($f=0$), kristalizacija će se odvijati pri konstantnoj temperaturi, sve dok se ne iskristališe tečna faza. To znači, da se na toj temperaturi završava proces kristalizacije. Na krivoj hlađenja to je predstavljeno zastojem 2-2'. Ispod te temperature nema nikakvih promjena u strukturi, već se radi o hlađenju očvrsele legure (interval 2'-3).

Na istoj slici ispod krive hlađenja prikazana je struktura legure za date uslove kristalizacije. Nakon završetka očvršćavanja legura se sastoji iz dva mikrokonstituenta, i to: primarnih kristala komponente A i mehaničke smješe kristala (A+B).



Slika 29. Dijagram stanja legura sa potpunom nerastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju

Kristalizacija eutekličke legure (L_2) počinje izdvajanjem eutektikuma iz rastopa uz konstantnu temperaturu, sve dok legura potpuno ne očvrсне. Na krivoj hlađenja, interval 0-2 odgovara hlađenju rastopa, interval 2-2' odgovara kristalizaciji eutektikuma, a interval 2-3' hlađenju već očvrsele legure.

Kristalizacija nadeutekličke legure (L_3) počinje u tački 1, izdvajanjem primarnih kristala B komponente. U intervalu 1-2 nastavlja se kristalizacija B komponente, pri čemu se sastav rastopa mijenja po krivoj 1-E. U tački 2 počinje kristalizacija eutektikuma i temperatura se ne mijenja sve dok legura ne očvrсне.

Na dijagramu stanja prikazane su oblasti prisustva različitih faza i različitih mikrokonstituenata. Ispod euteklike DEC prisutne su uvijek dvije faze: kristali A i kristali B. Međutim, kada se radi o strukturnim sastojcima, odnosno o mikrokonstituentima legure, onda je situacija nešto drugačija. Naime, podeutekličke legure se na dnevnim temperaturama sastoje od dva mikrokonstituenta i to primarnih kristala komponente A i eutektikuma. Nadeutekličke legure se na dnevnim temperaturama sastoje iz primarnih kristala B komponente i eutektikuma. Euteklička legura se sastoji isključivo od eutektikuma tj. eutekličkih kristala.

Tipični primjeri sistema legura sa potpunom nerastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju su: Sn-Zn, Al-Sn, Bi-Cd, Pb-Sb, itd.

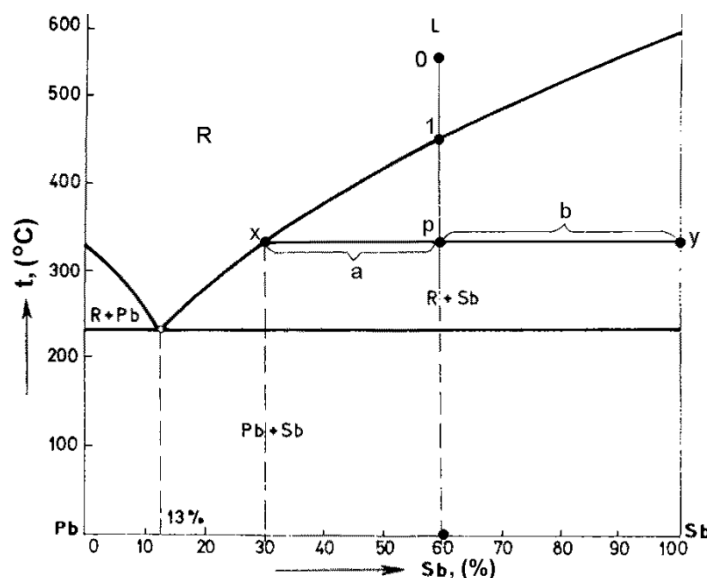
3.1.1 Određivanje sastava i količinskog udjela faza

Pomoću dijagrama stanja, za određenu leguru, pri određenoj temperaturi mogu se odrediti faze koje se nalaze u međusobnoj ravnoteži, kao i njihov hemijski sastav i količinski udio.

Za određivanje faza prisutnih u datoj tački stanja neke legure pri određenoj temperaturi, koristi se pravilo da su prisutne one faze koje odgovaraju faznom polju u kome se nalazi data tačka. Tako, na primjer, legura L (Slika 30) u tački **0**, sastoji se iz homogenog rastopa. U tački **p**, legura se sastoji iz rastopa (R) i kristala antimona (Sb). U tački 1, (likvidus tačka), u ravnoteži se nalaze one faze koje odgovaraju faznoj transformaciji koja se vrši po toj liniji. U konkretnom slučaju u tački 1 egzistiraju rastop i prvi primarni kristali Sb.

Ako je u datoj tački stanja prisutna samo jedna faza, ona će imati isti sastav kao i legura. Međutim, ako su na određenoj temperaturi prisutne dvije faze u međusobnoj ravnoteži, one imaju sastav različit od sastava legure. Da bi se odredili njihovi sastavi neophodno je koristiti još dvije tačke dijagrama i to sve na istoj temperaturi kao i tačka koja definiše datu leguru. Na primjer, tačka **p** je određena sastavom početne legure (60% Sb + 40% Pb), ali dvije prisutne faze iz kojih se sastoji legura nemaju sastav definisan tačkom **p**, već tačkama duž horizontale povučene kroz tu tačku. Tačke koje karakterišu ove dvije faze nalaze se u presjecima te izotermale sa graničnim linijama dvofaznih područja. Izotermala koja povezuje granične linije nekog dvofaznog područja naziva se linija povezivanja.

Prema tome, sastav rastopa R dat je projekcijom tačke **x** na koncentracijsku osu, dok je sastav Sb određen projekcijom tačke **y** na koncentracijsku osu (100% Sb).



Slika 30. Primjer primjene pravila polige na sistemi Pb-Sb

Pomoću dijagrama stanja mogu se odrediti i količinski udjeli faza koje se nalaze u međusobnoj ravnoteži. Ako je prisutna samo jedna faza, kao u tački **0**, težina te faze mora biti jednaka težini legure. Ako su prisutne dvije faze, onda su njihovi količinski udjeli određeni odnosom njihovih koncentracija prema koncentraciji legure. Tako, na primjer, u tački **p**, legura L se sastoji iz dvije faze (R + Sb). Odnos količina ove dvije faze određen je položajem tačke **p** u odnosu na granične linije faznog područja.

Pomoću linije povezivanja moguće je odrediti količinske udjele faza koje se nalaze u međusobnoj ravnoteži pri određenoj temperaturi. Ako se udio rastopa u leguri, tj. odnos njegove težine i težine ukupne legure označi sa m_R a udio kristala antimona u leguri sa m_{Sb} , izvjesno je da zbir udjela rastopa i čvrste faze mora biti jednak jedinici:

$$m_R + m_{Sb} = 1.$$

Količinski udjeli faza (m_R i m_{Sb}) određuju se pomoću *pravila dvokrake poluge* čiji se oslonac nalazi u tački **p** (Slika 30), tako da je:

$$m_R \cdot a = m_{Sb} \cdot b.$$

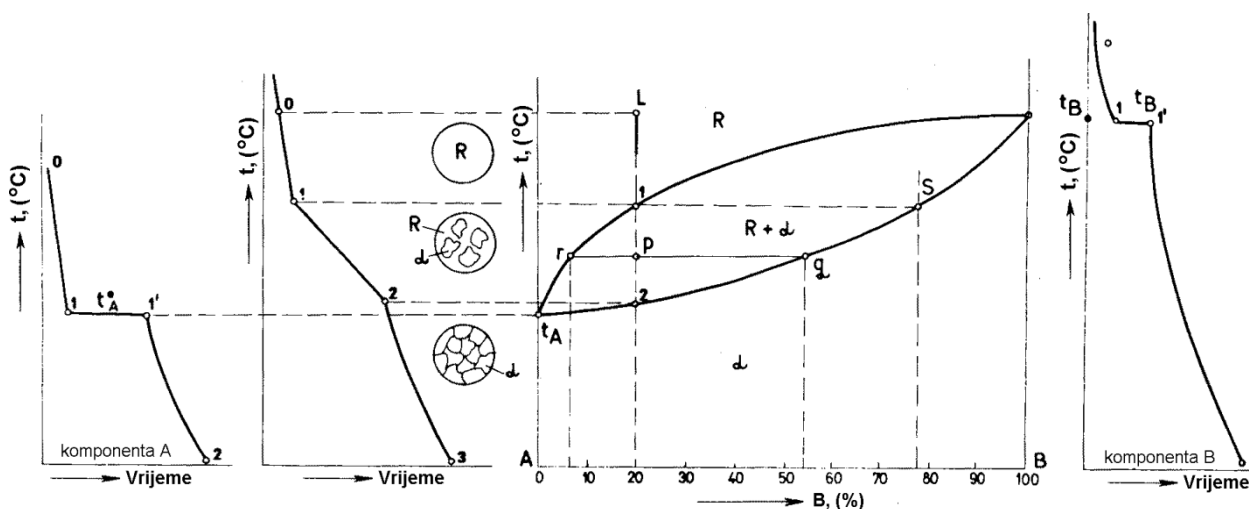
Posle sređivanja dvije prethoden jednačine, izvode se konačni izrazi za izračunavanje količinskih udjela faza koje se nalaze u ravnoteži:

$$m_R = \frac{b}{a+b} \cdot 100\%, \quad m_{Sb} = \frac{a}{a+b} \cdot 100\%.$$

3.2 Dijagram stanja legura sa potpunom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju

Ako se dvije komponente potpuno rastvaraju u čvrstom stanju obrazuju se čvrsti rastvori (α), odnosno, obrazuje se neprekidan niz čvrstih rastvora. Tada je sistem dvovarijantan, pa se temperatura i koncentracija mogu mijenjati u određenim granicama, a da pri tome ne dođe do promjene broja faza u ravnoteži. To znači, da čvrsti rastvor zauzima određeno fazno područje na dijagramu stanja pri nižim temperaturama i pri bilo kojem sadržaju komponenti u leguri. Između dva jednofazna područja R i α , mora egzistirati dvofazno područje ($R+\alpha$). Prema tome, dijagram stanja legura sa potpunom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju se sastoji iz tri fazna polja: R, $R+\alpha$ i α (Slika 31). Iznad likvidus linije, legure se nalaze u tečnom, ispod solidus linije u čvrstom, a između likvidusa i solidusa u tzv. tjestastom stanju (tečno+čvrsto).

Potpunu (neograničenu) rastvorljivost u čvrstom stanju pokazuju sledeći sistemi legura: Cu-Ni, Cu-Mn, Au-Cu, Ag-Au, Mg-Cd, Bi-Sb, itd.



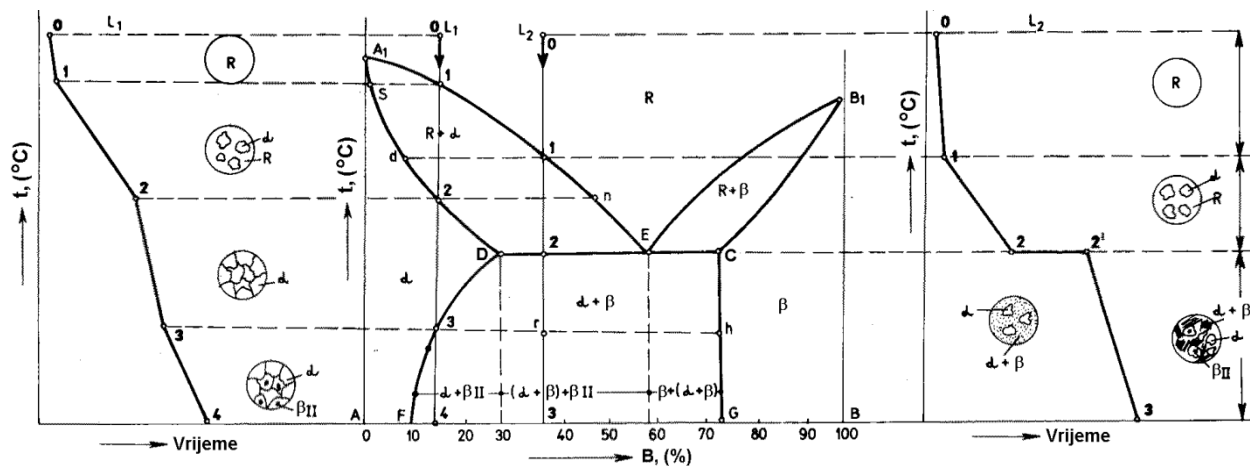
Slika 31. Dijagram stanja legura sa potpunom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju

3.3 Dijagram stanja legura sa ograničenom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju

Kao rezultat ograničene rastvorljivosti komponente A i B, u čvrstom stanju nastaju dva čvrsta rastvora, i to čvrsti rastvor na bazi komponente A, koji se označava sa α i čvrsti rastvor na bazi komponente B, koji se označava sa β . U zavisnosti od toga kakve se reakcije odvijaju u uslovima kada su u ravnoteži nalaze tri faze (rastop, kristali α i β) razlikuju se eutektički i peritektički sistemi sa ograničenom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju.

3.3.1 Eutektički sistemi legura sa ograničenom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju

Kod eutektičkih sistema sa ograničenom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju kao faze javljaju se čvrsti rastvori na bazi komponenti (Slika 32). Djelimična rastvorljivost komponente B u komponenti A, određena je linijom DF, a djelimična rastvorljivost komponente A u komponenti B, određena je linijom CG. Legure koje se nalaze između te dvije linije, javljaju se kao dvofazne, sastavljene od kristala α i β čvrstih rastvora.

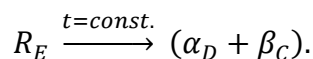


Slika 32. Eutektički dijagram stanja legura sa ograničenom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju

Linija A_1EB_1 je likvidus linija, a linija A_1DCB_1 je solidus linija. Linije DF i CG se nazivaju solvus linijama, odnosno linijama granične rastvorljivosti. Tačka D pokazuje maksimalnu rastvorljivost komponente B u α čvrstom rastvoru, pri ravnotežnim uslovima.

Legura L_1 počinje kristalizaciju u tački 1 (likvidus tačka), izdvajanjem primarnih kristala α čvrstog rastvora. U tački 2 kristalizacija se završava. Kristali α čvrstog rastvora imaju sastav koji odgovara sastavu početne legure. U intervalu 2-3 kristali α čvrstog rastvora ne trpe nikakve promjene, izuzev što se hlade. U tački 3, legura dostiže granicu rastvorljivosti pri toj temperaturi. U toku daljeg hlađenja, čvrsti rastvor postaje presičen, pa dolazi do izdvajanja nove faze. Sa padom temperature ispod linije rastvorljivosti, smanjuje se rastvorljivost komponente B u komponenti A, zbog toga dolazi do izdvajanja kristala β_{II} čvrstog rastvora. Ovi β kristali koji se izdvajaju iz α čvrstog rastvora nazivaju se sekundarni kristali i označavaju se sa β_{II} , za razliku od primarnih kristala, koji se izdvajaju direktno iz rastopa.

Kristalizacija legure L_2 u početku teče na isti način kao i legure L_1 . U tački 1 počinje primarna kristalizacija i odvija se u intervalu 1-2 izdvajanjem α čvrstog rastvora. Nakon dostizanja temperature koja odgovara horizontali DEC počinje eutektička reakcija, po kojoj se iz rastopa jednovremeno izdvaja smješa kristala dvije čvrste faze pri konstantnoj temperaturi:



Indeksi E, D i C ukazuju na sastave faza koje se nalaze u ravnoteži, tako da rastop ima sastav određen tačkom E, α čvrsti rastvor tačkom D i β čvrsti rastvor tačkom C.

Neposredno ispod linije DEC, struktura legura sastoji se iz dva mikrokonstituenta i to iz primarnih α kristala i eutektikuma ($\alpha+\beta$). Međutim, pri daljem hlađenju javljaju se određene promjene u čvrstom stanju. Kao rezultat smanjene rastvorljivosti komponente B u α čvrstom rastvoru, izdvajaju se sekundarni β_{II} kristali. Prema tome, strukturni mikrokonstituenti legure L_2 na dnevnim temperaturama su: primarni α kristali, eutektikum ($\alpha+\beta$) i sekundarni β_{II} kristali. Sekundarni β_{II} kristali metalografski se teško identifikuju, jer se sjedinjavaju sa istoimenom fazom eutektikuma.

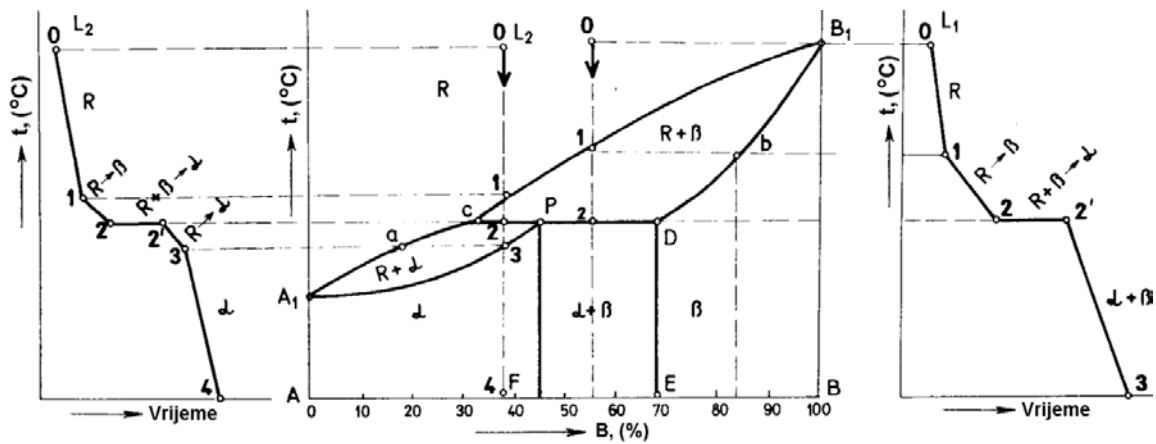
Bez obzira na mnogobrojne mikrokonstituente, konačno ohlađena legura L_2 sadrži samo dvije faze i to: α i β . Naime, α i β kristali, bez obzira da li su primarni, sekundarni ili eutektički, uvijek imaju sastav koji odgovara solvus linijama, odnosno sastav koji odgovara tačkama F i G na dijagramu.

Legure sistema Pb-Sn predstavljaju tipičan eutektički sistem sa ograničenom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju.

3.3.2 Peritektički sistemi legura sa ograničenom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju

Peritektička reakcija se odigrava pri konstantnoj temperaturi sve dotle dok su u ravnoteži prisutne tri faze (R, α i β). Pri eutektičkom preobražaju iz rastopa se obrazuju dvije čvrste faze, dok pri peritektičkom preobražaju prethodno izdvojena čvrsta faza reaguje sa zaostalim rastopom i obrazuje novu čvrstu fazu.

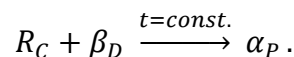
Na peritektičkom dijagram stanja (Slika 33) prisutne su tri jednofazne oblasti, i to: čvrsti rastvor komponente B u komponenti A (α), čvrsti rastvor komponente A u komponenti B (β) i rastop. Linija A_1CB_1 je likvidus linija, linija A_1PDB_1 je solidus linija, dok su linije granične rastvorljivosti (solvus linije) PF i DE date kao vertikale, radi jednostavnosti.



Slika 33. Peritektički dijagram stanja legura sa ograničenom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju

Kristalizacija legure L_1 počinje u tački 1, primarnim izdvajanjem β čvrstog rastvora. Sa snižavanjem temperature rastop mijenja sastav po likvidus liniji 1-C. Sastav β kristala mijenja se po solidus liniji b-D. Na peritektičkoj temperaturi (peritektikali) CPD, sastav rastopa odgovara projekciji tačke C, a sastav kristala β faze odgovara projekciji tačke D. Rastop i β kristali reaguju i obrazuju novu kristalnu α fazu, čiji sastav odgovara projekciji tačke P na koncentracijsku osu.

Peritektička reakcija odvija se na sledeći način:



Kristalizacija legure L_2 se odigrava na isti način kao i kristalizacija legure L_1 , do peritektičke reakcije. U peritektičkoj reakciji učestvuju takođe tri faze, ali u ovom slučaju prisutan je višak rastopa R, u odnosu na onu količinu koja je potrebna da se peritektička reakcija završi bez viška bilo koje od faza koje učestvuju u reakciji. Pri daljem hlađenju u intervalu 2'-3' odigrava se kristalizacija a čvrstog rastvora direktno iz rastopa. U tački 3' završava se kristalizacija, a legura se sastoji isključivo iz α kristala, od kojih su jedni nastali kao produkt peritektičke reakcije, a drugi kristalizacijom iz rastopa (po liniji A_1C). Hlađenjem legure u intervalu 3'-4' u strukturi se ne odigravaju nikakve promjene.

Tipičan peritektički sistem legura sa ograničenom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju je Pt-Ag.

1. SISTEMI LEGURA ŽELJEZO – UGLJENIK

Najvažnije legure željeza sa ugljenikom su *čelici* i *gvožđa*. To su ujedno i legure koje čine osnovu savremene tehnike i čija proizvodnja je veća od svih ostalih legura zajedno.

Željezo je elemenat VIII grupe, IV periode, periodnog sistema elemenata. To je metal srebrnasto bijele boje, feromagnetičan je. Atomski broj mu je 26, atomska masa 55,85 a atomski poluprečnik 0,127 nm.

Željezo se javlja u tri alotropske modifikacije, i to: željezo koje ima *prostorno centriranu kubnu rešetku* postojanu u temperaturnom intervalu od sobne temperature do 910 °C nazvano α -željezo (Fe_α) i od 1401÷1539 °C nazvano δ -željezo (Fe_δ), i željezo koje ima *površinski centriranu kubnu rešetku* postojanu u temperaturnom intervalu od 910÷1401 °C nazvano γ -željezo (Fe_γ). Fe_α i Fe_δ predstavljaju istu modifikaciju željeza, jer imaju istu kristalnu strukturu, ali postojanu u različitim temperaturnim oblastima.

Ugljenik je nemetal IV grupe, II periode periodnog sistema elemenata. Redni broj mu je 6, atomska masa 12,011, atomski prečnik 0,077 nm. Temperatura topljenja je 3500 °C. Ugljenik je takođe polimorfan, javlja se u obliku *grafita* i *dijamanta*. U sistemima legura Fe-C javlja se u obliku elementarnog ugljenika - grafita (ima heklsagonalnu slojastu strukturu) i cementita (Fe_3C) - jedinjenja sa željezom. Shodno tome, proces kristalizacije legura iz sistema željezo-ugljenik može se pratiti pomoću dva dijagrama stanja i to: dijagram željezo-cementit ($Fe-Fe_3C$) i dijagram željezo-ugljenik ($Fe-C$).

Cementit (Fe_3C) nije krajnje stabilno jedinjenje već se pri određenom termičkom tretmanu i u prisustvu na primjer silicijuma, razlaže u stabilniji oblik, to se dvokomponentni sistem $Fe-Fe_3C$ naziva *metastabilnim sistemom*, dok se $Fe-C$ sistem naziva *stabilnim sistemom*.

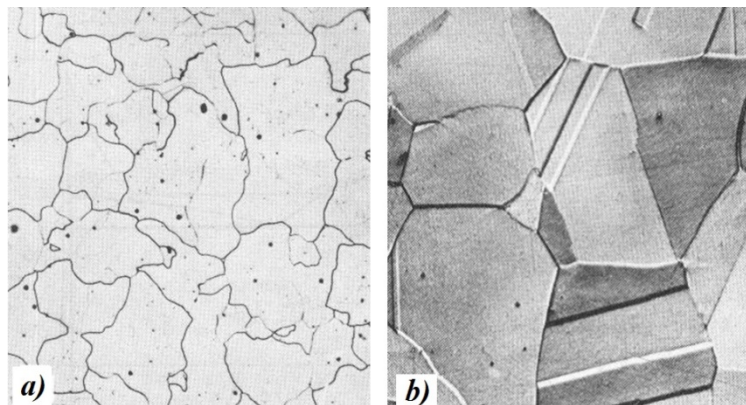
1.1 Faze u legurama željezo – ugljenik

U sistemu željezo-ugljenik javljaju se sljedeće faze: tečna faza (*rastop*), čvrsti rastvori - *ferit* i *austenit*, kao i *cementit* i *grafit*.

Rastop (R) je tečna faza.

Ferit je čvrsti rastvor (*Slika 34a*) ugljenika i drugih primjesa u prostorno centriranoj kubnoj rešetki željeza. Razlikuje se niskotemperaturni α -*ferit* sa maksimalnom rastvorljivošću ugljenika do 0,025% na temperaturi 723 °C i visokotemperaturni δ -*ferit* sa maksimalnom rastvorljivošću ugljenika do 0,1% na temperaturi 1493 °C.

Austenit je čvrsti rastvor (*Slika 34b*) ugljenika i drugih primjesa u površinski centriranoj kubnoj rešetki γ -željeza. Maksimalna rastvorljivost ugljenika u γ -željezu iznosi 2,06% na temperaturi 1147 °C.



Slika 34. Mikrostruktura: a) ferita i b) austenita (uvećanje 500x)

Cementit (Fe_3C) je jedinjenje (karbid) željeza sa ugljenikom u kome je sadržaj ugljenika 6,67%.

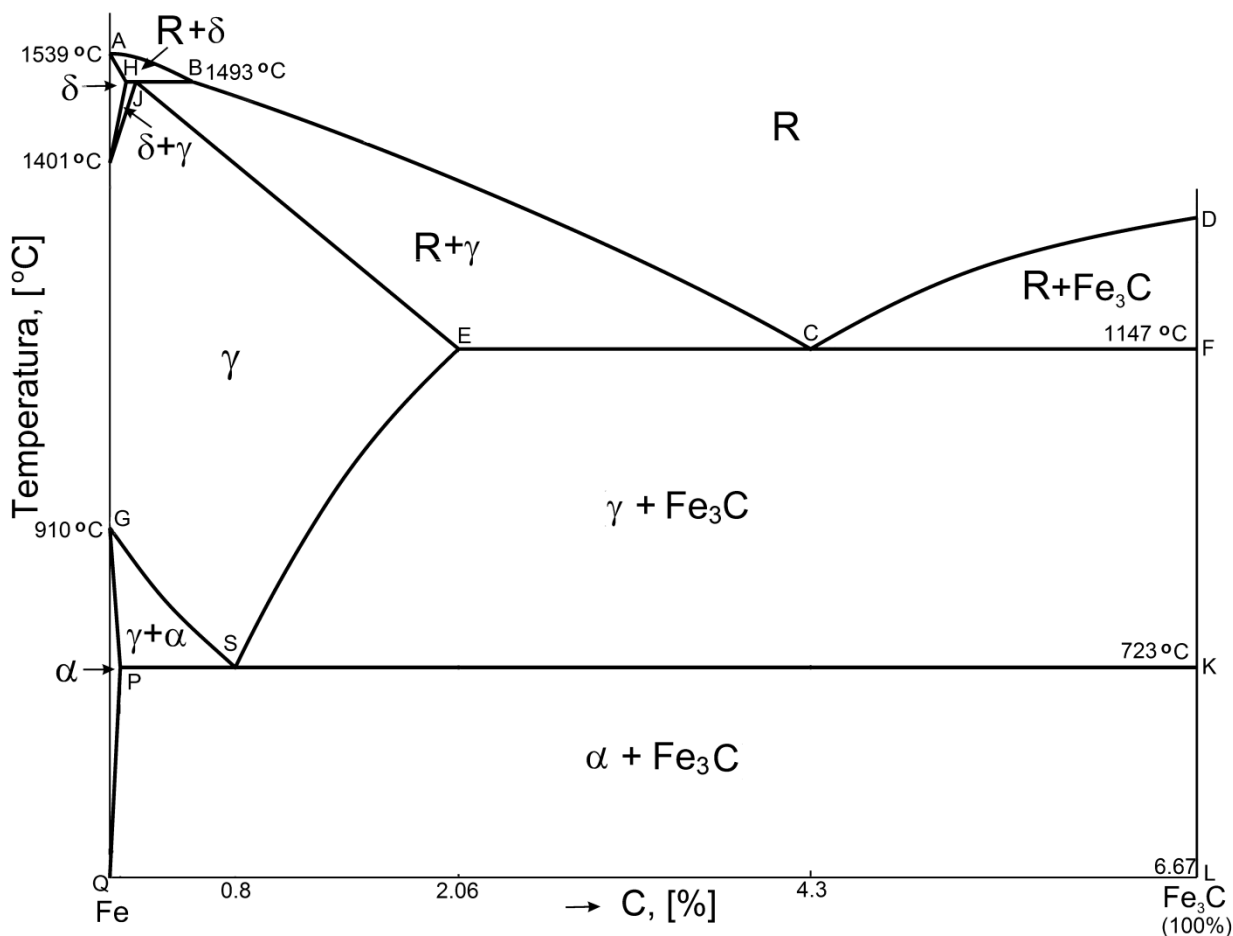
Grafit (C) koji se obrazuje u legurama Fe-C, praktično se veoma malo razlikuje od prirodnog grafitu. Rastvorljivost željeza u grafitu je zanemarljiva.

2. DIJAGRAM STANJA Fe – Fe_3C (metastabilna ravnoteža)

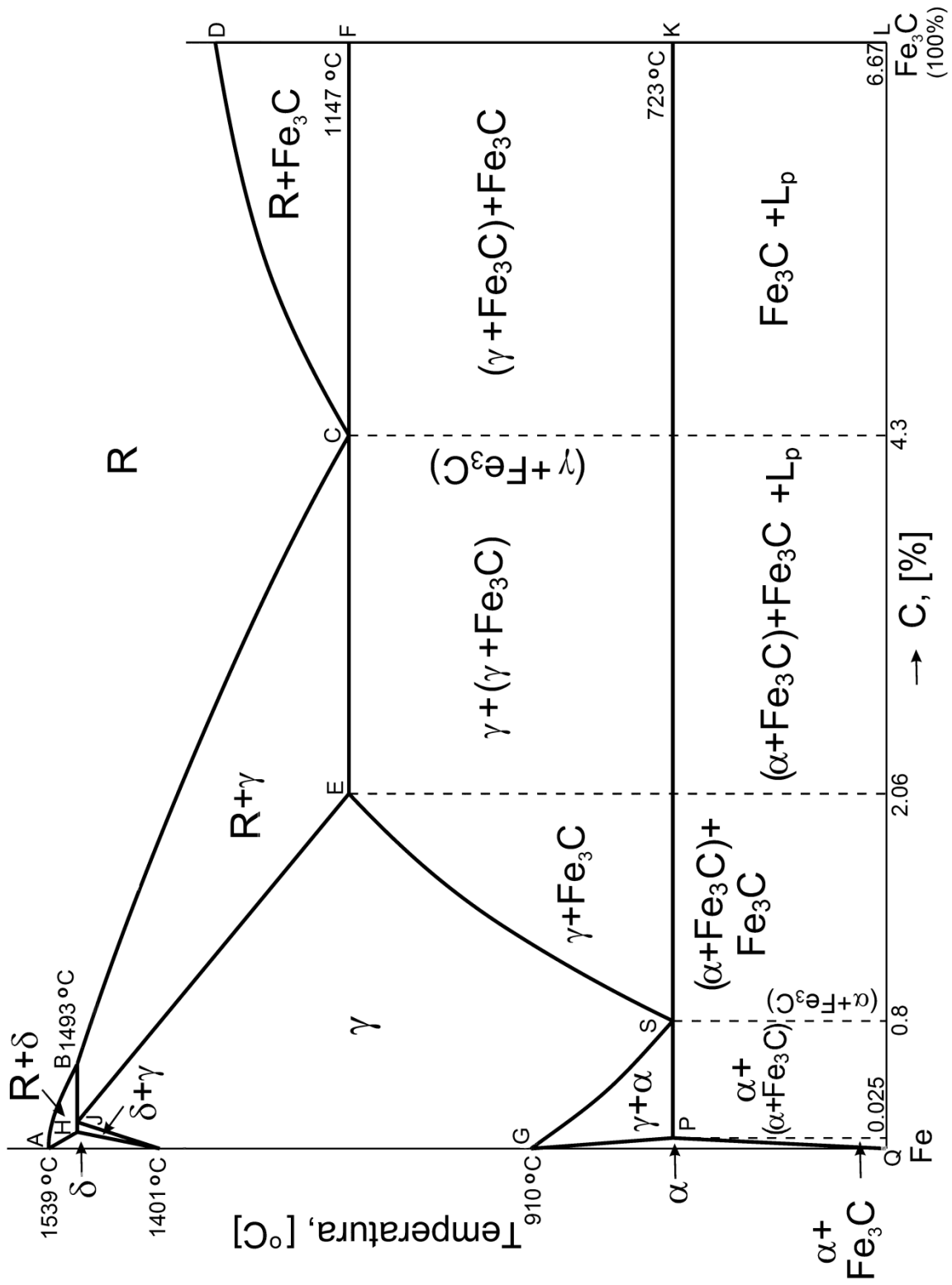
Dijagram stanja Fe- Fe_3C prikazan je na slikama 35a i 35b (35a – faze, 35b – mikrokonstituenti). Na dijagramu su prisutne sljedeće linije preobražaja:

- ABCD – likvidus linija;
- AHJECF – solidus linija;
- HJB – linija peritektičke reakcije;
- ECF – linija eutektičke reakcije;
- PSK – linija eutektoidne reakcije;
- GS – linija početka izdvajanja proeutektoidnog ferita;
- GPS – linija završetka izdvajanja proeutektoidnog ferita;
- ES – linija granične rastvorljivosti ugljenika u austenitu (solvus linija);
- PQ – linija granične rastvorljivosti ugljenika u feritu (solvus linija).

Sadržaj ugljenika (mas.%) u pojedinim kritičnim tačkama stanja sistema Fe- Fe_3C iznosi: H - 0,1; J - 0,16; B - 0,51; E - 2,06; C - 4,3; P - 0,025; S - 0,8; Q - 0,006 i L - 6,67.



Slika 35a. Dijagram stanja metastabilnog sistema Fe- Fe_3C - faze



Slika 35b. Dijagram stanja metastabilnog sistema Fe-Fe₃C - mikrokonstituenti

Za sistem Fe-Fe₃C karakteristične su tri izotermalne reakcije (transformacije):

- *Peritektička* (linija HJB) – $R_B + \delta_H \xrightarrow{1493^\circ\text{C}} \gamma_J$;
- *Eutektička* (linija ECF) – $R_C \xrightarrow{1147^\circ\text{C}} (\gamma_E + Fe_3C)$;
- *Eutektoidna* (linija PSK) – $\gamma_S \xrightarrow{723^\circ\text{C}} (\alpha_P + Fe_3C)$.

Pri *peritektičkoj reakciji* iz rastopa i δ -čvrstog rastvora obrazuje se austenit.

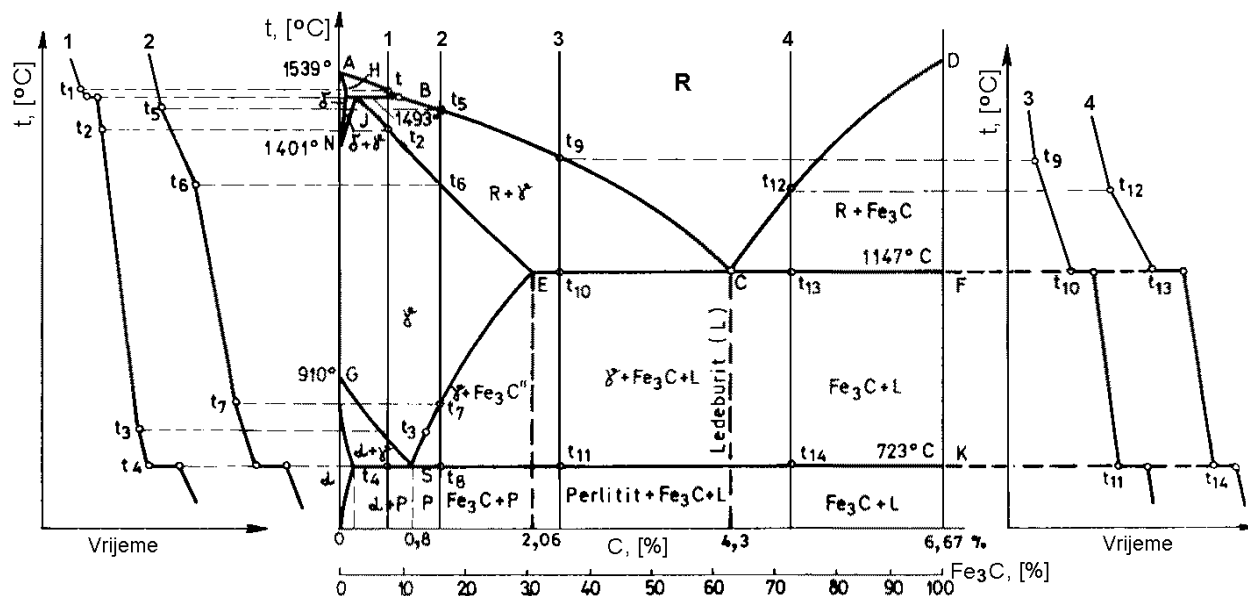
Kao rezultat *eutektičke reakcije* iz rastopa obrazuje se *eutektička smješa* austenita i cementita, koja se zove *ledeburit*.

Pri eutektoidnoj reakciji iz čvrstog rastvora austenita obrazuje se *eutektoidna smješa* ferita i cementita, koja se zove *perlit*.

2.1 Kristalizacija legura sistema Fe-Fe₃C

Kao rezultat primarne kristalizacije legura sistema Fe-Fe₃C javljaju se primarni kristali: δ -ferita, austenita i primarnog cementita (Slika 36).

Legure, koje sadrže do 0,51% C (tačka B), počinju kristalizaciju izdvajanjem primarnih kristala δ -ferita. U toku primarne kristalizacije sastav kristala δ -ferita mijenja se u skladu sa tokom solidus krive AH, uz istovremenu promjenu sastava rastopa, u skladu sa tokom likvidus krive AB. Na peritektičkoj temperaturi, rastop ima sastav dat tačkom B (0,51% C), a δ -ferit ima sastav dat tačkom H (0,1% C). Na peritektičkoj temperaturi (1493 °C) odigrava se peritektička reakcija, a kao njen rezultat nastaje γ čvrsti rastvor austenit.



Slika 36. Dijagram stanja stanja Fe-Fe₃C sa krivim hlađenja karakterističnih legura

Kod legura, čiji je sastav u granicama između koncentracijskih tački H i J, u toku peritektičke reakcije u višku se nalaze kristali δ -ferita, koji se transformišu u austenit.

Legure, čiji se sastav nalazi u granicama između tačaka J i B (legura 1), završavaju primarnu kristalizaciju peritektičkom reakcijom uz višak rastopa, koji se u toku daljeg hlađenja transformišu u austenit.

Legure, čiji sastav se nalazi u koncentracijskom intervalu definisanom između tačaka B i C, kristalizaciju počinju izdvajanjem primarnog austenita (legure 2 i 3). Ove legure primarnu kristalizaciju završavaju izdvajanjem austenita čiji se sastav mijenja u skladu sa tokom solidus

krive JE, uz jednovremenu izmjenu sastava rastopa u skladu sa tokom likvidus krive BC.

Legure sastava između tačaka E i C, kristalizaciju počinju izdvajanjem primarnih kristala austenita, a završavaju je eutektičkim preobražajem uz izdvajanje eutektikuma *ledeburita*. U toku primarne kristalizacije ovih legura, kristali austenita mijenjaju svoj sastav u skladu sa tokom solidus linije, koji na eutektičkoj temperaturi (1147 °C) odgovara sastavu datom tačkom E (2,06% C). Primarna kristalizacija se završava eutektičkom reakcijom, tj. iz rastopa se izdvaja eutektikum ledeburit. Kod ove grupe legura (podeutektičke legure), poslije primarne kristalizacije u strukturi se nalaze primarni kristali austenita (γ) i ledeburita ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$).

Legura sastava, koji odgovara tački C (4,3% C), primarnu kristalizaciju počinju i završavaju izdvajanjem eutektikuma ledeburita.

Legure koje sadrže više od 4,3% C, primarnu kristalizaciju počinju izdvajanjem primarnog cementita (Fe_3C) u temperaturnom intervalu u kome egzistira dvofazna oblast ($\text{R} + \text{Fe}_3\text{C}$). Na eutektičkoj temperaturi (1147 °C), iz preostalog rastopa, eutektičkom reakcijom izdvaja se eutektikum ledeburit. Prema tome, u strukturi nadeutektičkih legura, poslije primarne kristalizacije, nalaze se primarni igličasti kristali cementita smješteni u ledeburitnoj osnovi.

Sve legure iz sistema Fe- Fe_3C s obzirom na strukturu, osobine i primjenu, dijele se na:

- **čelike** – legure željeza i ugljenika, sa sadržajem ugljenika do 2,06%. Odnosno, čelici su legure koje primarnu kristalizaciju završavaju bez eutektičke reakcije.
- **gvožđa** – legure željeza i ugljenika sa sadržajem ugljenika od 2,06% do 6,67%. Odnosno, gvožđa su legure, čija se primarna kristalizacija završava eutektičkim preobražajem.

2.2 Struktura čelika

Neposredno nakon očvršćavanja, čelici sa sadržajem do 0,1% C, u strukturi imaju kristale δ -ferita. Čelici sa sadržajem od 0,1÷0,16% C, nakon očvršćavanja u strukturi imaju kristale δ -ferita i austenita, dok čelici sa sadržajem od 0,16÷2,06% C, poslije primarne kristalizacije u strukturi imaju kristale austenita. Kao rezultat preobražaja $\delta \rightarrow \gamma$ koji se odigrava u temperaturnom intervalu od 1493÷1401 °C, strukturu čelika sa sadržajem do 0,16% C karakterišu dendritni kristali austenita.

Strukturu čelika, sa sadržajem do 0,025% C (tačka P) čine zrna ferita, po čijim granicama se usljed pada temperature i smanjena rastvorljivosti ugljenika u α -feritu, izlučuje tercijalni cementit. Tercijalni cementit izlučen po granicama zrna, povećava krtoš i smanjuje plastičnost čelika.

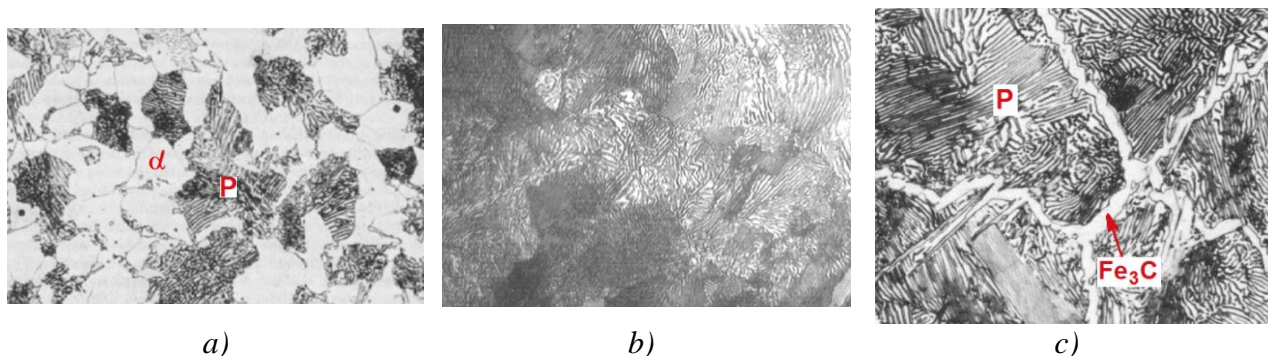
Čelici, koji sadrže od 0,025÷0,8% C, nazivaju se *podeutektoidnim čelicima*. Nakon primarne kristalizacije, strukturu ovih čelika čine dendritni kristali austenita. Hlađenjem ovih čelika, na liniji faze transformacije GS, dolazi do početka transformacije austenita u ferit ($\gamma \rightarrow \alpha$). Izdvajanje proeutektoidnog ferita odvija se u temperaturnom intervalu 910÷723 °C. Na eutektoidnoj temperaturi austenit sastava 0,8% C (tačka S) eutektoidno se razlaže na smještu ferita i cementita, gradeći mikrokonstituent *perlit* ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$).

Prema tome, nakon završetka eutektoidne reakcije, struktura podeutektoidnih čelika sastoji se iz proeutektoidnog ferita i perlita ($\alpha + (\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$) (Slika 37a). Pri hlađenju ispod eutektoidne temperature, po liniji PQ, iz ferita izdvaja se tercijalni cementit, koga je teško metalografski identifikovati, jer se izdvaja u veoma disperznom obliku na lamelama eutektoidnog cementita, kao i po granicama zrna.

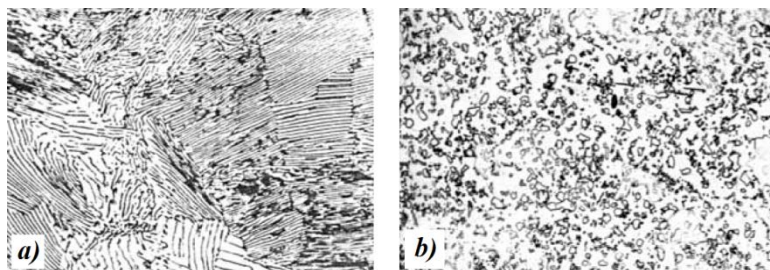
Količina proeutektoidnog ferita i perlita zavisi od sadržaja ugljenika u čeliku, kao i od brzine hlađenja. Ukoliko je sadržaj ugljenika veći utoliko je sadržaj perlita veći i obrnuto. Tako je, pri sadržaju ugljenika u čeliku od 0,025% (tačka P), struktura čisto feritna, dok je pri sadržaju ugljenika u čeliku od 0,8%, struktura čisto perlitna ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) (Slika 37b).

Ako u mikrostrukturi preovladava ferit, on se izdvaja u obliku krupnih zrna, između kojih se javljaju ostrvca perlita. Ako u strukturi preovladava perlit (0,65÷0,70% C) tada se proeutektoidni ferit izdvaja u obliku mreže oko perlitnih zrna. Čelik, koji sadrži 0,8% C naziva se

eutektoidni čelik i ima čistu perlitnu strukturu. Struktura perlita sastoji se iz feritne osnove i cementita u vidu lamela (pločica) – *lamelarni perlit* (Slike 37b, 38a). Osim lamelarnog perlita, može da se formira zrnasti perlit (Slika 38b), ako se izvede odgovarajuća termička obrada. Zrnasti perlit ima veću plastičnost, a manju tvrdoću od lamelarnog perlita.



Slika 37. Struktura ugljeničnih čelika: a) sa 0,4% C, ferit+perlit (uvećanje 500x); b) sa 0,8% C, perlit (uvećanje 500x); c) sa 1,25% C, perlit+cementit (uvećanje 1000x)



Slika 38. Mikrostruktura a) lamelarnog perlita i b) zrnastog perlita (uvećanje 500x)

Čelici, koji sadrže od 0,8 do 2,06% C nazivaju se *nadeutektoidni čelici*. Poslije primarne kristalizacije, struktura ovih čelika je, kao što je već rečeno, austenitna. Hlađenjem ovih čelika, po liniji ES, koja predstavlja liniju granične rastvorljivosti ugljenika u γ -željezu, počinje izdvajanje sekundarnog cementita. Sekundarni cementit izdvaja se u temperaturnom intervalu od $1147 \div 723$ °C (linija ES). Na 723 °C, sadržaj ugljenika u austenitu (0,8% C) odgovara eutektoidnom sadržaju, pa se iz austenita na ovoj temperaturi eutektoidnom reakcijom obrazuje perlit.

Hlađenjem čelika ispod eutektoidne temperature, iz eutektoidnog ferita izdvaja se tercijalni cementit, koga je metalografski teško identifikovati. Prema tome, mikrostruktura nadeutektoidnih čelika sastoji se iz perlita i sekundarnog cementita ($(\alpha + \text{Fe}_3\text{C}) + \text{Fe}_3\text{C}$), koji se izdvaja po granicama perlitnih zrna u obliku mreže (Slika 37c).

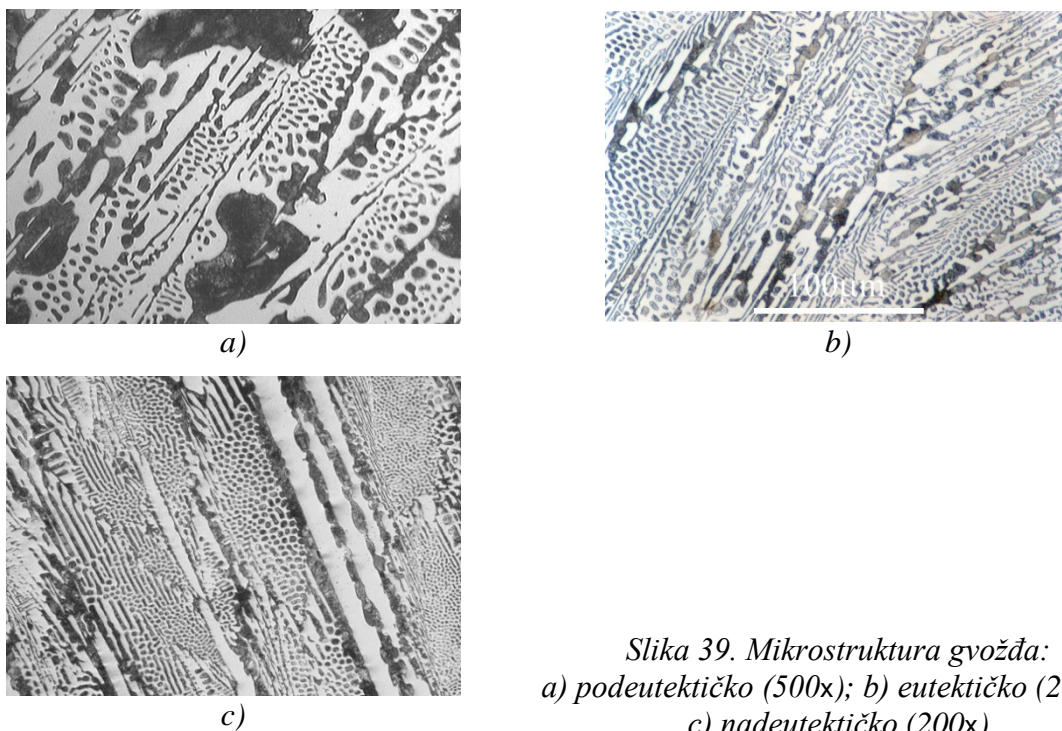
2.3 Struktura gvožđa

Nakon završetka očvršćavanja, kao što je već rečeno, struktura gvožđa (sadržaj C od $2,06 \div 6,67\%$ C), sastoji iz dva mikrokonstituenta, i to iz primarnih kristala austenita (γ) ili cementita (Fe_3C) i ledeburita ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$). Sa padom temperature, rastvorljivost ugljenika u austenitu opada po liniji ES, tako da na eutektoidnoj temperaturi sadržaj ugljenika u austenitu iznosi 0,8% (tačka S). Pošto je sadržaj ugljenika u austenitu maksimalan na eutektičkoj temperaturi, hlađenjem gvožđa, višak ugljenika izdvaja se u obliku sekundarnog cementita. Austenit eutektoidnog sastava se na eutektoidnoj temperaturi razlaže na eutektoidnu smjesu ferita i cementita (perlit). Iz ferita, koji se nalazi u perlitu, se daljim hlađenjem gvožđa, po solvus liniji PQ, izdvaja tercijalni cementit, koji se pod mikroskopom veoma teško identifikuje, jer se izdvaja na već prethodno izdvojenom sekundarnom i eutektoidnom cementitu.

Prema tome, u strukturi gvožđa na sobnoj temperaturi, u zavisnosti od sastava, mogu se javiti sljedeći mikrokonstituenti (Slika 38):

- *podeuteklička gvožđa* (2,06÷4,3% C) – perlil + ledeburit (perlit+Fe₃C) + sekundarni Fe₃C;
- *euteklička gvožđa* (4,3% C) – ledeburit (perlit+Fe₃C);
- *nadeuteklička gvožđa* (4,3÷6,67% C) – primarni Fe₃C + ledeburit (perlit+Fe₃C)

Iz navedenog se može zaključiti da legure željeza sa ugljenikom, nakon završetka kristalizacije, imaju veoma različite mikrokonstituente, dok se kod svih legura, na temperaturama nižim od eutektoidne (723 °C), u strukturi javljaju samo dvije faze i to ferit i cementit.



Slika 39. Mikrostruktura gvožđa:
 a) *podeutekličko* (500x); b) *eutekličko* (200x) i
 c) *nadeutekličko* (200x)

2.4 Neravnotežne strukture ugljeničnih čelika

Termička obrada čelika sastoji se u njihovom zagrijavanju na različitim temperaturama i hlađenju sa tih temperatura različitim brzinama. Pri tome se dobijaju različita fazna stanja i strukture, a kao posledica toga nastaje promjena njihovih osobina. Zbog toga se mora uzeti u obzir uticaj temperature i vremena preobražaja na strukturu čelika.

Povećanjem brzine hlađenja, moguće je u toj mjeri podhladiti austenit, da nastanu nove metastabilne faze koje nije moguće prikazati na ravnotežnim dijagramima stanja. Tako npr. pothlađenjem eutektoidnog čelika (0,8% C), iz austenitne oblasti ($T > 723\text{ °C}$), do temperature 500 °C dobija se perlitna struktura koja za razliku od ravnotežne ima tanje lamele i manje rastojanje između njih. Perlit sa finim lamelama naziva se *sorbit*, a sa veoma sitnim *trustit*.

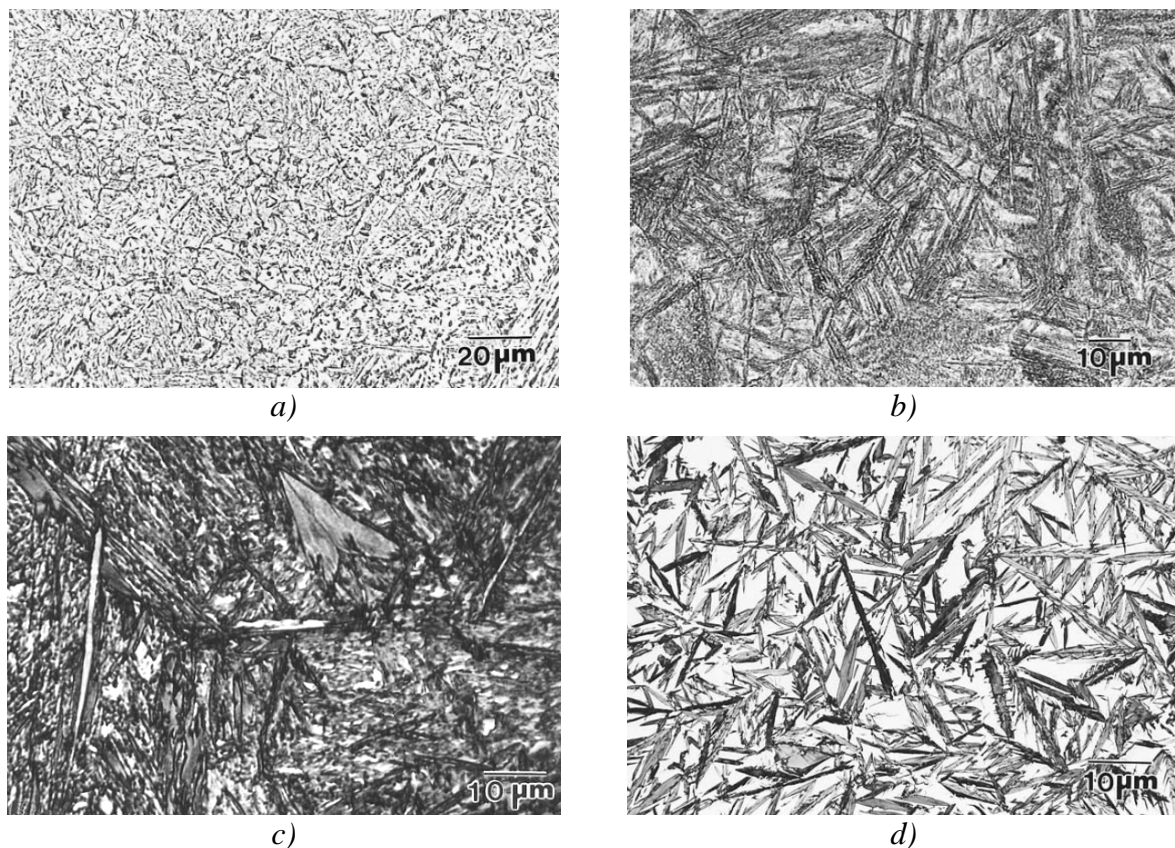
Pri pothlađenju od 500÷230 °C formira se tzv. *beinitna* struktura. *Beinit* kao i perlit sastoji se iz ferita i cementita, ali ima drugačiju građu. Razlikuju se struktura *gornjeg* (Slika 40a) i *donjeg beinita* (Slika 40b). Gornji beinit obrazuje se u temperaturnom intervalu pothlađenja 500÷350 °C i ima perjastu građu, a donji u intervalu 350÷230 °C i ima igličastu građu.

Pothlađenjem austenita ispod 230 °C, sprečava se njegov difuzioni raspad, a alotropski preobražaj se odigrava bez promjene sastava. Taj preobražaj odigrava se tzv. *martenzitnim* putem, a to znači bez učešća difuzije, odnosno premještanjem većih djelova rešetke. Atomi ugljenika ostaju u presićenom α -čvrstom rastvoru željeza usljed čega se rešetka napreže i dobija

tretragonalni oblik. Kao rezultat martenzitnog preobražaja u čeliku se obrazuje struktura koja se naziva *martenzit* (Slika 40c). *Martenzit je presičeni čvrsti rastvor ugljenika u α -željezu, tetragonalne prostorno centrirane rešetke.*

Nastanak *martenzita* vezan je za velike brzine hlađenja odnosno veliko pothlađenje, što znači da se *martenzit* stvara trenutno u određenoj količini i određene disperznosti. Treba naglasiti da prema ravnotežnom dijagramu stanja Fe-Fe₃C, granični sadržaj ugljenika u α -fazi iznosi 0,025%, dok se taj sadržaj u *martenzitu* kreće i do 2,06%. Prema tome, sadržaj ugljenika u *martenzitu* je isti kao i u *austenitu* iz kojeg je obrazovan. Zbog toga se *martenzit* u čeliku ne javlja kao stabilna faza, već teži razlaganju, naročito pri zagrijavanju.

Kao po pravilu, *martenzitni* preobražaj se, čak ni pri vrlo velikim pothlađenjima ne odigrava do kraja, pa se uporedo sa *martenzitom* u strukturi javlja i određena količina tzv. *zaostalog austenita* (Slika 40d).

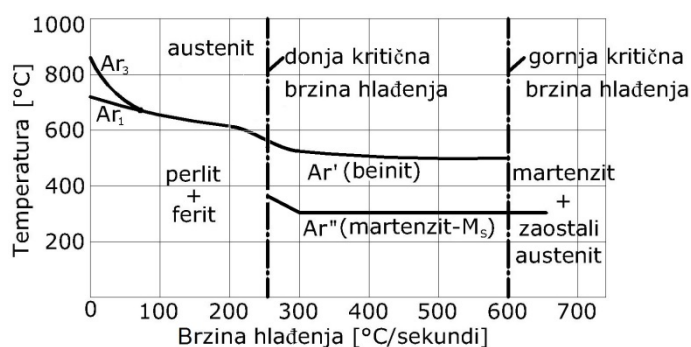


Slika 40. Mikrostrukture čelika dobijene u neravnotežnim uslovima: a) gornji beinit (500x); b) donji beinit (800x); c) martenzit (1000x) i d) martenzit + zaostali austenit (1000x)

Pregledan prikaz razlaganja austenita pri različitim brzinama hlađenja, za čelik sa 0,45% C, dat je na slici 41. Temperaturna osa predstavlja hlađenje u ravnotežnim uslovima. Pri malim brzinama hlađenja, izdvajanje proeutektoidnog ferita počinje na liniji Ar₃, a završava se na liniji Ar₁. Pri Ar₁ temperaturi odigrava se eutektoidni preobražaj. Dobijena struktura je bliska ravnotežnoj i sastoji se iz proeutektoidnog ferita i grubo lamelnog perlita. Hlađenjem datog čelika na vazduhu sa temperature homogenizacije, dobija se, takođe feritno-perlitna struktura, sa disperznijim lamelama perlita.

Daljim povećanjem brzine hlađenja izdvaja se sve manja količina proeutektoidnog ferita, pri čemu se njegov oblik mijenja od zrnastog u trakasti, koji se raspoređuje po granicama zrna. Pri brzinama hlađenja pri kojima dolazi do preklapanja tačaka preobražaja Ar₃ i Ar₁ u potpunosti je potisnuto izdvajanje proeutektoidnog ferita. Struktura je perlitna, odnosno perlitno sorbitna. Daljim povećanjem brzine hlađenja, Ar₁ temperatura se snižava (u početku sporije a zatim

naglo). Dio pothlađenog austenita se transformiše u izvanredno finu smještu ferita i cementita (tačka Ar').



Slika 41. Uticaj brzine hlađenja na tempereturu faznih transformacija kod čelika sa 0,45% C

Pri daljem povećanju brzine hlađenja javlja se nagla promjena u strukturi. Pored trustita, javlja se i martenzit, koji nastaje na oko 300 °C (Ar'' ili Ms), pa se struktura sastoji iz trustita i martenzita. Brzina pri kojoj počinje izdvajanje martenzita naziva se donja kritična brzina hlađenja. Brzina hlađenja pri kojoj se u strukturi javlja samo martenzit, naziva se gornja kritična brzina hlađenja. Transformacija austenita pri ovim brzinama hlađenja počinje, ali se ne završava u perlitnoj oblasti. Preostali austenit je relativno slabilan i odmah po dostizanju martenzitne tačke Ar'' (Ms) transformiše se grupnim pomjeranjem atoma u martenzit. Ako se poveća brzina hlađenja, jedino se mijenja količinski odnos trustita i martenzita, dok se temperature transformacija ne mijenjaju.

2.5 Legirani čelici

Legirani čelici su čelici kod kojih veliki uticaj na osobine imaju legirajući elementi. Pod legirajućim elementima, podrazumijevaju se oni elementi, koji se namjerno dodaju u cilju poboljšanja postojećih osobina ili postizanja specijalnih osobina, koje ugljenični čelici nemaju.

Ako je sadržaj pojedinih elemenata u čeliku ispod granice utvrđene standardom, onda se ne smatraju legirajućim elementima već primjesama. Sadržaj pri kome se neki element smatra legirajućim, definiše se uticajem tog elementa na strukturu i osobine čelika.

Prema načinu kao reaguju sa ugljenikom legirajući elementi se dijele na tri grupe:

- Elementi koji ne obrazuju karbide – Si, Cu.
- Elementi koji obrazuju nepostojane karbide – Co, Ni i dr.
- Elementi koji obrazuju stabilne karbide – Cr, W, V, Ti, Mn, itd.

Legirajući elementi, po pravilu pomjeraju S i E tačku ravnotežnog dijagrama stanja Fe-Fe₃C u lijevo, tj. na stranu manje koncentracije ugljenika.

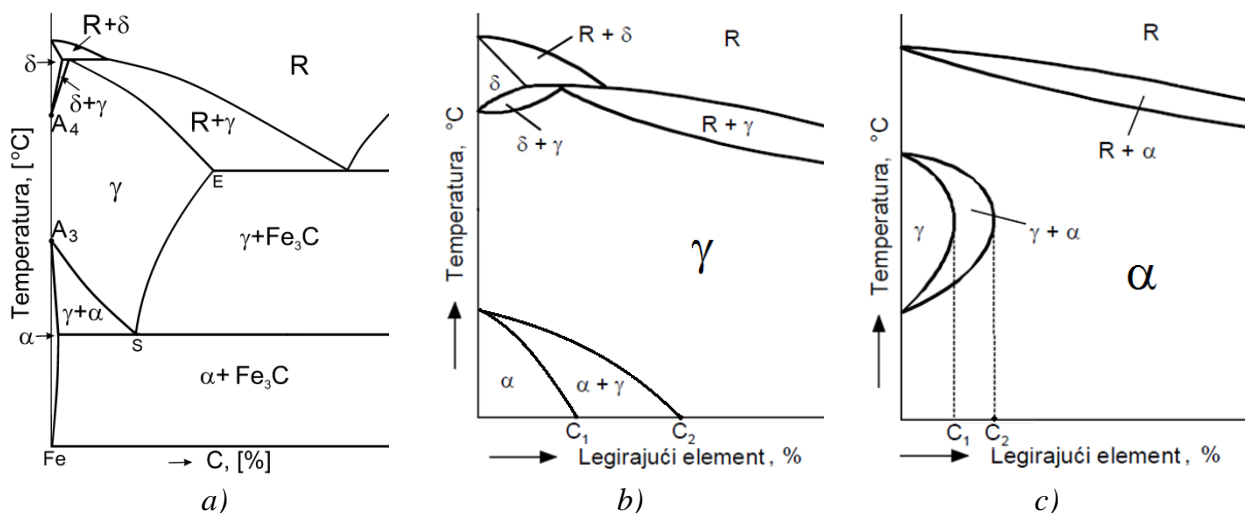
Svi elementi koji se rastvaraju u željezu, utiču na temperaturni interval postojanosti njegovih alotropskih modifikacija, odnosno pomjeraju tačke A₃ (910 °C) i A₄ (1401 °C).

Legirajući elementi, koji se ne rastvaraju u željezu, ne mogu mijenjati temperature njegovih alotropskih preobražaja.

Prema uticaju na temperaturnu oblast postojanosti alotropskih modifikacija, svi legirajući elementi mogu se podijeliti u dvije grupe. U prvu grupu spadaju elementi koji proširuju oblast postojanosti austenita i nazivaju se *austenito-obrazujućim elementima* ili *γ-stabilizatorima*. U drugu grupu spadaju elementi koji sužavaju područje austenita, a proširuju oblast ferita, pa se nazivaju *ferito-obrazujućim elementima* ili *α-stabilizatorima*.

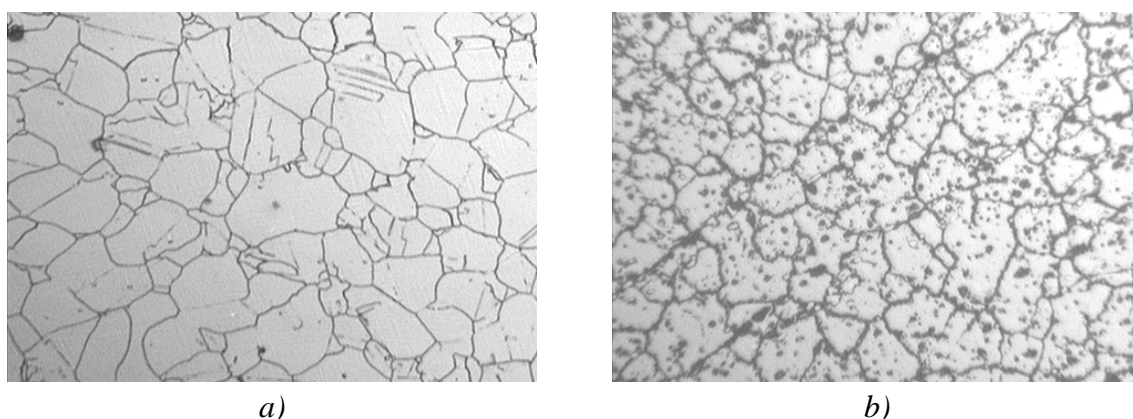
U austenito-obrazujuće elemente ubrajaju se oni elementi koji se veoma dobro ili u potpunosti rastvaraju u γ-željezu. Tu spadaju, pored C i N koji grade intersticijske čvrste rastvore i metali Mn, Ni, Co i dr. koji obrazuju supstitucijske čvrste rastvore. Ovi elementi pomjeraju

tačku A_4 (preobražaj $\delta \rightarrow \gamma$) ka višim, a tačku A_3 (preobražaj $\gamma \rightarrow \alpha$) ka nižim temperaturama (Slika 42b). Time se proširuje oblast postojanosti austenita, a sužava oblast postojanosti ferita. Pri nekom graničnom sadržaju (tačka C_2 na slici 42b), potiskuje se fazni preobražaj $\alpha \rightarrow \gamma$, čelik ima austenitnu strukturu pri svim temperaturama, a na dijagramu se to vidi kao otvoreno γ -područje. Čelici koji od sobne do temperature topljenja imaju strukturu od austenita ili austenita i karbida legirajućih elemenata nazivaju se austenitni čelici (Slika 43a).



Slika 42. Tipski ravnotežni dijagram stanja: a) Fe-Fe₃C; b) otvoreno γ -područje i c) zatvoreno γ -područje

U ferito obrazujuće elemente spadaju oni elementi koji se veoma dobro, ili u potpunosti rastvaraju u α -željezu (Cr, W, Mo, V, Al, Si i dr.). Ovi elementi pomjeraju tačku A_4 ka nižim, a tačku A_3 ka višim temperaturama, sužavajući oblast postojanosti austenita, a proširujući oblast postojanosti ferita. Oni elementi koji se u potpunosti rastvaraju u α -željezu (Cr, Mo, Al, Si), pri određenom graničnom sadržaju (tačka C_2 na slici 42c) sasvim potiskuju $\gamma \rightarrow \alpha$ transformaciju. Tada čelik, pri svim temperaturama ima feritnu strukturu, a na dijagramu se to vidi kao zatvoreno γ -područje. Čelici koji od sobne do temperature topljenja u strukturi imaju ferit ili ferit i karbide legirajućih elemenata nazivaju se feritni čelici (Slika 43b).



Slika 43. Mikrostrukture legiranih čelika: a) austenitnog i b) feritnog

2.5.1 Klasifikacija čegiranih čelika

Klasifikacija legiranih čelika vrši se prema tipu i sadržaju legirajućih elemenata. Legirani čelici dijele se na niskolegirane i visokolegirane. Niskolegirani čelici su oni, kod kojih sadržaj legirajućih elemenata ne prelazi 5%, dok su visokolegirani čelici oni, kod kojih je sadržaj

legirajućih elemenata veći od 5%.

Prema *ravnotežnoj strukturi* čelici se mogu svrstati u sljedeće grupe:

1. *Podeutektoidni čelici*, koji u strukturi imaju podeutektoidni ferit.
2. *Eutektoidni čelici*, koji u strukturi imaju perlit.
3. *Nadeutektoidni čelici*, koji u strukturi imaju proeutektoidne karbide.
4. *Lebeburitni čelici*, koji u strukturi imaju primarne karbide izdvojene iz rastopa u livenom stanju. Primarni karbidi zajedno sa austenitom, obrazuju ledeburitni eutektikum, koji se pri kovanju ili valjanju raspada na karbide i austenit.
5. *Feritni čelici* su legirani čelici koji u strukturi imaju ferit ili ferit i karbide, od sobne temperature do temperature topljenja.
6. *Austenitni čelici*, koji u strukturi imaju austenit ili austenita i karbide, od sobne temperature do temperature topljenja.

Prema *neravnotežnoj strukturi*, dobijenoj poslije hlađenja na mirnom vazduhu, čelici se mogu svrstati u tri osnovne grupe: *perlitni*, *martenzitni* i *austenitni čelici*.

U čelike perlitnog tipa, pored ugljeničnih čelika, spadaju i legirani čelici sa malim sadržajem legirajućih elemenata. Martenzitni čelici imaju veći sadržaj legirajućih elemenata, dok je sadržaj legirajućih elemenata kod austenitnih čelika najveći. Podjela čelika na ove tri grupe je vezana za kinetiku fazne transformacije austenita. Dobijanje tri grupe čelika, uslovljeno je time, što sa povećanjem sadržaja legirajućih elemenata, raste stabilnost austenita u perlilnoj oblasti, dok se istovremeno temperatura austenitno-martenzitnog preobražaja snižava.

Mora se naglasiti da je ova podjela jako uslovna i važi samo uz određene pretpostavke. Mijenjajući uslove hlađenja mogu se dobiti razne strukture. Tako pri izuzetno brzom hlađenju perlitnog čelika može se dobiti martenzitna struktura, a pri veoma laganom hlađenju čelika martenzitnog tipa, može se odigrati perlitni preobražaj.

Prema sastavu, legirani čelici se mogu klasifikovati na: *niklove*, *hromove*, *hrom-niklove*, *hrom-nikl-molibdenove* i sl.

Prema namjeni, čelici se mogu podijeliti na: *konstrukcione*, *alatne* i *čelike sa specifičnim osobinama*.

Konstrukcioni čelici se koriste za izradu mašinskih elemenata. Po pravilu se podvrgavaju termičkoj obradi i dijele se na *čelike za cementaciju* i *čelike za poboljšanje*.

Alatni čelici koriste se za izradu raznih mjernih i alata za procesne tehnologije. Za izradu alata koriste se *ugljenični*, *legirani* i *brzorezni čelici*.

Čelici sa specifičnim osobinama su oni čelici, kod kojih je neka od osobina posebno izražena, pa se razlikuju: *nerđajući*, *vatrootporni*, *čelici sa posebnim magnetnim i električnim osobinama*, itd. U nizu slučajeva ovi čelici sadrže toliko legirajućih elemenata, da ih je teško smatrati čelicima, već složenim višekomponentnim legurama.

2.6 Označavanje čelika JUS standardu

Oznaka čelika po JUS-u se sastoji iz tri dijela i to:

- Č. XXXX. XX**
- 1) *Slovna oznaka* „Č“ označava materijal, tj. čelik;
 - 2) *Osnovna oznaka* sastoji se od četiri brojana simbola koji označavaju vrstu čelika;
 - 3) *Dopunska oznaka* sastoji se od jednog ili dva brojana simbola, označava stanje čelika.

Po potrebi, može se izostaviti dopunska oznaka.

Prema osnovnoj oznaci razlikuju se dvije grupe čelika, i to:

- *čelici sa negarantovanim sastavom*,
- *čelici sa garantovanim sastavom*.

2.6.1 Čelici sa negarantovanim sastavom

U ovu grupu spadaju ugljenični čelici trgovačkog kvaliteta, ugljenični čelici sa propisanim mehaničkim osobinama i bez propisanog hemijskog sastava, ali sa propisanim sadržajem fosfora, sumpora i ponekad sa propisanim sadržajem nekog od elemenata.

Simboli osnovne oznake za ovu grupu su:

- a) simbol na prvom mjestu je uvijek „0” (nula) i označava pripadnost čelika ovoj grupi;
- b) simbol na drugom mjestu označava grupu minimalne zatezne čvrstoće i to:
 - 0 – označava čelik bez propisanih mehaničkih osobina,
 - 1 – označava čelik nazivne zatezne čvrstoće od 330 MPa;
 - 2 – označava čelik nazivne zatezne čvrstoće od 340÷360 MPa;
 - 3 – označava čelik nazivne zatezne čvrstoće od 370÷390 MPa;
 - 4 – označava čelik nazivne zatezne čvrstoće od 400÷490 MPa;
 - 5 – označava čelik nazivne zatezne čvrstoće od 500÷590 MPa;
 - 6 – označava čelik nazivne zatezne čvrstoće od 600÷690 MPa;
 - 7 – označava čelik nazivne zatezne čvrstoće preko 700 MPa.
- c) simbol na trećem i četvrtom mjestu predstavlja redni broj čelika i to:
 - 0÷44 ugljenični čelici sa negarantovanim čistoćom i čelici trgovačkog kvaliteta;
 - 45÷89 ugljenični čelici sa garantovanim čistoćom i sa garantovanim sadržajem pojedinih elemenata;
 - 90÷99 slobodno (npr. čelici za automate).

Primjer: Oznaka Č.0745 kazuje da se radi o čeliku negarantovanog hemijskog sastava (0), nazivne zatezne čvrstoće preko 700 MPa i garantovane čistoće (max. 0,06% S i max. 0,06% P).

2.6.2 Čelici sa garantovanim sastavom

U ovu grupu spadaju:

1. Ugljenični konstrukcioni čelici sa garantovanim hemijskim sastavom;
2. Kvalitetni i plemeniti ugljenični čelici sa propisanim hemijskim sastavom, koji se prije upotrebe podvrgavaju termičkoj obradi;
3. Legirani čelici, koji sadrže jedan ili više legirajućih elemenata u količinama većim od navedenih u tabela 3.

Tabela 3. Sadržaj elemenata iznad kojih se čelici smatraju legiranim

Element	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	Co	Ti	Cu	Al
(%), > od	0,60	0,80	0,20	0,30	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Simbol na prvom mjestu kod ugljeničnih čelika sa propisanim hemijskim sastavom je uvijek „1” i označava pripadnost ovoj grupi čelika.

Simbol na prvom mjestu kod legiranih čelika označava redni broj najuticajnijeg legirajućeg elementa. Legirajući elementi prema faktoru uticaja prikazani su u tabeli 4.

Tabela 4. Redni broj legirajućih elemenata i faktor njihovog uticaja

Redni br. legiraj. elementa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ostali
Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	Co	Ti
Faktor uticaja	–	1	1	4	4	7	14	17	20	30

Pod najuticajnijim legirajućim elementom podrazumijeva se onaj element, čiji srednji sadržaj u procentima pomnožen sa faktorom njegovog uticaja ima najveću vrijednost. Ako kod

višestruko legiranih čelika, više legirajućih elemenata ima isti navedeni proizvod, najuticajnijim elementom smatra se onaj koji po navedenom redosledu nosi veći broj, a kao drugi uticajni element smatra se onaj koji nosi prvi manji broj.

Simbol na drugom mjestu kod legiranih čelika je redni broj drugog po redu uticajnog elementa, dok kod jednostruko legiranih čelika taj broj je 1. Simbol na drugom mjestu osnovne oznake, kod ugljeničnih čelika predstavlja desetstruku vrijednost maksimalnog procenta ugljenika pomnoženog sa deset. (Ako čelik sadrži 0,9% C, simbol na drugom mjestu je „9”).

Simboli na trećem i četvrtom mjestu predstavljaju redni broj čelika kako za ugljenične tako i za legirane čelike i to po sljedećoj konvenciji, od:

- 0÷19 ugljenični čelici sa propisanim sastavom i legirani koji nijesu namijenjeni termičkoj obradi;
- 20÷29 ugljenični i legirani čelici za cementaciju;
- 30÷39 ugljenični i legirani čelici za poboljšanje;
- 40÷49 ugljenični i legirani čelici za alate;
- 50÷59 visokolegirani čelici za alate;
- 60÷69 čelici sa naročitim fizičkim osobinama;
- 70÷79 vatrootporni i hemijski postojani čelici;
- 80÷89 slobodno (npr. brzorezni čelici);
- 90÷99 čelici za automate i ostali čelici.

Dopunska oznaka predstavlja stanje čelika sa jednim, odnosno dva brojana simbola prema konvenciji prikazanoj u tabela 5.

Tabela 5. Dopunska oznaka čelika

Brojčani simbol stanja	Stanje čelika
0	Bez određene termičke obrade
1	Meko žareno
2	Termički obrađeno na najbolju obradivost
2A	Termički obrađeno na određenu zateznu čvrstoću
2B	Termički obrađeno na feritno-perlitnu strukturu
2C	Obrađeno na sposobnost za sječenje u hladnom stanju
3	Normalizovano
4	Poboljšano
5	Hladno deformisano
6	Glodano ili brušeno
7÷8	Slobodno
9	Obrađeno po posebnim uputstvima

Dva brojana simbola mogu nastati samo kombinacijom brojčanih simbola kao, na primjer: vučeno i žareno stanje se označava dopunskom oznakom 51.

Dopunska oznaka se isključivo stavlja na poluproizvode (valjane i vučene) od čelika u isporučenom stanju. Znači ova oznaka se ne odnosi na gotove ugrađene djelove.

Primjer 1: Oznaka Č.1220.1, kazuje da se radi o ugljeničnom čeliku (1) sa sadržajem od 0,2% C ($0,2 \times 10 = 2$), namijenjenom za cementaciju (20), isporučen u meko žarenom stanju (1).

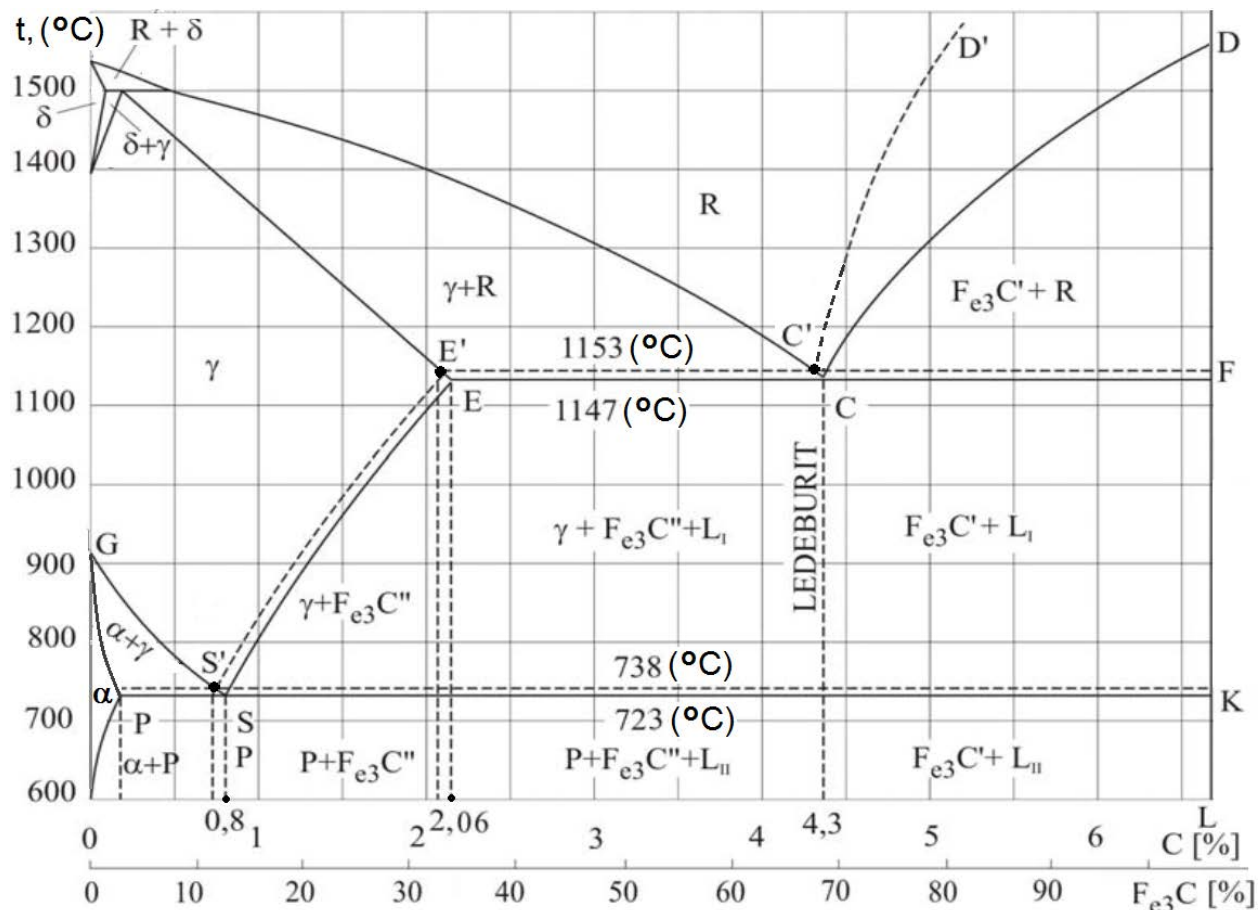
Primjer 2: Oznaka Č.4730, kazuje da se radi o čeliku, legiranom sa Cr (4) i Mo (7), (Cr je najuticajniji legirajući element jer je proizvod njegovog sastava i faktora uticaja najveći, dok je drugi po redu legirajući element Mo, čiji se proizvod iz sadržaja i faktora njegovog uticaja, po vrijednosti, nalazi odmah iza Cr), namijenjenom za poboljšanje (30).

2.7 Označavanje čelika po EN standardu – dato u Prilogu – 1 (stranica 70)

3. DIJAGRAM STANJA Fe–C (stabilna ravnoteža)

Obrazovanje stabilne faze grafita u sistemu Fe-C, može nastati kao rezultat neposrednog izdvajanja iz rastopa (odnosno čvrstog rastvora), kao i usljed razlaganja prethodno izdvojenog cementita. Proces obrazovanja grafita u gvožđu, naziva se grafitizacija.

Dijagram stanja sistema Fe-C prikazan je na slici 44 (isprekidane linije - odgovaraju izdvajanju grafita, a pune - cementita).



Slika 44. Dijagram stanja sistema Fe-C (isprekidane linije) i Fe-Fe₃C (pune linije)

U stabilnom sistemu na temperaturama koje odgovaraju likvidus liniji C'D', kristališe primarni grafit. Grafit, koji se obrazuje iz rastopa, raste iz jednog centra i grana se, obrazujući različite oblike tzv. *grafitne lamele*. Na eutektičkoj temperaturi od 1153 °C, iz rastopa čiji sastav odgovara projekciji tačke C' (4,25% C), obrazuje se grafitni eutektikum, koji se sastoji iz austenita, sastava datog tačkom E' (2,03% C) i grafita (100% C).

Pri daljem hlađenju usljed smanjenja rastvorljivosti ugljenika u austenitu, po liniji E'S', izdvaja se sekundarni grafit. Sa padom temperature od eutektičke (1153 °C) do eutektoidne (738 °C), sadržaj ugljenika u austenitu smanjuje se sa 2,03% (tačke E') na 0,69% (tačka S').

Iz austenita eutektoidnog sastava se na eutektoidnoj temperaturi obrazuje eutektoid sastavljen iz ferita i grafita. Na takav način dobija se feritno grafitna struktura gvožđa. Međutim, ovakva struktura može se dobiti samo u uslovima eksperimenta ili naknadnom termičkom obradom, jer se u praksi, eutektoidnom reakcijom, pored grafita redovno izdvaja i cementit, pa time i perlit. Ako se pri eutektoidnoj reakciji iz austenita izdvaja samo grafit, nastaje tzv. *sivo gvožđe*. Najveći dio grafita kod sivih gvožđa se izdvaja iz rastopa. Kombinacija grafita i cementita daje *polovno gvožđe*, a ako se izdvaja samo cementit, onda nastaje *bijelo gvožđe*.

3.1 Struktura gvožđa

Gvožđa su legure željeza i ugljenika, sa sadržajem od 2,06 do 6,67% C. Očvršćavanje završavaju eutektičkom reakcijom.

Gvožđa se razlikuju od čelika po sastavu i po tehnološkim osobinama. Gvožđa imaju bolje livne, ali slabije mehaničke osobine (naročito plastičnost), i imaju niže proizvodne troškove od čelika.

U zavisnosti od strukture razlikuju se:

1. *Bijela gvožđa* – sav ugljenik vezan u obliku karbida.
2. *Siva gvožđa* – ugljenik sav ili djelimično u slobodnom obliku, tj. u obliku grafita. Lamelarni oblik grafita pogoršava mehaničke osobine gvožđa, zbog čega se nastoji da se prevede u povoljniji oblik, a time poboljšaju osobine gvožđa.
3. *Nodularna gvožđa (nodularni liv)* – ugljenik se djelimično ili u potpunosti nalazi u obliku *nodula* (loptica) grafita;
4. *Temper liv* – dobija se termičkim tretmanom odlivaka od bijelog gvožđa. Ugljenik se sav ili djelimično nalazi u obliku temper-ugljenika (najčešće u obliku rozeta).

Kao što se vidi, gvožđa se (osim bijelog) razlikuju od čelika po prisustvu grafitnih uključaka, a između sebe razlikuju se po obliku u kome se javljaju grafitni uključci.

3.1.1 Bijelo liveno gvožđe

Bijelo liveno gvožđe je gvožđe kod koga se ugljenik nalazi u hemijski vezanom obliku kao cementit (Fe_3C). Na prelomu ima mat bijelu boju, po čemu je i dobilo ime. Mikrostruktura bijelih livenih gvožđa objašnjava se pomoću dijagrama stanja Fe- Fe_3C . U strukturi ovih gvožđa na sobnoj temperaturi se javljaju dvije faze i to ferit i cementit.

Bijela gvožđa se proizvode tako, što se smanjuje sadržaj onih elemenata, koji olaksavaju razlaganje cementita (Si) ili se pak dodaju elementi koji stabilizuju cementit (Mn). Struktura bijelih livenih gvožđa (*Slika 39*), kao i uslovi njihovog obrazovanja su analizirani u poglavlju 2.3 (stranica br. 30).

3.1.2 Sivo liveno gvožđe

Sivo liveno gvožđe je gvožđe kod koga je ugljenik izdvojen sav u obliku grafita ili djelimično u obliku grafita a djelimično cementita. Na prelomu ima sivu boju, po čemu je i dobilo ime. Prema tome, kristalizacija sivih gvožđa pratiti se po dijagramu stanja Fe-C, ili djelimično po Fe-C, a djelimično po Fe- Fe_3C dijagramu stanja.

Siva livena gvožđa uvijek sadrže izvjesnu količinu grafitizatora, naročito Si, pa se za preciznije tumačenje tih struktura koristi trokomponentni ravnotežni dijagram stanja Fe-C-Si.

Struktura sivog gvožđa formira se izdvajanjem primarnih kristala austenita kod podeutektičkih legura, odnosno austenita u grafitnom eutektikum, kod eutektičkih i nadeutektičkih legura. Struktura sivog gvožđa dobijenog u stvarnim, proizvodnim uslovima, bitno se razlikuje od ravnotežne strukture. Presudan uticaj na formiranje strukture imaju C i Si, kao i brzina hlađenja. Što je veći sadržaj Si, proces grafitizacije je potpuniji. Što je veći sadržaj C, za dobijanje zadate strukture sivog liva potreban je manji sadržaj Si.

Očvršćavanje sivog livenog gvožđa, odvija se u skladu sa Fe-C dijagramom stanja, a hlađenje već očvršle legure u skladu sa Fe- Fe_3C dijagramom stanja.

Razlaganjem austenita eutektoidnom reakcijom u zavisnosti od uslova hlađenja, dobija se feritna ili perlitna ili feritno-perlitna metalna osnova.

Kada je metalna osnova sivog livenog gvožđa feritna ugljenik se sav javlja u slobodnom obliku tj. u obliku grafitnih lamela (*Slika 45a*).

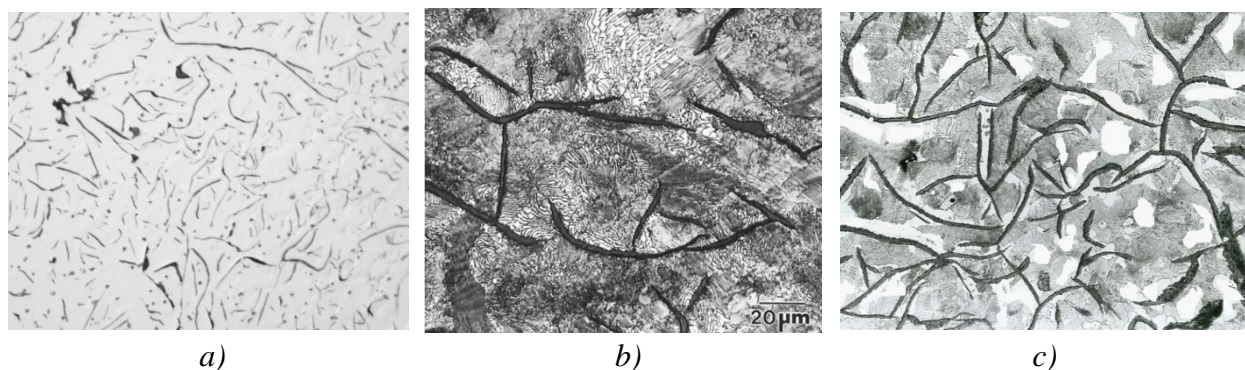
Kada je metalna osnova perlitna, ugljenik u sivom livenom gvožđu djelimično je izdvojen

u obliku cementita, koji se nalazi u perlitu, a djelimično u obliku grafita (Slika 45b).

Kada je metalna osnova feritno-perlitna ugljenik se djelimično izdvaja u obliku cementita (u perlitu), a djelimično u obliku lamela grafita (Slika 45c).

Na slici 46 prikazani su na pregledan način pojavni oblici strukture sivih gvožđa.

Osobine sivih livenih gvožđa uvcliko zavise od oblika izdvajanja grafita u njima. pa se sva livena gvožđa dijele na gvožđa kod kojih se ugljenik izdvaja u lamelarnom obliku, u obliku nodula, u obliku temper ugljenika i sl.



Slika 45. Mikrostruktura sivog livenog gvožđa sa grafitnim lamelama i osnovom: a) feritnom (100x), b) perlitnom (500x) i c) feritno-perlitnom (500x)

Metalna osnova	Oblik izdvojenog grafita			
	Lamelaran	Vermikularan	U obliku rozeta	Nodularan
Feritna				
Feritno-perlitna				
Perlitna				

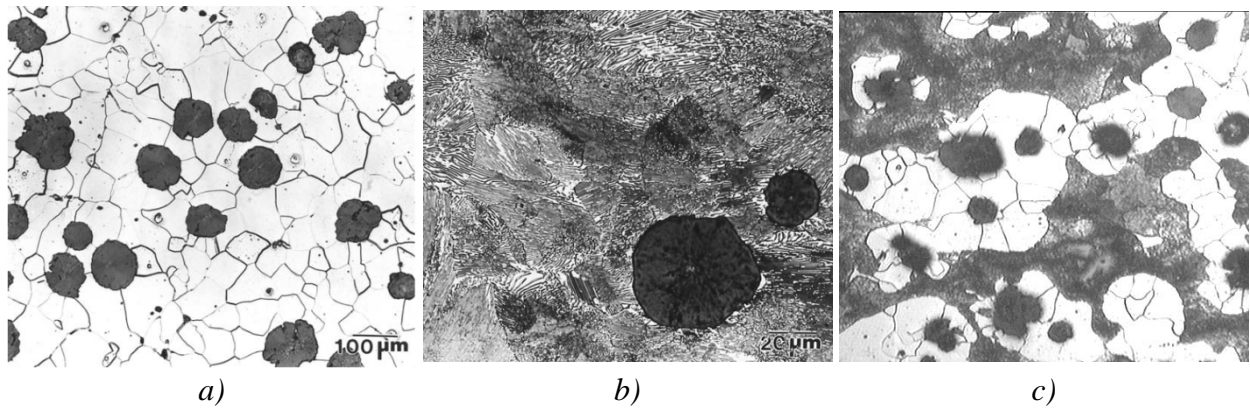
Slika 46. Klasifikacija gvožđa po strukturi metalne osnove i oblika izdvajanja grafita

3.1.3 Nodularni liv

Nodularni liv se dobija kada se u rastop livenog gvožđa dodaju manje količine Mg (0,03÷0,07%), niki-magnezijuma, Ca, Ce i dr. Po sadržaju ostalih elemenata nodularni liv se ne razlikuje od običnog sivog livenog gvožđa, izuzev što je sadržaj mangana manji.

Pod dejstvom ovih elemenata, grafit se ne izdvaja u obliku lamela, već u obliku nodula - loptica, pa otuda i naziv nodularno liveno gvožđe.

Grafit izdvojen u obliku nodula ima minimalnu površinu, za datu zapreminu, pa ne djeluje kao konzentator naprezanja, kao što je to slučaj sa lamelarnim grafitom. Upravo zbog toga nodularni liv, pored dobrih livenih osobina ima i dobre mehaničke osobine (žilavost, obradivost, otpornost na habanje i sl.). Metalna osnova nodularnog liva može biti feritna, feritno-perlitna ili perlitna (Slika 47).

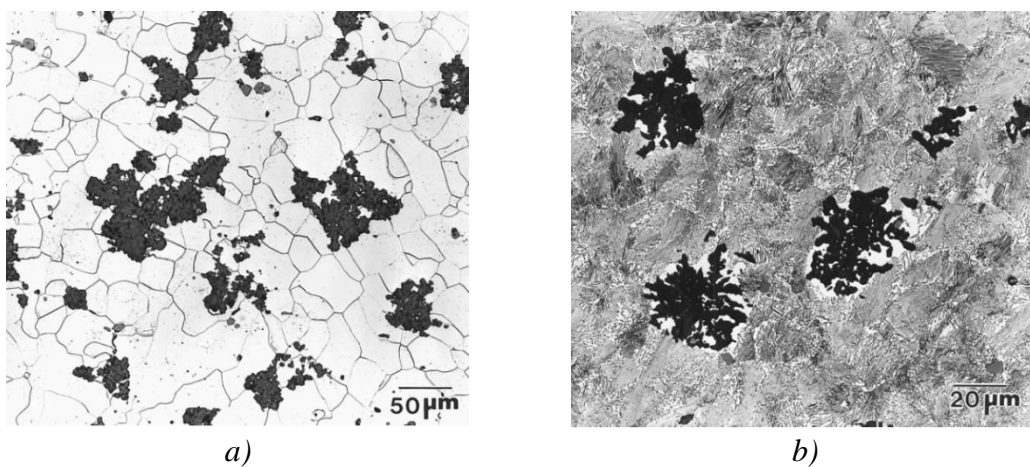


Slika 47. Mikrostruktura nodularnog livenog gvožđa sa osnovom:
 a) feritnom (100x), b) perlitnom (500x) i c) feritno-perlitnom (100x)

3.1.4 Temper liv

Da bi se izbjeglo stvaranje nepoželjnih lamela grafita, gvožđa očvršćavaju u obliku bijelog livenog gvožđa, iz kojih se naknadnom termičkom obradom izvjestan dio, ili sav cementit, u neutralnoj ili oksidacionoj atmosferi, razlaže na grafit. Grafit se izdvaja u obliku sitnih gnijezda odnosno rozeta. Grafit ovakvog oblika poboljšava mehaničke osobine gvožđa. Takav ugljenik se naziva temper ugljenik, a gvožđe temper gvožđe ili temper liv.

Temper liv se može kovati pa se često naziva i kovno gvožđe. Metalna osnova temper liva može biti feritna, a rjeđe perlitna (Slika 48). Najveću plastičnost pokazuje temper liv sa feritnom osnovom.



Slika 48. Mikrostruktura temper liva (kovnog gvožđa) sa osnovom:
 a) feritnom (100x) i b) perlitnom (100x)

1. ALUMINIJUM I NJEGOVE LEGURE

Aluminijum (Al) je od svih metala najviše zastupljen u zemljinoj kori (oko 8%). Pripada III grupi periodnog sistema elemenata. Al ima površinski centriranu kubnu rešetku. Redni broj mu je 13, a atomska masa 26,98. Temperatura topljenja mu je 660 °C. Zbog male gustine (2,7 g/cm³), pripada grupi lakih metala. Ima visoku električnu provodljivost. Posjeduje visoku plastičnost i nisku čvrstoću. Valjani i meko žareni tehnički Al, ima granicu tečenja 20÷30 MPa, zateznu čvrstoću 70÷90 MPa, tvrdoću 20÷25 HB, izduženje 30÷50% i kontrakciju 80÷95%.

U sastav legura aluminijuma ulaze:

- aluminijum, kao osnovni metal;
- glavni legirajući elementi;
- sporedni legirajući elementi;
- nečistoće.

Glavni legirajući elementi su oni elementi koji svojom prirodom opredjeljujuće utiču na osnovni karakter legure. Kao sporedni legirajući elementi smatraju se oni elementi, koji ne mijenjajući osnovni karakter legure, poboljšavaju neke njene osobine. Pod nečistoćama podrazumijevaju se nepoželjni elementi prisutni u sastavu legure.

Legure aluminijuma su prema važećim standardima sistematizovane u 8 serija:

- 1xxx – tehnički čisti aluminijum minimalne čistoće 99%;
- 2xxx – legure Al-Cu;
- 3xxx – legure Al-Mn;
- 4xxx – legure Al-Si;
- 5xxx – legure Al-Mg;
- 6xxx – legure Al-Si-Mg;
- 7xxx – legure Al-Zn;
- 8xxx – legure: Al-Fe-Si, Al-Fe-Mn, Al-Sn, Al-Li, itd.

Legure serija 3xxx, 4xxx, 5xxx i 8xxx (Al-Fe-Si, Al-Fe-Mn i Al-Sn) spadaju u tzv. *nekaljive legure* tj. legura koje termički ne ojačavaju. Legure koje termički ojačavaju i željene osobine postižu kaljenjem i naknadnim starenjem su 2xxx, 6xxx, 7xxx i 8xxx (Al-Li).

Legure aluminijuma klasifikuju se i prema:

- načinu tehnološke prerade;
- tehnološkoj namjeni;
- pogodnosti za ojačavanje termičkim taloženjem;
- broju glavnih legirajućih elemenata;
- prirodi glavnih legirajućih elemenata.

Prema načinu tehnološke prerade sve Al legure dijele se na *legure za plastičnu deformaciju* (Tabela 6) i *legure za livenje* (Tabela 7).

Prema tehnološkoj namjeni Al legure dijele se na *legure za dodavanje* i *legure za spajanje*.

Prema pogodnosti za ojačavanje termičkim taloženjem razlikuju se *legure pogodne* i one koje *nijesu pogodne za ojačavanje termičkim taloženjem*.

Prema broju glavnih legirajućih elemenata razlikuju se *dvokomponentne, trokomponentne i višekomponentne legure*.

Prema prirodi glavnih legirajućih elemenata razlikuju se sljedeće grupe legura aluminijuma: Al-Mn, Al-Mg, Al-Si, Al-Si-Mg, Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Si, Al-Zn-Mg, itd.

Tabela 6. Izabrane Al legure za plastičnu deformaciju

Oznaka legure	Primjena
AlMn1	Manje opterećeni delovi u hemijskoj i prehrambenoj industriji, platiranje, zavareni rezervoari za tečnost i gasove.
AlMg1 AlMg2 AlMg3 AlMg5	Komponente transportnih sredstava, hemijska i prehrambena industrija, građevinarstvo. Legure AlMg5 poznate su pod nazivom hidronalium.
AlCu4Mg AlCu4Mg1	Avioni, drumska vozila, automobili (dural i superdural).
AlCu2Mg	Zakivci.
AlCu2Mg2Ni AlMg1Si	Komponente turbokompresora, avio industrija, auto industrija, prehrambena industrija, precizna mehanika.
AlMgSiFe	Elektroprovodljiva legura.
AlZn4Mg1	Komponente za sredstva vazdušnog i železničkog transporta, sudovi pod pritiskom.
AlZn6Mg2Cu	Visoko opterećene komponente

Tabela 7. Izabrane Al legure za livenje

Oznaka legure	Primjena
AlSi13Mn	Tankoziidni odlivci, nepropustljivi za tečnost.
AlSi10Mn	Pribor koji dolazi u dodir sa životnim namirnicama.
AlMg5SiMn	Rebraste cilindarske glave, komponente u arhitekturi.
AlMg9MnBe	Odlivci otporni u atmosferi i morskoj vodi.
AlSi10MgMn	Tankoziidni odlivci u avio i auto industriji.
AlSi12Ni2Cu	Rad na visokim temperaturama (klipovi).
AlSi8Cu4Mn	Visokoopterećeni složeni odlivci (blok motora).
AlCu4Ni2Mg	Klipovi većih dimenzija.
AlCu8FeSi	Kućišta i košuljice kliznih ležišta.

1.1 Legure aluminijum-bakar (Al-Cu)

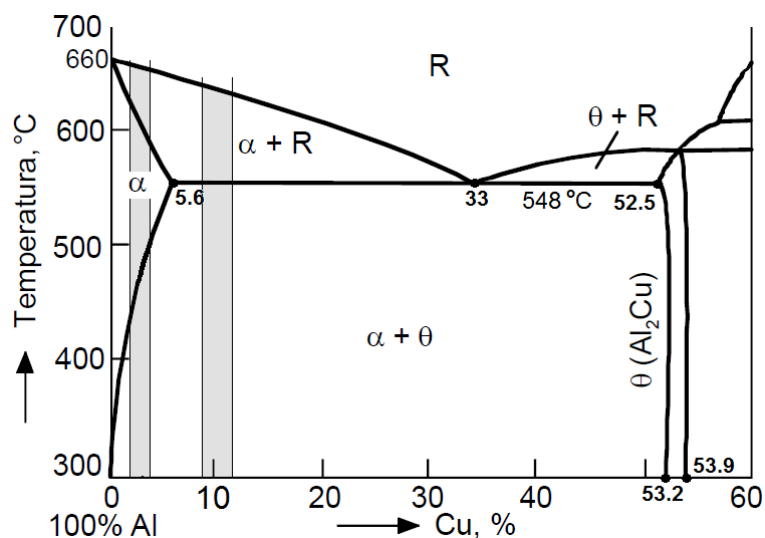
Legure aluminijum-bakar spadaju u legure za deformaciju i legure za livenje. Pogodne su za ojačavanje termičkim taloženjem. Na slici 49. prikazan je dijagram stanja sistema Al-Cu i to strana bogata aluminijumom.

Bakar se rastvara u aluminijumu gradeći α čvrsti rastvor. Rastvorljivost od 0,2% Cu na sobnoj temperaturi do maksimalnih 5,6% Cu na eutektičkoj temperaturi (548 °C). Pri sadržaju 54% Cu, obrazuje se intermetalno jedinjenje Al_2Cu (tzv. θ -faza), sa kojim aluminijum gradi eutektički sistem ($\alpha+Al_2Cu$), sa eutektičkom koncentracijom od 33% Cu.

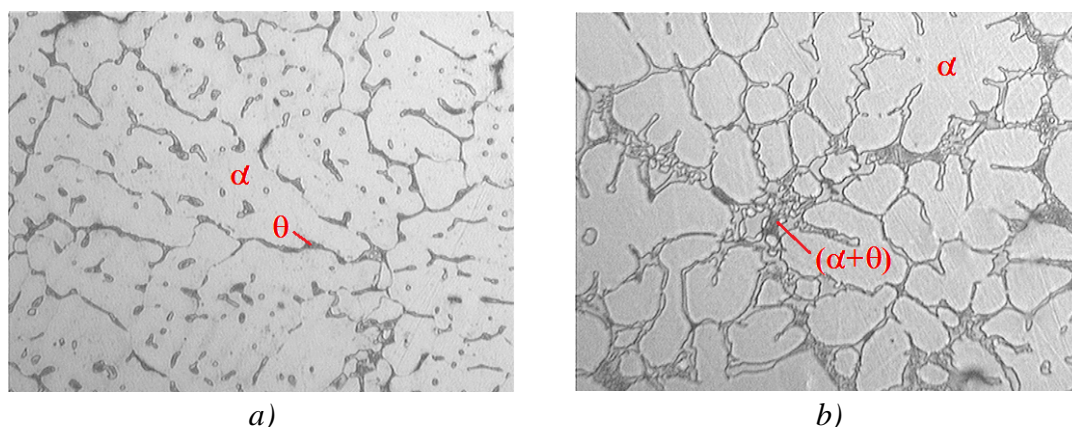
Legure Al-Cu dijele se na legure koje u strukturi ne sadrže i legure koje sadrže eutektikum. Legure koje imaju praktičnu primjenu predstavljene su šrafiranom oblasti na dijagramu stanja (Slika 49), i to su legure od 2÷4,5% Cu i od 9÷12% Cu. Struktura ovih legura u livenom stanju prikazana je na slici 50.

I pored toga, što se legure sa manje od 5,6% Cu nalaze u jednofaznoj oblasti, u strukturi se javlja i određena količina eutektikuma ($\alpha+\theta$), koji se obrazuje usljed neravnotežne kristalizacije. Naime, zbog unutar kristalne segregacije, velikog temperaturnog intervala očvršćavanja, kao i zbog spore difuzije na tim temperaturama, veoma teško se uspostavlja

ravnoteža. Otuda se i u leguri sa samo 2% Cu, može javiti neravnotežni eutektikum ($\alpha+\theta$), koji se naknadnim termičkim tretmanom uklanja. Takođe, i uključci sekundarno izdvojene θ -faze mogu javiti usljed raspada α čvrstog rastvora.



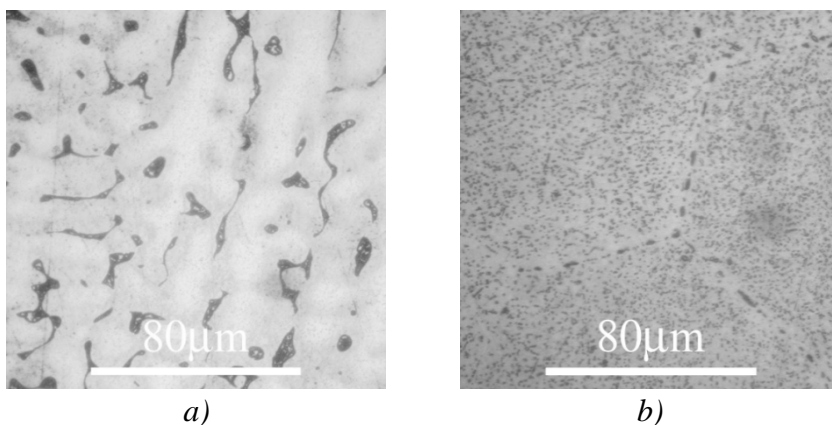
Slika 49. Dijagram stanja sistema Al-Cu



Slika 50. Mikrostruktura legura Al-Cu u livenom stanju:
a) 4,5% Cu i b) 10% Cu

Legure sa sadržajem Cu od 0,2÷5% imaju sposobnost *ojačavanja termičkim taloženjem*. Ova sposobnost zasnovana je na promjeni rastvorljivosti θ -faze u aluminijumu. Bilo koja legura, koja sadrži od 0,2÷5% Cu, može se odgovarajućim zagrijavanjem iznad linije rastvorljivosti prevesti u jednofazno stanje, odnosno mogu se kristali θ -faze rastvoriti u α čvrstom rastvoru. Brzim hlađenjem (kaljenjem), sa temperature zagrijavanja može se spriječiti sekundarno izdvajanje θ -faze, što uslovljava nastanak presićenog α čvrstog rastvora. Čvrsti rastvor dobijen na takav način, sa sadržajem Cu većim od 0,2%, javlja se kao presićeni čvrsti rastvor, iz koga se višak Cu izdvaja u obliku θ -faze, koja se taloži u veoma finom disperznom obliku (Slika 51). Izdvojeni talog koherentno je vezan sa osnovnom rešetkom, što dopunski ojačava leguru, ali se zadržava i njena relativno dobra plastičnost.

Razlaganje presićenog čvrstog rastvora (tzv. *starenje*) može se odvijati dvojako: na dnevnim temperaturama (*prirodno starenje*) i na povišenim temperaturama (*vještačko starenje*). Proces starenja ima nekoliko stadijuma i zavisi od temperature i vremena. Porast temperature ubrzava proces razlaganja.



Slika 51. Mikrostruktura legura Al-Cu sa 5% Cu posle: a) livenja i b) starenja

U Al-Cu legurama za *plastičnu deformaciju*, sadržaj Cu ne prelazi 4,5% zbog sklonosti ovih legura segregacijama, a najčešće se koriste legure od 2÷4,5% Cu.

Legure, koje se primjenjuju za *livenje*, najčešće sadrže 9÷12% Cu. U mikrostrukturi ovih legura prisutni su primarni, dendritni kristali α čvrstog rastvora i eutektikum ($\alpha+\theta$). Legure za livenje koje sadrže 2÷5% Cu mogu poboljšati osobine starenjem.

Radi poboljšanja vatrootpornosti i zadržavanja čvrstoće na povišenim temperaturama ove legure dodatno se legiraju sa Ni i Mg. Posebno su značajne trojne legure sistema Al-Cu-Mg.

1.1.1 Trojne legure sistema aluminijum-bakar-magnezijum (Al-Cu-Mg)

Tehničke legure sistema Al-Cu-Mg poznate su pod nazivom *duraluminijumi* ili *durali*. Koriste se isključivo kao legure za *plastičnu deformaciju*, a zbog značajnog prisustva rastvorljivih intermedijatnih faza, veoma su pogodne za ojačavanje termičkim taloženjem.

U zavisnosti od sadržaja osnovnih legirajućih elemenata Cu i Mg, legure duraluminijuma, uslovno se mogu podijeliti na: *niskolegirane*, *srednjelegirane* i *visokolegirane duraluminijume*. Sa povećanjem sadržaja legirajućih elemenata raste čvrstoća, plastičnost opada, pa se visokolegirani duraluminijumi teže obrađuju deformacijom.

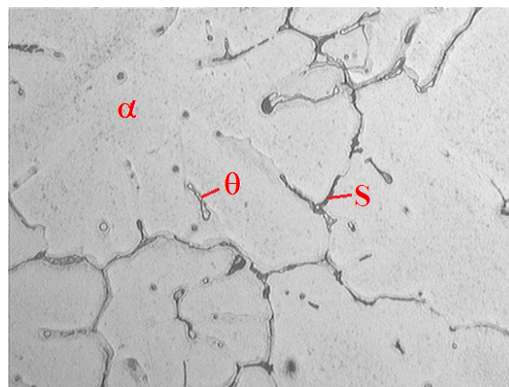
Kao legirajući element redovno se dodaje i Mn koji povećava otpornost na koroziju. Prisustvo Fe i Si nije moguće izbjeći, pa se parktično radi o šestokomponentnim legurama.

S obzirom da je duraluminijum višekomponentna legura, to se u njegovoj mikrostrukturi, pored višestruko legiranog α čvrstog rastvora na bazi aluminijuma, može očekivati čitav niz intermedijatnih faza kao što su: Al_2Cu (θ -faza), Al_2CuMg (S-faza), Mg_2Si , Al_6Mn , Al_7Cu_2Fe , Al_3Fe i dr. Osnovne ojačavajuće faze su θ i S. Primjer mikrostrukture duraluminijuma u livenom stanju prikazana je na slici 52.

Značajno opadanje rastvorljivosti Cu i Mg u aluminijumu, sa padom temperature, omogućava postizanje relativno značajnih efekata *ojačavanja termičkim taloženjem*.

Termička obrada duraluminijuma sastoji se od: zagrijavanju legure do temperature kaljenja; držanja na toj temperaturi određeno vrijeme dok se ne rastvore sve rastvorljive faze; zatim kaljenja u vodi (30÷40 °C) i na kraju *prirodnog* ili *vještačkog starenja*. Proces starenja dopunski ojačava legure.

Duraluminijum posjeduje veoma malu otpornost na koroziju. U tom cilju, koristi se metod plakiranja (presvlačenja) sa čistim Al. Debljina plakiranog sloja kreće se u rasponu 4÷8% od debljine lima, odnosno prečnika šipke ili žice.



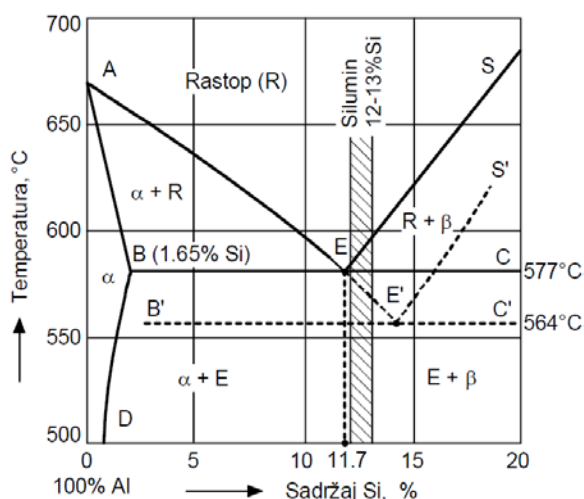
Slika 52. Mikrostruktura duraluminijuma sa 5,5% Cu i 1,3% Mg u livenom stanju

1.2 Legure aluminijum-silicijum (Al-Si)

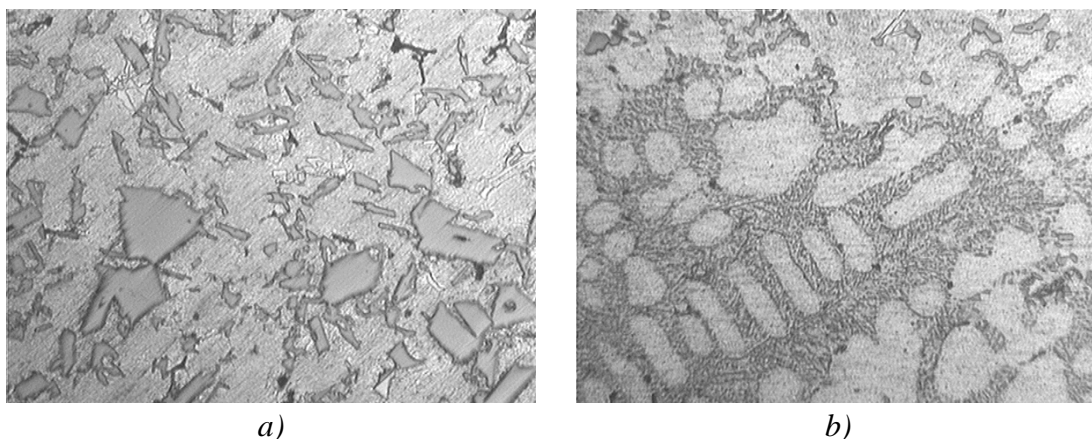
Legure Al-Si, zbog svojih izvanrednih livenih osobina, spadaju u legure za livenje i nazivaju se *siluminima*. Najčešće sadrže 11÷13% Si i spadaju u grupu nadeutektičkih legura.

Prema ravnotežnom dijagramu stanja (Slika 53), u strukturi ovih legura na sobnoj temperaturi treba očekivati α , odnosno β (Si) kristale u eutektikumu ($\alpha+\beta$). Na slici 54a, prikazana je mikrostruktura livenog silumina sa 13% Si, u kojoj se jasno uočavaju igličasti i pločasti primarni β kristali, odnosno kristali Si. Takođe i eutektički kristali izdvojeni su u obliku iglica, pa je ovakva struktura uzrok krтости legure i uopšte loših mehaničkih osobina.

Zbog toga se za livenje ne koriste eutektičke legure i pored toga što imaju najbolje livne osobine. Najbolja kombinacija livenih i mehaničkih osobina postiže se kod legura koje sadrže 15÷20% eutektikuma. Izuzetak od ovog pravila predstavljaju upravo silumini. Kod eutektičkih legura sistema Al-Si, otklanjanje nepovoljnih mehaničkih osobina može se ostvariti ili brzim hlađenjem (livenjem u metalne kalupe), ili tzv. *modificiranjem*. Kao *modifikator* najčešće se koristi Na, K ili smješa od 67% NaF + 33% NaCl. Pod uticajem modifikatora eutektička koncentracija (11,7% Si) pomjera se ka većim sadržajima Si (do 17%), uz sniženje eutektičke temperature za 10÷15 °C (Slika 53).



Slika 53. Ravnotežni dijagram stanja Al-Si (pune linije) i uticaj modificiranja / pothlađenja na fazne transformacije (isprekidane linije)



Slika 54. Mikrostruktura livenog silumina sa 13% Si: a) nmodificirano i b) modificirano stanje

Modificiranje se u suštini sastoji u usporavanju kristalizacije primarnih kristala Si tj. u njihovom pothlađenju. U modificiranim legurama koje sadrže manje količine Si nego što odgovara normalnom eutektičkom sastavu (< 11,7% Si) očvršćavanje počinje stvaranjem

primarnih dendrita α čvrstog rastvora, na temperaturama koje odgovaraju ravnotežnom dijagramu stanja. Ali, kada rastop dostigne normalni eutektički sastav kristali Si se ne obrazuju, kao što slijedi prema dijagramu, već se nastavlja rast primarnih α kristala sve do temperature koja je za 10÷15 °C niža od eutektičke, pri kojoj preostali rastop dostiže sastav sa povećanim sadržajem Si (do 17%), iz koga se izdvaja eutektikum. Zbog pothlađenosti rastopa i većeg sadržaja Si, obrazuju se sitniji kristali eutektikuma, koji imaju povoljnije mehaničke osobine.

Prema tome, u modificiranim legurama koje sadrže od 11÷17% Si ne obrazuju se primarni kristali Si već primarni kristali α čvrstog rastvora čija se kristalizacija završava eutektičkom reakcijom izdvajanjem finog disperznog eutektikuma (*Slika 54b*). Usitnjavanje strukture i odsustvo primarnih kristala Si uslovljava poboljšanje mehaničkih osobina.

Dvojne Al-Si legure veoma slabo mogu ojačavati termičkim taloženjem, jer nemaju ojačavajućih faza, koje bi se mogle rastvoriti u α čvrstom rastvoru. Ove legure primjenjuju se za izradu prostijih i složenijih odlivaka, ali samo u slučaju kada se ne traže visoke mehaničke osobine. Ako se zahtijeva visoka čvrstoća, onda se koriste tzv. *specijalni silumini*, a to su obično legure sa 4÷10% Si, legirane, najčešće sa Mn i Mg.

2. BAKAR I NJEGOVE LEGURE

Bakar (Cu) je prelazni metal, IB grupe Periodnog sistema elemenata. Redni broj je 29, a atomska masa 63,54. Temperature topljenja mu je 1083 °C. Dobro se legira sa drugim metalima. Bakar ima pov-c-k rešetku. Nema alotropskih modifikacija. Gustina bakra je 8,86 g/cm³, zatezna čvrstoća 180÷250 MPa, izduženje do 50%, a kontrakcija do 75%.

Upotrebljava se u obliku limova, cijevi, žice, praha itd. Veoma slabo se obrađuje rezanjem. Zbog niskih mehaničkih osobina veoma se rijetko koristi u livenom stanju, izuzev kada se prevashodno traži samo visoka elektro i toplotna provodljivost. Zbog dobre električne provodljivosti, Cu nalazi široku primjenu u elektroindustriji za provodnike, a zbog dobre otpornosti prema koroziji, primjenjuje se za plakanje. Bakar ima visoku plastičnost i lako se deformiše.

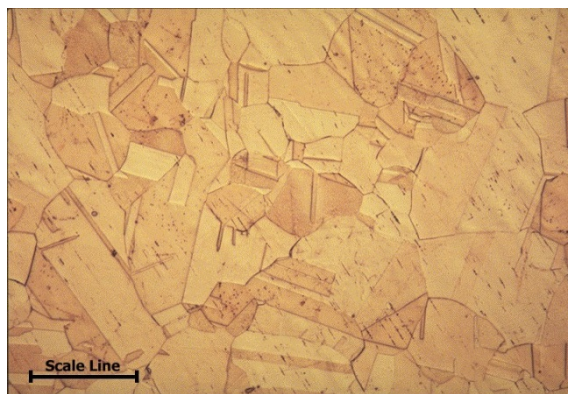
Čistoća tehničkog Cu kreće se u intervalu od 99,0÷99,99%. Mikrostrukturu Cu karakterišu poliedarski kristali sa velikim brojem dvojnika (*Slika 55*).

Prisustvo primjesa ima veliki uticaj na njegove osobine. Po svom karakteru i uticaju na osobine Cu, primjese se mogu podijeliti na tri grupe.

U prvu grupu spadaju (Ni, Zn, Sb, Sn, Al, As, Fe, P, itd) primjese koje se djelimično ili u potpunosti rastvaraju u Cu. Ove primjese poboljšavaju mehaničke osobine Cu, ali veoma snižavaju njegovu električnu i toplotnu provodljivost.

U drugu grupu primjesa spadaju Pb i Bi, koji su praktično nerastvorljivi u Cu. Ovi elementi obrazuju lako topive eutektikume, koji se izdvajaju po granicama zrna i time otežavaju pa i onemogućavaju plastičnu deformaciju bakra. Ove primjese ne pokazuju značajniji uticaj na elektroprovodljivost.

Primjese treće grupe (O i S) sa Cu obrazuju krta jedinjenja Cu₂O i Cu₂S, koja ulaze u sastav eutektikuma, što otežava deformaciju ovih legura. Prisustvo S povoljno utiče na obradivost rezanjem. Kiseonik izaziva i tzv. *vodoničnu bolest*, jer reaguje sa prisutnim H gradeći vodenu paru, što izaziva povećanje zapremine i pritiska u metalu i stvaranja mikropukotina, koje



Slika 55. Poliedarski kristali bakra sa dvojnica (skala od 250 μm)

zntno snižavaju karakteristike bakra.

Razlikuju se dvije osnovne grupe legura bakra:

- 1) **Mesinzi** – legure bakra sa cinkom;
- 2) **Bronze** – legure bakra sa drugim elementima.

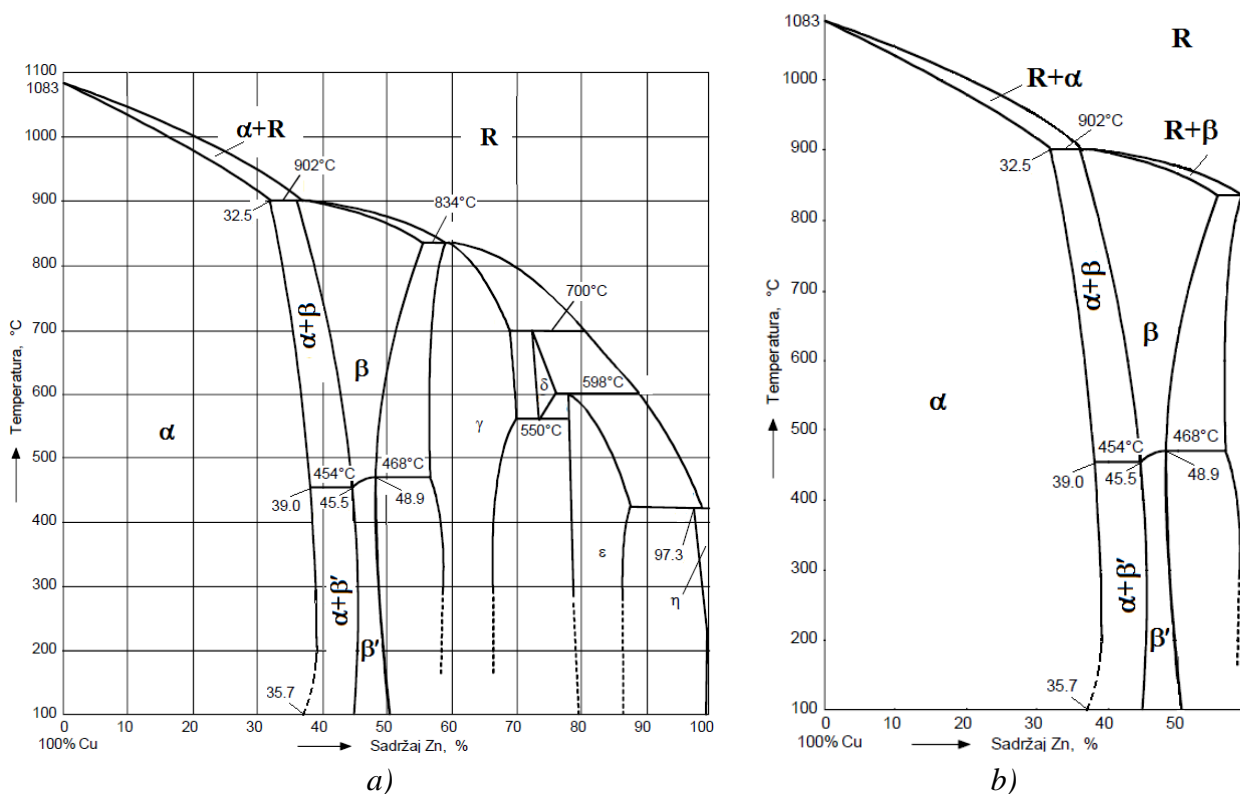
Cu legure imaju visoke mehaničke i tehnološke osobine i dobru korozionu otpornost.

2.1 Mesinzi

Mesinzi su dvokomponentne ili višekomponentne legure na bazi bakra, u kojima se kao glavni legirajući element javlja cink (Zn).

Sa dijagrama stanja (Slika 56a) vidi se da se u sistemu Cu-Zn, javljaju sljedeće čvrste faze: α , β , γ , δ , ε i η .

Mesinzi, koji imaju praktičnu primjenu, u strukturi imaju α i β fazu. Prema hemijskom sastavu, a samim tim i mikrostrukturi na sobnoj temperaturi mesinzi se dijele na α -mesinge, $(\alpha+\beta)$ mesinge i β -mesinge. Iz ovog razloga analiziraćemo samo dio dijagrama stanja Cu-Zn (Slika 56b) i mikrostrukture gdje su prisutne gdje su prisutne ove strukturne komponente.



Slika 56. Dijagram stanja Cu-Zn (a) i dio dijagrama stanja sa fazama α i β (b)

Faza α je čvrsti rastvor cinka u bakru, kod koga na peritektičkoj temperaturi od 902 °C, rastvorljivost iznosi 32,5% Zn. Sa padom temperature rastvorljivost raste i na oko 450 °C, dostiže maksimalnu vrijednost od (39% Zn), nakon čega rastvorljivost cinka u bakru opada do sobne temperature (35,7%). Da bi se uspostavilo ravnotežno stanje na nižim temperaturama, potrebna je znatna prerada u hladnom stanju i dugo vrijeme termičkog tretiranja.

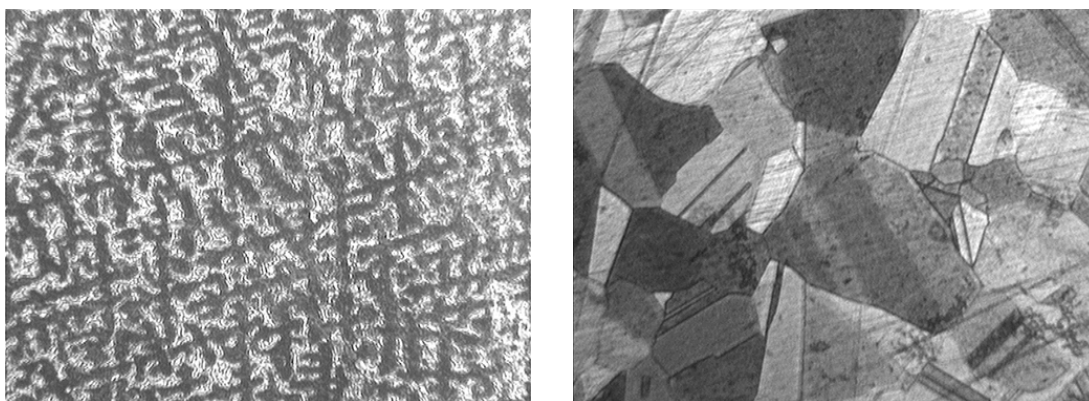
Faza β je jedinjenje (elektronskog tipa) približnog sastava CuZn. Nastaje peritektičkom reakcijom na temperaturi od 902 °C, iz primarno izdvojenih α kristala i preostalog rastopa. β -faza ima prost-c-k rešetku koja pri visokim temperaturama ima nesređeni raspored atoma i relativno široku oblast homogenosti. Na temperaturama 454÷468 °C, atomi Cu i Zn se međusobno sređuju a novodobijena superstruktura na bazi elektronskog jedinjenja CuZn,

označava se sa β' . Za razliku od nesređene β -faze, ova faza je izuzetno tvrda i krta.

α -mesinzi sadrže najmanje 61% Cu. Mikrostruktura α -mesinga u livenom stanju je dendritna (Slika 57a). Laganim hlađenjem ili zagrijavanjem na povišenim temperaturama dendritna segregacija se sprječava ili pak otklanja. Ravnotežna struktura α -mesinga sa 30% Zn, data je na slici 57b. Uočavaju se poliedarska zrna α -faze sa jasno izraženim lamelama dvojnika. Ovakva struktura karakteristična je i za plastično deformisane, a zatim žarene legure. α -mesinzi dobro se deformišu i u toplom i u hladnom stanju.

$(\alpha+\beta)$ mesinzi sadrže 55÷61% Cu. Ako se mesing ovog sastava brzo hladi sa visokih temperatura, iz oblasti β -faze, onda se α -faza izdvaja orjentisana u odnosu na β -fazu (Slika 58). Laganim hlađenjem ova orjentisanost se uklanja. Dvofazni $(\alpha+\beta')$ mesinzi slabo su plastični u hladnom stanju, a u cilju tople obrade zagrijavaju se do temperatura postojanosti β ili $(\alpha+\beta)$ faze.

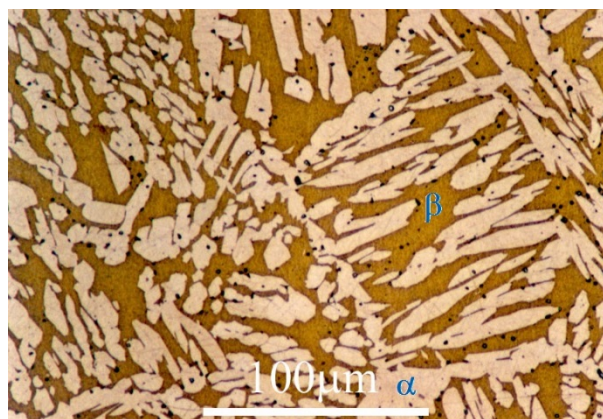
Jednofazni β -mesinzi nemaju praktične primjene zbog velike krtosti. Krtost je naročito izražena u sređenom stanju (β'), a sređivanje se ne može spriječiti ni vrlo brzim hlađenjem.



a)

b)

Slika 57. Mikrostruktura α mesinga sa 30% Zn: a) liveno stanje i b) žareno



Slika 58. Mikrostruktura $\alpha+\beta$ mesinga sa 40% Zn

Prema tehnološkoj namjeni mesinzi se dijele na: mesinge za livenje (Tabela 8) i mesinge za deformaciju (Tabela 9).

Table 8. Izabrani mesinzi za livenje

Oznaka legure	Primjena
CuZn33Pb2	Odlivci liveni u pijesku, sklopovi i vezni konstrukcioni elementi. Djelovi za opštu upotrebu u elektrotehnici
CuZn40	Odlivci liveni u kokili, armature metalno-svijetlih površina, okovi, djelovi u elektrotehnici, ...

Table 9. Izabrani mesinzi za deformaciju

Oznaka legure	Primjena
CuZn10 CuZn15 CuZn20 CuZn28	Djelovi u elektrotehnici, za bižuteriju i sl.
CuZn30	Izrada čaura svih vrsta, cijevi za kondenzatore i izmjenjivače toplote, ...
CuZn33	Mreže, trake za hladnjake, šuplji zakivci, ...
CuZn37 CuZn40	Mašinski zavrtnji, zavrtnji za drvo, valjci za štampanje tekstila, trake za hladnjake, lisnate opruge,

2.2 Bronze

Bronze su legure bakra sa svim ostalim elementima izuzev cinka. Razlikuju se: kalajne, aluminijumske, olovne, silicijumove, manganske, berilijumove i dr. bronzе.

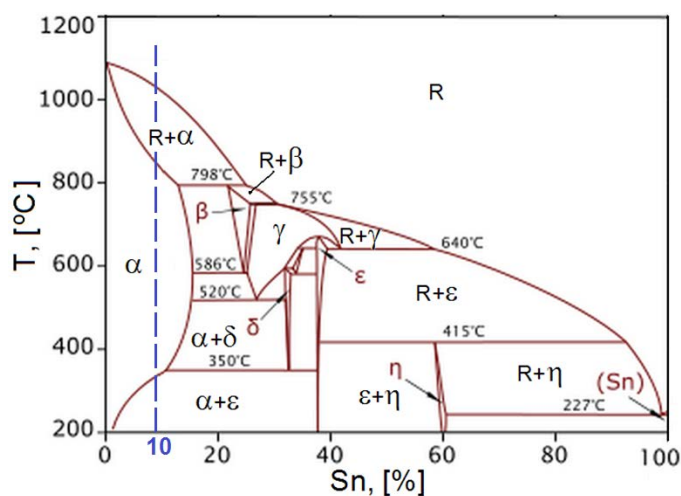
Najpoznatije su kalajne bronzе.

2.1 Kalajne bronzе

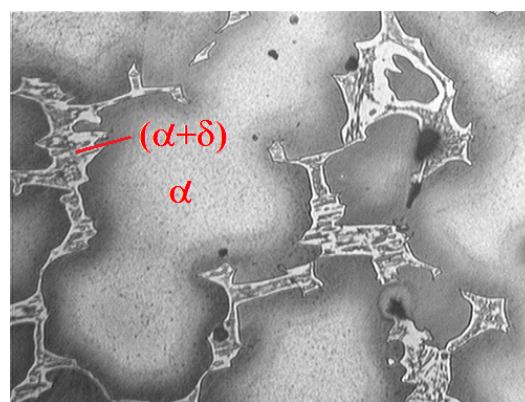
Kalajne bronzе su legure bakra sa kalajem (Sn). Koriste se za livenje. Najčešći sadržaj Sn u bronzi je oko 10%. Ravnotežni dijagram stanja sistema Cu-Sn, prikazan je na slici 59a.

Dijagram je vrlo složen i sadrži tri peritektičke, jednu eutektičku, četiri eutektoidne i dvije peritektoidne reakcije. U sistemu Cu-Sn, javljaju se sljedeće čvrste faze: α , β , γ , δ , ϵ , η i ξ .

Najviše korišćena bronza sa 10% Sn, prema ravnotežnom dijagramu stanja (Slika 59a), kristališe u obliku jednofazne legure. Pri hlađenju iz oblasti α čvrstog rastvora, prema solvus liniji, izdvaja se ϵ -faza. U realnim uslovima ovo se ne događa, jer je za sistem Cu-Sn, karakteristična izrazita sklonost ka dendritnoj segregaciji. Ova pojava uslovljena je velikim rastojanjem između likvidusa i solidusa i malom brzinom difuzije kalaja. Zbog toga mikrostruktura ove bronzе, znatno odstupa od one koja odgovara ravnotežnom dijagramu stanja. Usljed nepotpune difuzije u proizvodnim uslovima očvršćavanje bronzе sa 12% Sn, završava se peritektičkom reakcijom na 798 °C ($R+\alpha\rightarrow\beta$).



a)



b)

Slika 59. Dijagram stanja Cu-Sn (a) i mikrostruktura livene bronzе sa 10% Sn (b)

Pri daljem hlađenju β -faza se eutektoidno razlaže na α i γ -fazu na 586 °C, a zatim na 520 °C γ -faza se eutektoidno razlaže na α i δ ($\gamma \rightarrow \alpha + \delta$). Na sobnoj temperaturi u strukturi se ne javlja ε -faza, jer se niskotemperaturni preobražaj (350 °C) ne ostvaruje čak ni pri izrazito sporom hlađenju.

Na slici 59b data je tipična mikrostruktura livene bronzice sa 10% Sn. Uočava se prisustvo segregacija. Sredina svakog zrna α -faze, obrazovana na početku očvršćavanja, sadrži male količine Sn; Periferne zone zrna, koja kasnije kristališu obogaćene su na kalaju, dok se na mjestima najbogatijim kalajem (između zrna) nalazi eutektoidna smjesa ($\alpha + \delta$). Vrlo dugim žarenjem bronzice sa 10% Sn, na oko 800 °C, dendritna segregacija može se ukloniti.

Za plastičnu preradu koriste se samo legure u kojima se ne javlja krta intermedijarna δ -faza. Kako je ova pojava moguća već iznad 6% Sn, to se kalajna bronza za plastičnu preradu ograničava na ovaj sadržaj Sn. Nehomogena struktura kod ovih legura otklanja se homogenizacionim žarenjem.

Legure sa sadržajem kalaja iznad 10% koriste se za izradu odlivaka. U strukturi ovih legura prisutan je eutektoid ($\alpha + \delta$).

S obzirom na dobra svojstva, bronzice se uglavnom upotrebljavaju za mašinske delove koji su izloženi:

- jakom trenju (klizna ležišta, pužni prenosnici,...);
- pritisku (delovi pumpi, kompresora, ...);
- dinamičkim opterećenjima (opruge, ...).

2.2 Specijalne bronzice

Specijalne bronzice su legure Cu sa drugim legirajućim elementima kao što su: Al, Pb, Si, Mn, Be, Ni, Fe, itd. Najčešće označavaju prema glavnom legirajućem elementu, na primjer aluminijumske bronzice, olovne bronzice, itd. Sve specijalne bronzice imaju visoku otpornost na koroziju, veliku električnu i toplotnu provodljivost, a djelimično i dobre mehaničke osobine. Od svih specijalnih bronzica najširu primjenu ima aluminijumske bronzice.

Aluminijumske bronzice sadrže do 8÷11% Al. Imaju veliku otpornost prema habanju i koroziji kako na sobnoj tako i na povišenim temperaturama. Koriste se za jako opterećene djelove izložene koroziji i kovane djelove koji rade na toplo pod pritiskom.

Olovne bronzice sadrže 4÷12% Pb i 8÷10% Sn, koriste se kao antifrikcioni materijali za klizna ležišta. Sklone su likvacijama pa ih je potrebno posle izlivanja brzo ohladiti.

Silicijumske bronzice (do 4.5% Si sa dodacima Zn, Mn i Fe) odlikuju se dobrom toplotnom i električnom provodnošću, otpornošću na trenje i na djelovanje visokih temperatura. Ove bronzice se prije svega primjenjuju u elektro i radio tehnici. Silicijumsko-manganska bronza (CuSi3Mn1) koristi se za izradu ležišnih čaura pokretnih zupčanika u mjenjaču.

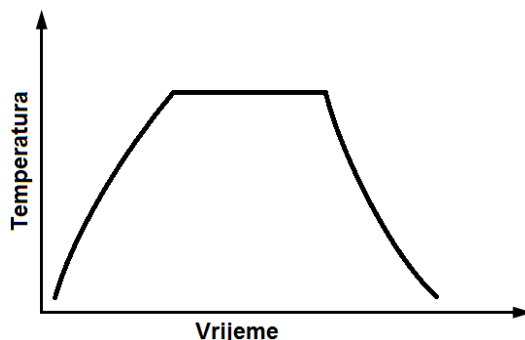
Manganske bronzice su otporne na visoke temperature jer zadržavaju kako tvrdoću tako i istegljivost. Nalaze primjenu za izradu parnih mašina.

Berilijumove bronzice odlikuje se najvećom tvrdoćom od svih legura bakra i znatnom otpornošću na koroziju. Imaju sposobnost ojačavanja termičkim taloženjem. Termički obrađene (kaljene u vodi) i otpuštene dostižu tvrdoću 370 HB i zateznu čvrstoću od 1350 MPa. One su skupe, ali se ipak upotrebljavaju za opruge otporne na koroziju, djelove pumpi, lopatice parnih turbina, mjerne pribore, i dr.

1. OSNOVI TERMIČKE OBRADÉ

Jedan od načina za poboljšanje osobina metala i legura je termička obrada, koja je zasnovana na promjeni strukture u čvrstom stanju izazvane difuzionim procesima i polimorfnim transformacijama. Proces termičke obrade sastoji se iz tri operacije (Slika 60):

- 1) zagrijavanje do temperature termičke obrade;
- 2) zadržavanje na temperaturi termičke obrade;
- 3) hlađenje sa temperature termičke obrade.



Slika 60. Tok termičke obrade – dijagram temperatura-vrijeme

Režim zagrijavanja je određen temperaturom zagrijavanja, koja se dostiže određenom brzinom zagrijavanja. Operacija zagrijavanja podrazumijeva i *progrijavanje*, tj držanje na temperaturi termičke obrade, dok se ne izjednači temperatura centra i površine komada.

Vrijeme zagrijavanja i progrijavanja zavisi od više faktora kao što su:

- vrste materijala,
- međusobni položaj i broj komada koji se zagrijavaju,
- oblik predmeta (komada),
- sredina u kojoj se vrši zagrijavanje.

Vrijeme zadržavanja na temperaturi termičke obrade zavisi od:

- temperature zagrijavanja,
- sredstva (sredine) u kome se vrši zagrijavanje,
- brzine strukturnih promjena,
- disperznosti strukture i stepena pregrijanosti iznad kritične temperature.

Iz navedenog se može zaključiti da su opredjeljujući faktori koji definišu termičku obradu *temperatura* i *vrijeme*. Iz njih se izvode osnovni parametri termičke obrade:

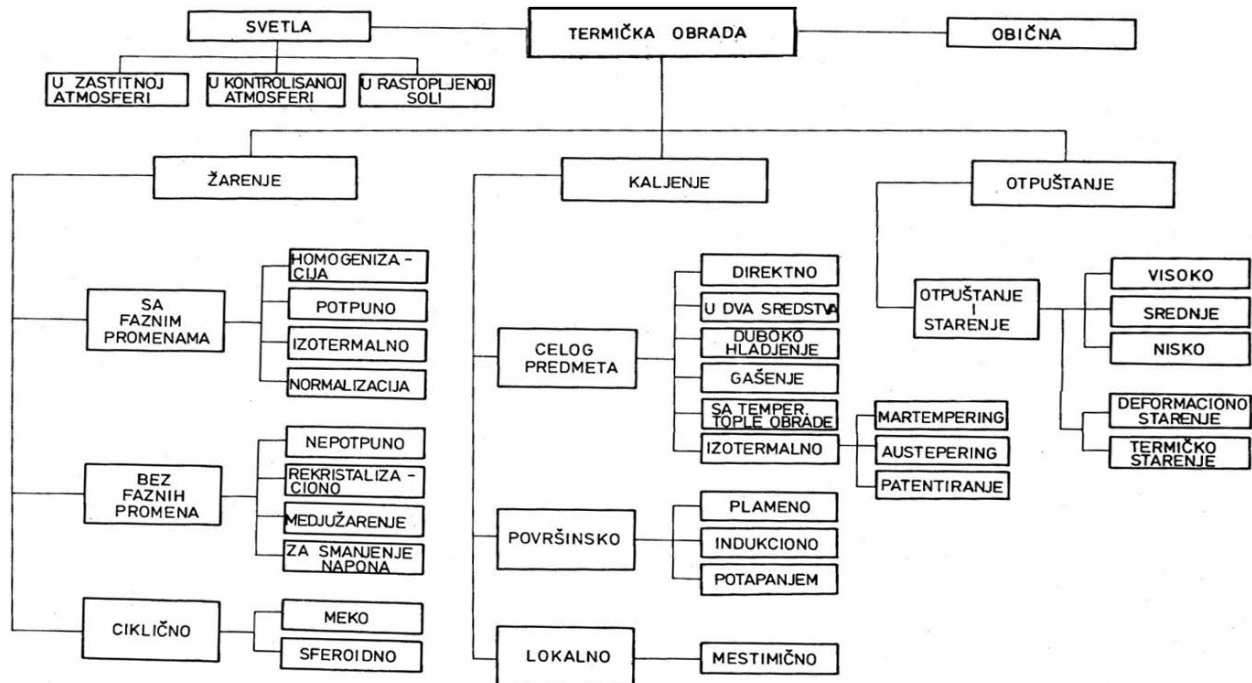
- maksimalna temperatura zagrijavanja (t_{max}),
- vrijeme držanja na toj temperaturi,
- brzina zagrijavanja,
- brzina hlađenja.

Tokom termičke obrade brzina zagrijavanja i hlađenja može da se mijenja, tj da postoje prekidi u režimu termičke obrade. U tom slučaju govori se o neravnomjernom zagrijavanju i hlađenju. Uopšteno govoreći, da bi se termičkom obradom postigla promjena osobina potrebno je da pri zagrijavanju odnosno hlađenju dolazi do faznih transformacija (preobražaja) u čvrstom stanju. Kako se većina faznih transformacija ne odigrava trenutno, već u određenom

vremenskom intervalu, to se promjenom uslova zagrijavanja ili hlađenja može obezbijediti :

- potpuna fazna transformacija,
- djelimična fazna transformacija,
- pojava novog mehanizma transformacije.

Pregled osnovnih vidova i podgrupa termičke obrade dat je na slici 61.

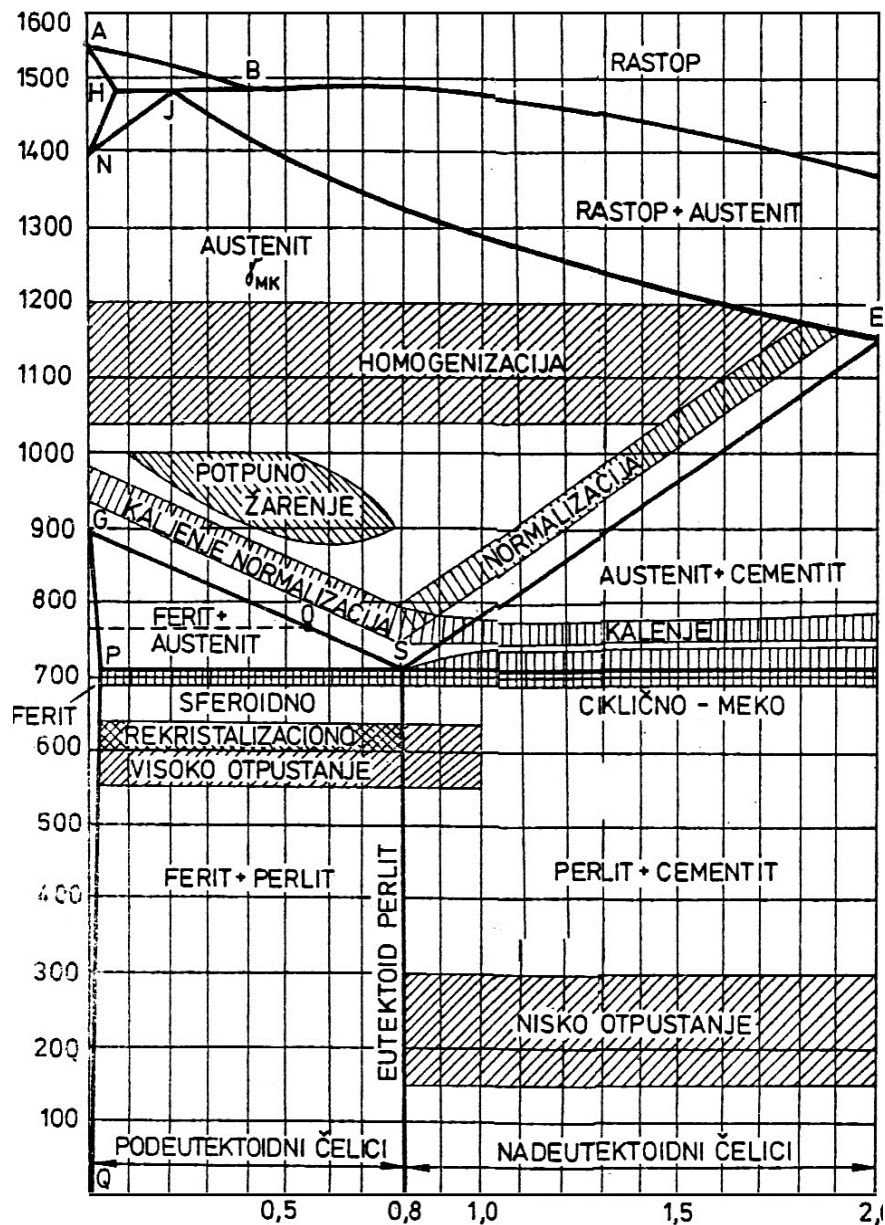


Slika 61. Osnovni vidovi termičke obrade

2. PRAKTIČNA TERMIČKA OBRADA ČELIKA

Temperatura zagrijavanja je osnovni parametar termičke obrade, od čijeg izbora zavisi dobijena struktura i osobine čelika. Izbor ove temperature zavisi od temperature faznih transformacije Ac_1 i Ac_3 (prema dijagramu Fe-Fe₃C). Temperaturne oblasti zagrijavanja ugljeničnih čelika pri određenim vidovima termičke obrade prikazane su na slici 62.

Vrijeme držanja na temperaturi termičke obrade, kao što je već rečeno, zavisi od brzine strukturnih promjena, stepena pregrijanosti iznad kritične temperature i disperznosti strukture. Ovo vrijeme ne smije biti predugo, jer u suprotnom može da dođe do razugljeničenja čelika (znatan pad % C u površinskom sloju, usled njegove oksidacije) i prekomjernog rasta austenitnog zrna. Vrijeme držanja različito je za nadeutektoidne i podeutektoidne čelike i postoje empirijski izrazi za njihovo izračunavanje.



Slika 62. Temperaturne oblasti zagrijavanja pri termičkoj obradi ugljeničnih čelika

2.1 Sredstva za zagrijavanje i hlađenje

Zagrijavanje čelika pri termičkoj obradi može da se vrši u:

- pećima (različite vrste, konstrukcije, načina zagrijavanja i snage);
- sonim kupatilima;
- metalnim kupatilima.

Ukoliko se zagrijavanje čelika vrši u sonim kupatilima, koriste se razne vrste *rastopljenih soli* čija upotreba u odnosu na peći ima sledeće prednosti:

- veću brzinu zagrijavanja,
- ravnomjernije zagrijavanje,
- lakša regulacija temperature,
- mogućnost lokalnog zagrijavanja,
- veća proizvodnost.

Rastopljene soli koje se koriste u sonim kupatilima moraju imati sledeće karakteristike:

- dobru rastvorljivost u vodi,
- malu higroskopnost,
- tečljivost,
- dobru toplotnu provodljivost,
- da nijesu koroziorno aktivne,
- da su teškoisparljive.

Prema temperaturi zagrijavanja, sona kupatila se dijele na:

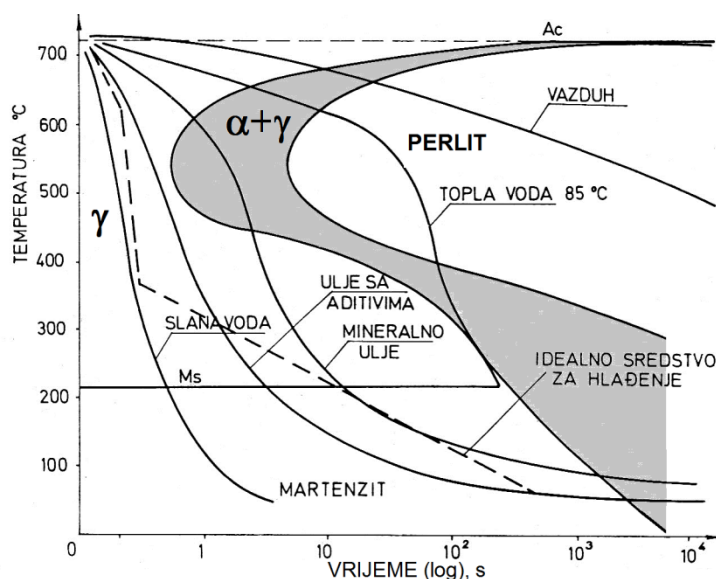
- visokotemperaturna ($1000\div 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$),
- srednjetemperaturna ($680\div 980\text{ }^{\circ}\text{C}$),
- niskotemperaturna ($150\div 600\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Pored zagrijavanja, sona kupatila se koriste i za hlađenje. Prema intenzitetu hlađenja, sredstva za hlađenje dijele se na:

- sredstva sa intenzitetom hlađenja vode;
- sredstva sa intenzitetom hlađenja većim od vode;
- sredstva sa intenzitetom hlađenja manjim od vode.

Voda je često korišćeno sredstvo za hlađenje, jer omogućava relativno veliku brzinu hlađenja. Nedostatak je što se pri hlađenju komada voda pretvara u paru, koja se u izvjesnoj mjeri ponaša kao izolator, tj. umanjuje intenzitet odvođenja toplote i moć rashlađivanja.

Idealno sredstvo za hlađenje (kaljenje) bi bilo ono koje u perlitnoj oblasti ($650\div 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) ima maksimalnu brzinu hlađenja (jer je u ovoj oblasti stabilnost austenita najmanja), a u oblasti martenzita ($< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) minimalnu brzinu hlađenja, s obzirom na napone koji se javljaju prilikom formiranja martenzita. Zbog svega navedenog, kao sredstva za hlađenje pri kaljenju, najčešće se koriste: voda, vodeni rastvori soli, rastopljene soli, rastopljeni metali, mineralna ulja i vazduh. Uticaj sredstva za hlađenje na brzinu hlađenja, šematski se može prikazati na IR-dijagramu (dijagram izotermalnog razlaganja austenita) ugljeničnog čelika (Slika 63). Sa dijagrama se uočava da je najsporije hlađenje na vazduhu a najbrže u slanoj vodi.



Slika 63. Uticaj sredstava za hlađenje na brzinu hlađenja ugljeničnog čelika

2.2 Žarenje sa faznim promjenama

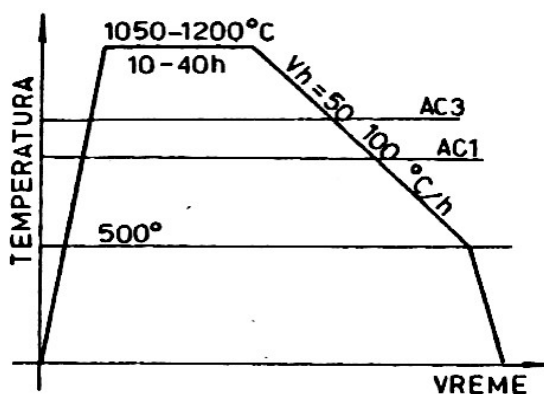
Pod žarenjem sa faznim promjenama podrazumijeva se skup operacija termičke obrade sa zagrijavanjem do temperature iznad Ac_3 , dugotrajnim držanjem na toj temperaturi i naknadnim hlađenjem. Ovo žarenje može biti:

- homogenizaciono,
- potpuno,
- izotermalno,
- normalizaciono.

2.2.1 Homogenizaciono žarenje

Ovaj vid žarenja naziva se još i difuziono žarenje i sastoji se u dugotrajnom zagrijavanju na visokoj temperaturi (iznad Ac_3) u cilju izjednačavanja sadržaja ugljenika i drugih legirajućih elemenata (homogenizacije), tj. eliminisanja kristalnih segregacija. Na homogenizaciju povoljno utiče i plastična deformacija, koja snižava stepen segregacija. Homogenizaciono žarenje uglavnom se primjenjuje na odlivcima, pri čemu se zagrijavanje vrši na $1050 \div 1200$ °C, u trajanju $10 \div 40$ h (Slika 64).

Pri ovim uslovima zagrijavanja neizbježno dolazi do rasta austenitnog zrna, što se kasnije eliminiše normalizacionim ili potpunim žarenjem.



Slika 64. Dijagram homogenizacionog žarenja

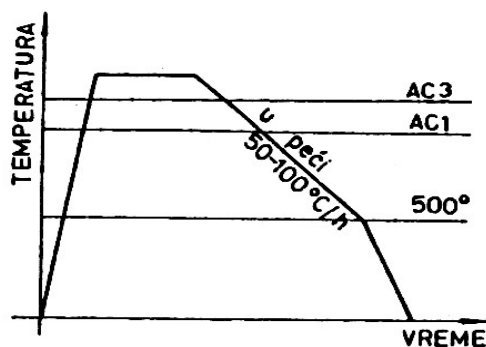
Pozitivni efekti homogenizacionog žarenja su:

- uklanjanje segregacija,
- povećanje plastičnosti i žilavosti,
- smanjenje anizotropije osobina kod valjanih i kovanih čeličnih proizvoda.

2.2.2 Potpuno žarenje

Potpuno ili visoko žarenje se izvodi na temperaturi iznad Ac_3 , uz zadržavanje nekoliko časova na toj temperaturi i naknadno sporo hlađenje. Ovo žarenje je slično homogenizacionom, stim što se izvodi na nešto nižim temperaturama i uz kraće zadržavanje na temperaturi žarenja (Slika 65).

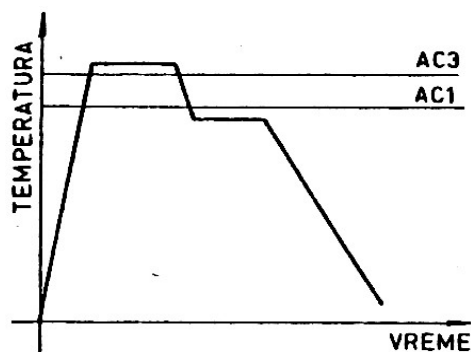
Potpunim žarenjem postiže se dosta meka i žilava sitnozrna struktura, bez zaostalih napona. Nedostatak ovog tretmana je pojava razugljeničenja površine, usled prisustva kiseonika. Zbog toga se potpuno žarenje uglavnom vrši u neutralnoj atmosferi (bez prisustva kiseonika). Ako se žarenje vrši na temperaturama između Ac_1 i Ac_3 , onda je to nepotpuno žarenje.



Slika 65. Dijagram potpunog žarenja

2.2.3 Izotermalno žarenje

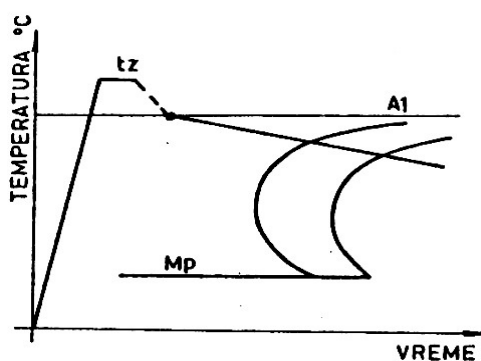
Izotermalno žarenje izvodi se na temperaturi $20 \div 30^\circ\text{C}$ iznad Ac_3 , nakon čega se vrši brzo hlađenje do temperature $50 \div 100^\circ\text{C}$ ispod Ac_1 , a zatim dugotrajno držanje na toj temperaturi, dok se austenit ne transformiše u perlit (Slika 66). Primjenjuje se kod legiranih brzoreznih čelika.



Slika 66. Dijagram izotermalnog žarenja

2.2.4 Normalizaciono žarenje

Normalizacija je vid termičke obrade pri kome se vrši zagrijavanje $30 \div 50^\circ\text{C}$ iznad GSE linije (na dijagramu Fe- Fe_3C), zatim kratkotrajno zadržavanje na toj temperaturi i nakon toga lagano hlađenje na vazduhu (Slika 67).



Slika 67. Dijagram normalizacionog žarenja

To je ustvari kaljenje na vazduhu, pri čemu se dobija finolamelarna perlitna ili feritno-perlitna struktura. Ovo žarenje primjenjuje se kao pripremna operacija za naknadno kaljenje i primjenjuje se najčešće za smanjenje veličine austenitnog zrna poslije termomehaničke obrade i cementacije, a u cilju poboljšanja osobina čelika.

Prednosti normalizacije u odnosu na potpuno žarenje su:

- obezbjeđuje bolje mehaničke osobine čelika,
- omogućava uklanjanje mreže sekundarnog cementita u nadeutektoidnim čelicima,
- omogućava veću produktivnost postrojenja termičke obrade.

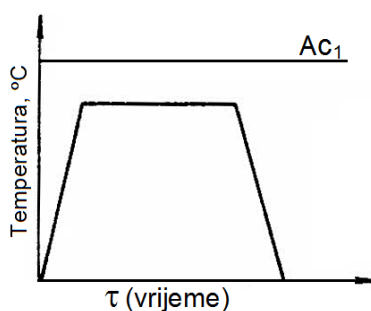
2.3 Žarenje bez faznih promjena

To je zagrijavanje čelika ispod temperature potpune rekristalizacije A_{c3} u cilju smanjenja tvrdoće i otklanjanja unutrašnjih (zaostalih) napona. U okviru ovog tipa žarenja razlikuje se:

- *nisko žarenje*,
- *rekristalizaciono žarenje*,
- *međužarenje*,
- *žarenje radi uklanjanja unutrašnjih (zaostalih) napona*.

2.3.1 Nisko žarenje

Nisko žarenje se izvodi na temperaturi ispod A_{c1} , kod čelika sa sitnozrnou strukturom, gdje nema potrebe za rekristalizacijom, već se žele smanjiti zaostali naponi. Vrijeme zadržavanja na temperaturi žarenja nema značajan uticaj, a hlađenje se odvija na vazduhu (*Slika 68*).



Slika 68. Dijagram niskog žarenja

2.3.2 Rekristalizaciono žarenje

Ovo žarenje se izvodi na hladno deformisanim komadima i to na temperaturi ispod A_{c1} , pri čemu se deformisana usmjerena struktura prevodi u sitnozrnu poligonalnu strukturu. Pri plastičnoj deformaciji (hladnom valjanju, vučenju, izvlačenju, presovanju i sl.) zrna se deformišu i usmjeravaju u pravcu deformacije, pri čemu čvrstoća raste a plastičnost opada. Zbog potrebe za daljom deformacijom, potrebno je izvršiti žarenje u cilju dobijanja veće plastičnosti i manje tvrdoće putem stvaranja novih poligonalnih zrna.

Temperatura rekristalizacionog žarenja određuje se približno po relaciji $T_r = 0,42 \cdot T_t$, gdje je T_t – temperatura topljenja čelika. To znači da se rekristalizacija odvija u temperaturnom intervalu $450 \div 600^{\circ}\text{C}$.

Ovim žarenjem postiže se oporavljanje strukture i povećanje plastičnosti, pa se u praksi koristi kao međuoperacija u procesu hladne deformacije. Na rekristalizaciju odlučujući uticaj imaju: vrsta legure i stepen prethodne plastične deformacije.

2.3.3 Međužarenje

To je međuoperacija pri termičkoj obradi i sastoji se u zagrijavanju ispod temperature rekristalizacije A_{c1} , držanju na toj temperaturi i sporom hlađenju. Na taj način se uklanjaju zaostali naponi nastali npr. pri dvostrukom kaljenju cementiranih slojeva.

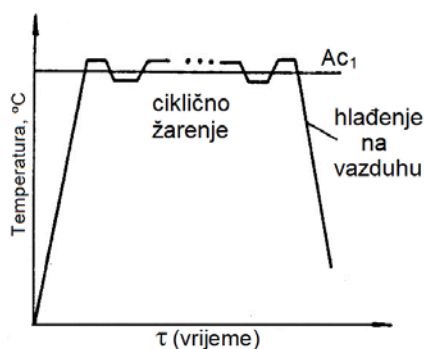
2.3.4 Žarenje za smanjenje unutrašnjih napona

Ovaj vid žarenja ima za cilj smanjenje unutrašnjih (zaostalih) napona nastalih pri različitim vidovima termičke obrade.

2.4 Ciklično žarenje

Ciklično žarenje je postupak žarenja i hlađenja naizmjenično iznad i spod A_{c1} temperature, sa ciljem da se, posebno kod nadeutektoidnih čelika, izvrši razlaganje sekundarnog cementita i cementita u perlitu i njegovo prevođenje u zrnasti perlit. Znači, ciklično žarenje se izvodi višestrukim zagrijavanjem i hlađenjem oko temperature A_{c1} , sa naknadnim hlađenjem na vazduhu (Slika 60). Dobijanje zrnastog perlita kod nadeutektoidnih čelika može se postići na jedan od sledećih načina:

- žarenjem na temperaturi neposredno ispod A_{c1} ,
- žarenjem na temperaturi neposredno iznad A_{c1} ,
- žarenjem na temperaturi koja varira ispod i iznad A_{c1} ,
- izotermalnim razlaganjem cementita na temperaturi A_{c1} ,
- kaljenjem i otpuštanjem na temperaturi bliskoj A_{c1} .



Slika 69. Dijagram cikličnog žarenja

2.5 Kaljenje čelika

Kaljenje je vid termičke obrade koji se sastoji od zagrijavanja čelika na temperature koje leže $30\div 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ iznad GSK linije (dijagram Fe-Fe₃C), držanja komada do potpunog progrijavanja i brzog hlađenja u cilju dobijanja martenzitne strukture. Kod ugljeničnih čelika za dobijanje martenzitne strukture obično je neophodno hlađenje u vodi (radi postizanja brzine hlađenja veće od kritične). Konačni cilj kaljenja je da čelik dobije visoku tvrdoću ($700\div 800\text{ HV}$, odnosno $60\div 65\text{ HRC}$) ili strukturu pogodnu za poboljšanje.

Tehnika kaljenja se sastoji u tome da se čelik sa temperature kaljenja ohladi brzinom koja je nešto veća od kritične, da transformacija austenita ne bi otpočela u perlitnoj oblasti. Transformacija austenita mora da počne i da se završi u martenzitnoj oblasti.

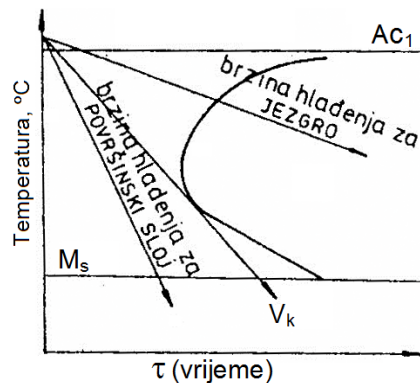
Prokaljivost čelika – je sposobnost čelika da se okali do određene dubine. Prilikom kaljenja, površina komada se hladi znatno brže nego jezgro (Slika 70). U površinskom sloju brzina hlađenja je veća od kritične brzine (v_{kr}), pri čemu se dobija martenzitna struktura, što rezultira najvećom tvrdoćom. Brzina hlađenja smanjuje se od površine prema jezgru (centru) komada i na određenoj dubini ta brzina je manja od kritične. Tada umjesto martenzitne nastaje perlitno-beinitna struktura.

Pod dubinom kaljenja podrazumijeva se rastojanje od površine do mjesta u kaljenom komadu na kome strukturu čini 50% martenzita i 50% perlita ili beinita.

Faktori koji utiču na dubinu kaljenja su:

- hemijski sastav čelika,

- homogenost i veličina austenitnog zrna,
- temperatura austenitizacije,
- prisustvo karbida i nemetalnih uključaka,
- način izrade i prethodna obrada čelika.



Slika 70. Uticaj brzine hlađenja na prokaljivost čelika

Za određivanje dubine kaljenja koriste se sledeće metode:

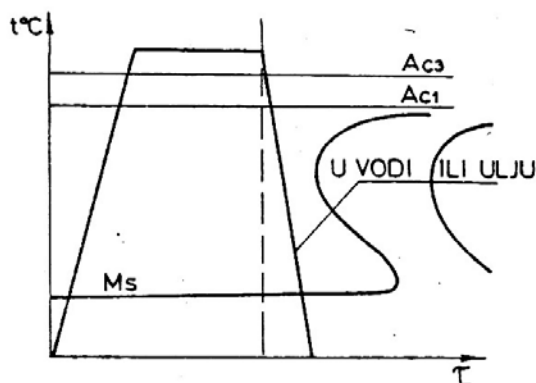
- metoda svestranog kaljenja (po *Grosman*-u),
- metoda čeonog kaljenja (po *Džomini*-ju),
- računaska metoda.

Razlikuju se sledeće vrste kaljenja:

- *kontinuirano kaljenje*,
- *kaljenje u dva sredstva za hlađenje*,
- *kombinovano (stepenasto) kaljenje*,
- *izotermalno kaljenje*,
- *gašenje*,
- *površninsko kaljenje*

2.5.1 Kontinuirano kaljenje

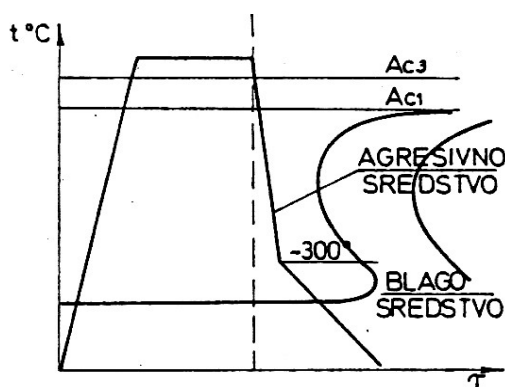
To je najjednostavniji vid kaljenja gdje se sa temperature kaljenja čelik potapa u sredstvo za hlađenje (Slika 71). Primjenjuje se kod komada jednostavne geometrije izrađenih od ugljeničnih i niskolegiranih čelika. Kao sredstvo za kaljenja, kod ugljeničnih čelika koristi se voda, a kod niskolegiranih ulje.



Slika 71. Dijagram kontinuiranog kaljenja

2.5.2 Kaljenje u dva sredstva za hlađenje

Dvostruko kaljenje izvodi se tako da se sa temperature kaljenja prvo vrši brzo hlađenje u vodi (do oko 300 °C), a zatim sporo hlađenje do sobne temperature u nekom drugom sredstvu (najčešće ulje) (Slika 72).

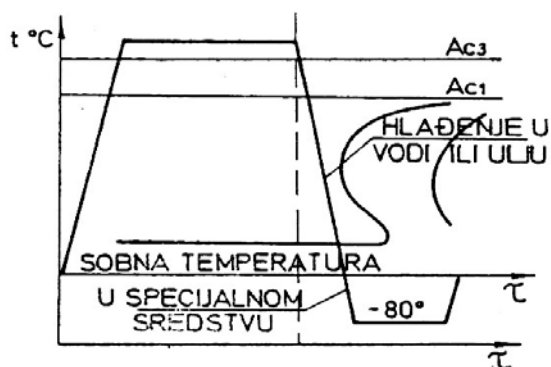


Slika 72. Kaljenje u dva sredstva

Pošto se hlađenje u martenzitnoj oblasti (ispod 300 °C) vrši relativno sporo time se smanjuju i unutrašnji (zaostali) naponi, što je poželjno kod alatnih visokougleničnih čelika.

2.5.3 Kaljenje dubokim hlađenjem

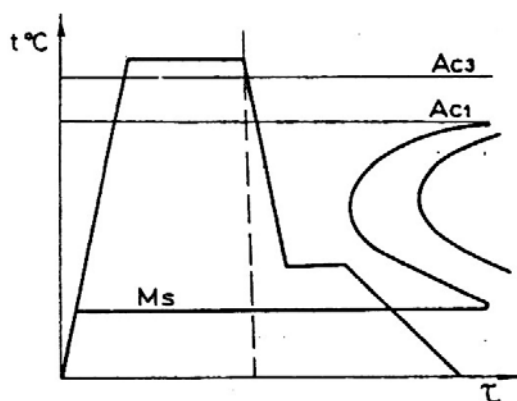
Pri kaljenju do sobne temperatura u strukturi se javlja zaostali austenit, koji smanjuje tvrdoću čelika. Zato, da bi se smanjila količine zaostalog austenita vrši se kaljenje ispod 0 °C (Slika 73). Ovim tretmanom povećava se tvrdoća, stabilizuju se dimenzije i poboljšavaju magnetne karakteristike čelika.



Slika 73. Dijagram kaljenja dubokim hlađenjem

2.5.4 Kombinovano (stepenasto) kaljenje

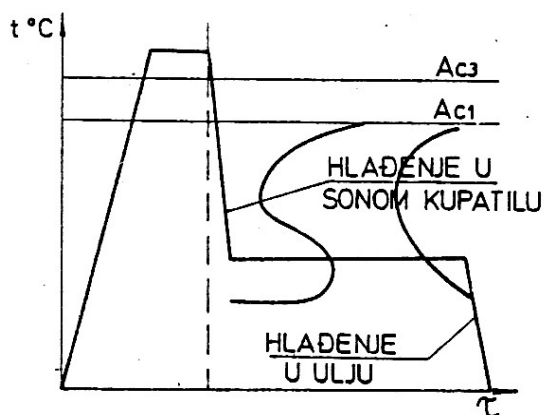
Pri ovom postupku brzo hlađenje vrši se do iznad M_s (martenzitne) temperature, a zatim se nastavlja u nekom drugom sredstvu koje omogućava sporije hlađenje (Slika 74). Najčešće se završno kaljenje vrši u sonim kupatilima. Prednost stepenastog kaljenja je smanjenje unutrašnjih napona, a nedostatak je ograničenje u pogledu dimenzija komada koji se na ovaj način mogu kaliti (debljine do 30 mm).



Slika 74. Dijagram stepenastog kaljenja

2.5.5 Izotermalno kaljenje

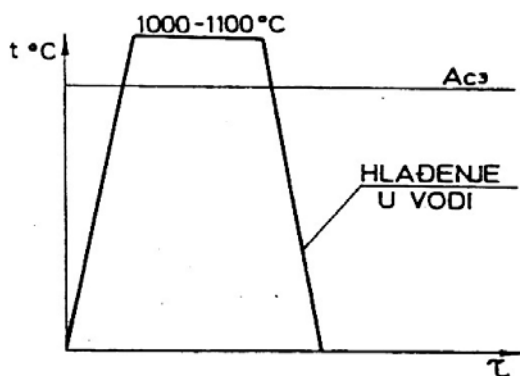
Izotermalno kaljenje se razlikuje od stepenastog po tome što se hlađenje na temperaturi iznad martenzitne (M_s) izvodi znatno duže u cilju formiranja beinitne strukture (Slika 75). Na taj način postiže se manja tvrdoća, ali znatno veća udarna žilavost. Temperatura izotermalnog kaljenja najčešće je $250\div 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, a vrijeme držanja $1\div 2$ časa.



Slika 75. Dijagram izotermalnog kaljenja

2.5.6 Gašenje

To je postupak pri kome se zagrijavanje vrši na veoma visokim temperaturama ($1000\div 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$), a zatim se vrši naglo hlađenje u cilju dobijanja stabilnog austenita (Slika 76). Primjenjuje se isključivo kod austenitnih čelika.

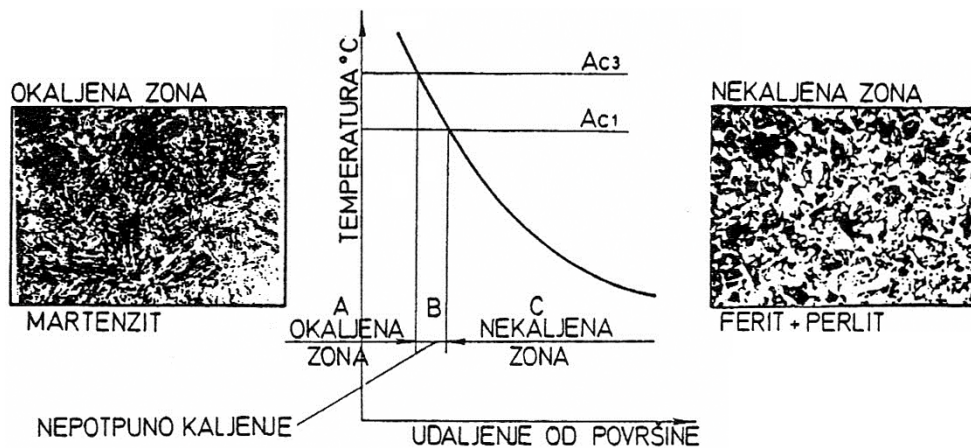


Slika 76. Dijagram postupka "gašenja"

2.5.7 Površinsko kaljenje

Površinskim kaljenjem postiže se visoka tvrdoća i otpornost na habanje samo površinskog sloja, dok jezgro ostaje žilavo sa znatnim vrijednostima dinamičke čvrstoće (Slika 77). Površinski sloj do dubine A ima temperaturu iznad Ac_3 i tu se postiže potpuno kaljenje. U zoni B, između Ac_3 i Ac_1 temperatura vrši se nepotpuno kaljenje i u strukturi se javlja martenzit i podeutektoidni ferit. U zoni C, zagrijavanje se vrši ispod Ac_1 temperature, pa se hlađenjem ne mijenja struktura.

Površinsko kaljenje može biti: potapanjem, plameno kaljenje i indukciono kaljenje.

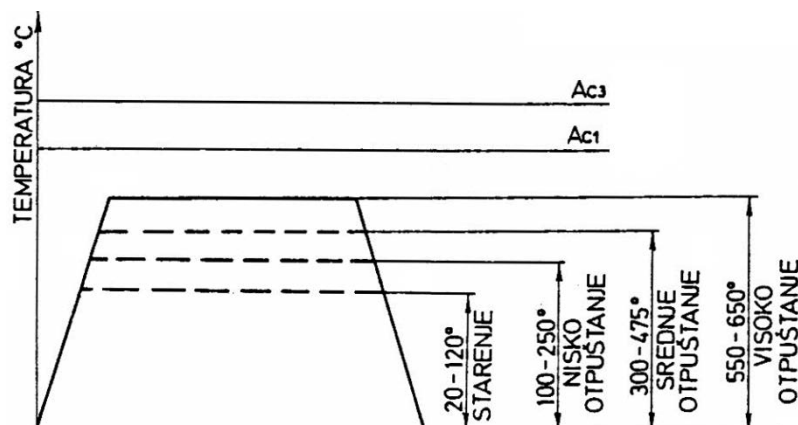


Slika 77. Dijagram površinskog kaljenja

2.6. Otpuštanje čelika

Otpuštanje čelika vrši se poslije kaljenja i ima za cilj smanjenje napona, transformaciju zaostalog austenita i izdvajanje karbida. Razlikujemo tri vrste otpuštanja (Slika 78):

- nisko,
- srednje,
- visoko.



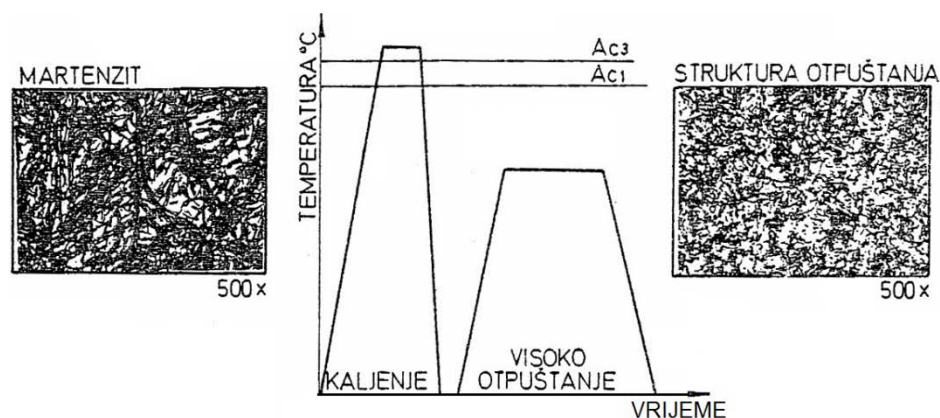
Slika 78. Dijagram otpuštanja čelika

Nisko otpuštanje se primjenjuje za mjerne alate, srednje za opruge, a visoko za djelove izložene udarnim opterećenjima.

2.7 Poboljšanje

Poboljšanje predstavlja kombinovani postupak kaljenja i visokog otpuštanja i izvodi se kod ugljeničnih i niskolegiranih čelika sa više od 0,25% C, u cilju dobijanja boljih mehaničkih osobina.

Poboljšanjem se postiže sitnozrna struktura otpuštanja (sorbit), čime se poboljšava granica tečenja, tvrdoća, a posebno udarna žilavost (Slika 79). Ovom tretmanu podvrgavaju se najčešće konstrukcioni čelici.



Slika 79. Dijagram postupka poboljšanja čelika

2.8 Greške koje nastaju pri termičkoj obradi

Najčešće greške u postupcima termičke obrade nastaju pri kaljenju, a to su:

- zaostali (unutrašnji) naponi,
- nedovoljna tvrdoća,
- povećana krtoš,
- razugljeničenje,
- oksidacija,
- deformacija oblika radnog komada,
- prskotine.

3. TERMIČKO – HEMIJSKA OBRADA

Termička obrada pri kojoj, osim strukturnih promjena dolazi i do izmjene hemijskog sastava u površinskom sloju putem apsorpcije i difuzije, naziva se termičko-hemijska ili termohemijska obrada.

Sistematizacija postupaka termohemijske obrade prikazana je na slici 80.

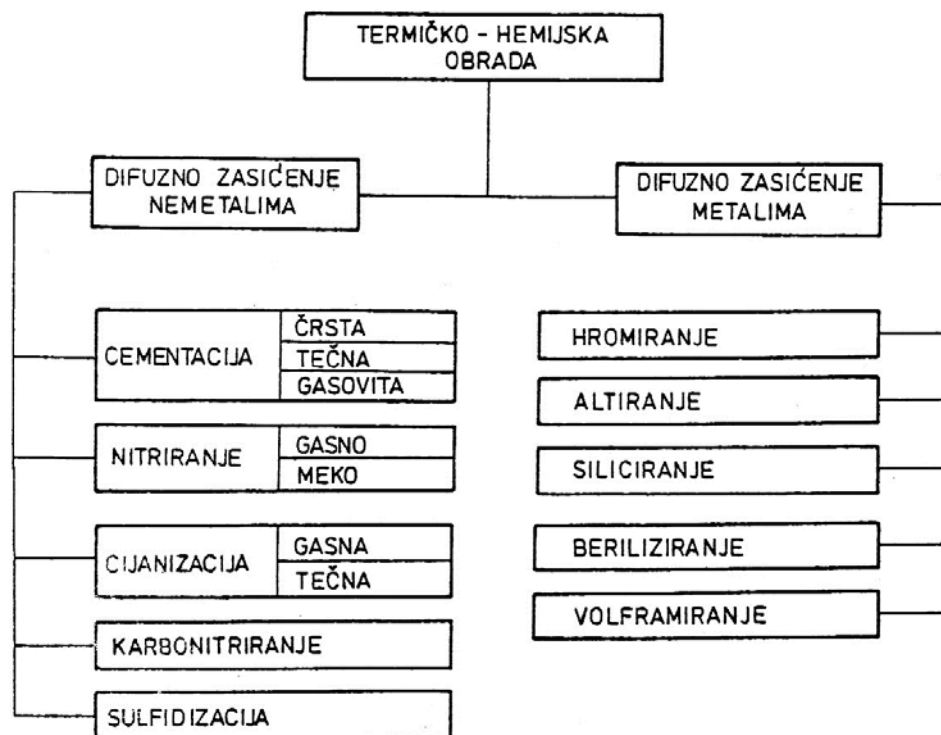
Postignute osobine su slične onima koje se postiže površinskim kaljenjem, s tim što termohemijska obrada ima sledeće prednosti:

- može se izvesti na predmetima složenog oblika,
- postiže se veća promjena osobina površinskog sloja,
- rijetka je pojava pregrijavanja,
- izraženija ravnomjernost otvrdnutog sloja.

Uopšteno govoreći, termohemijska obrada podrazumijeva izlaganje površine komada dejstvu odgovarajuće aktivne sredine (sredstva), pri čemu se površinski sloj obogaćuje nekim

elementima. Proces se odvija u nekoliko faza:

- disocijacija komponenata aktivne sredine,
- adsorpcija aktivnih atoma (jona) na površinu čelika,
- difuzija aktivnih atoma (jona) od površine prema unutrašnjosti.



Slika 80. Pregled postupaka termičko-hemijske obrade

Promjena sastava površinskog sloja zavisi od odnosa navedenih elementarnih procesa. Pošto je u ovom slučaju difuzija najsporiji proces, to je i najuticajniji.

3.1 Cementacija

Cementacija je proces obogaćivanja površinskog sloja niskougljeničnog čelika ugljenikom, sa ciljem da se poveća njegova tvrdoća, otpornost na habanje i dinamička čvrstoća.

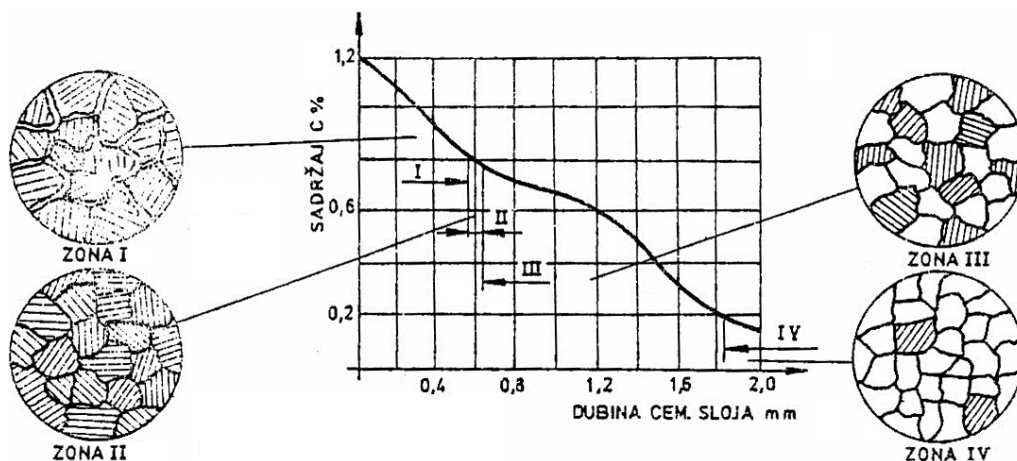
Osnovni cilj cementacije je dobijanje površine velike tvrdoće (60 HRC) otporne na habanje, kao i žilavog jezgra. To se postiže obogaćivanjem površinskog sloja ugljenikom do eutektoidne i nešto iznad eutektoidne koncentracije i naknadnim kaljenjem. Velika žilavost jezgra postiže se niskim sadržajem ugljenika kod čelika (0,1÷0,25% C). Dubina cementiranog sloja obično iznosi do 2,5 mm i u svakom slučaju ne smije preći 8% debljine mašinskog dijela. Sadržaj ugljenika u cementiranom sloju opada od površine prema centru komada.

Mikrostruktura cementiranog sloja sastoji se iz četiri zone (Slika 81):

- površinske zone I sa nadeutektoidnim sadržajem ugljenika i strukturom perlita i sekundarnog cementita;
- uske zone II sa eutektoidnim sadržajem ugljenika i perlitnom strukturom;
- prelazne zone III sa podeutektoidnim sadržajem ugljenika i strukturom perlita i ferita;
- zone IV polaznog sadržaja ugljenika sa feritno-perlitnom strukturom.

U zavisnosti od sredstva za cementaciju primjenjuje se:

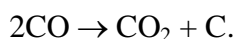
- cementacija u čvrstom sredstvu,
- cementacija u gasnoj sredini,
- cementacija u tečnoj sredini.



Slika 81. Promjena sadržaja ugljenika u cementiranom sloju

3.1.1 Cementacija u čvrstom sredstvu

Ovaj postupak sastoji se u dugotrajnom zagrijavanju na temperaturi $900 \div 950 \text{ }^\circ\text{C}$, djelova koji se hermetički pakuju u metalne sanduke, zajedno sa sredstvom za cementaciju. Kao sredstvo za cementaciju koristi se smješa drvenog uglja i barijum-karbonata (BaCO_3) kao katalizatora. Dugotrajnim zagrijavanjem C sagorijeva do CO koji se kasnije razlaže po reakciji:



Ovako obrazovani slobodni atomi amornog ugljenika difunduju u komad i zasićuju njegovu površinu. Brzina cementacije iznosi $0,1 \div 0,12 \text{ mm/h}$. To je dugotrajan proces i primjenjuje se u maloserijskoj proizvodnji. Nakon ovog vida cementacije vrši se kaljenje.

3.1.2 Cementacija u gasnoj sredini

Gasna cementacija se izvodi zagrijavanjem djelova u komorama kroz koje struji aktivni gas (propan, butan, generatorski gas, ...). Na temperaturi cementacije, iz aktivnih gasova oslobađa se ugljenik koji difunduje u tretirani komad. U odnosu na cementaciju u čvrstom stanju, ovaj postupak je efikasniji, čistiji i može se lakše kontrolisati. Dubina cementiranog sloja zavisi od temperature i vremena cementacije. Brzina cementacije orijentaciono iznosi $0,2 \text{ mm/h}$.

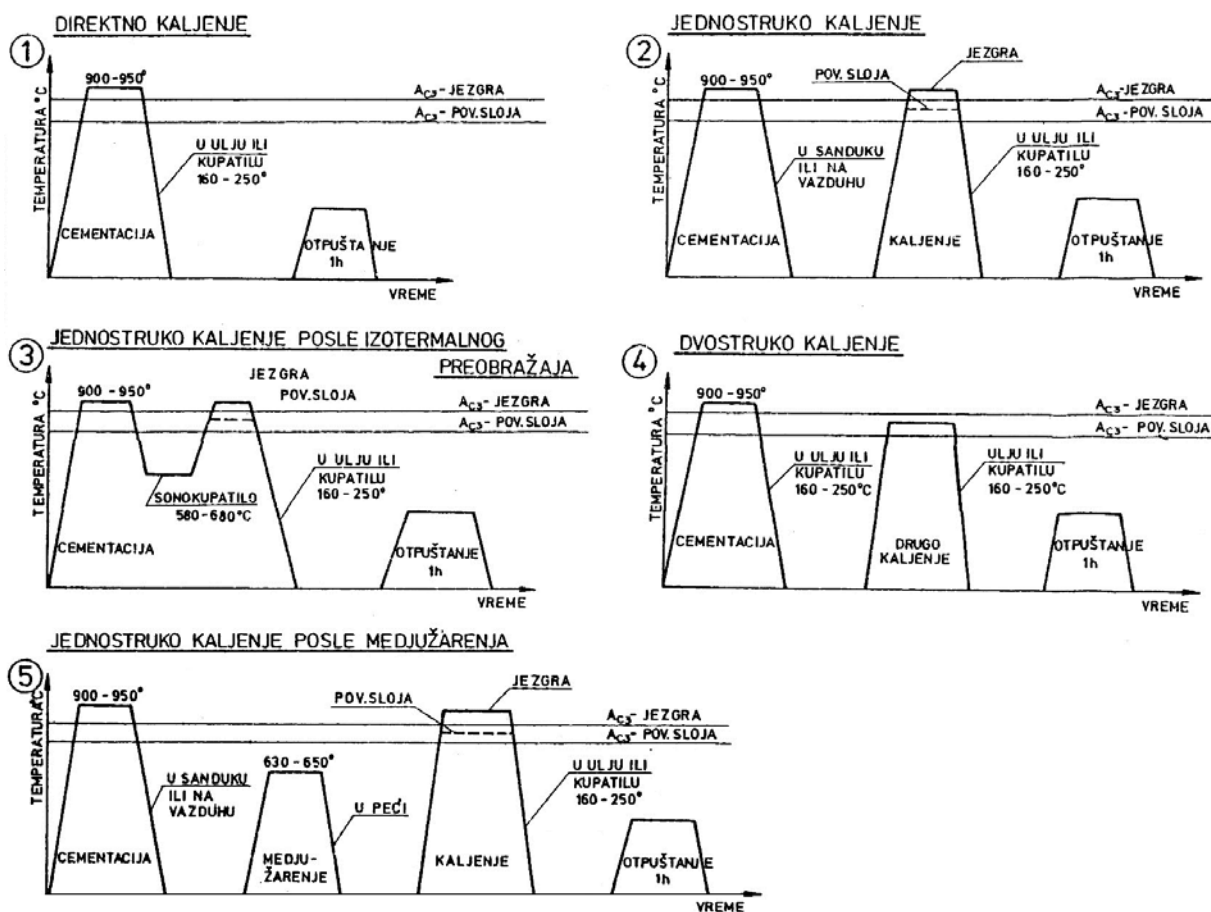
3.1.3 Cementacija u tečnoj sredini

Ovaj postupak izvodi se u sonim kupatilima. Zagrijavanjem na $850 \text{ }^\circ\text{C}$, so raspada i oslobađa se elementarni ugljenik, koji difunduje i zasićuje površinu čelika. Prednost ove cementacije je kratko vrijeme procesa i mogućnost direktnog kaljenja sa $850 \text{ }^\circ\text{C}$. Nedostatak je mala dimenzija predmeta koji se obrađuje i neravnomjerna dubina cementiranog sloja.

3.1.4 Termička obrada cementiranih slojeva

Zavisno od vrste čelika za cementaciju mogu se primijeniti sledeći vidovi termičke obrade cementiranih slojeva (Slika 82):

- direktno kaljenje,
- jednostruko kaljenje,
- jednostruko kaljenje poslije izotermalnog preobražaja,
- dvostruko kaljenje,
- jednostruko kaljenje poslije međuzarenja.



Slika 82. Pregled režima termičke obrade poslije cementacije

3.2 Nitiranje

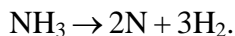
Nitiranje je proces obogaćenja površinskog sloja komada azotom (N), pri čemu se povećava: tvrdoća, otpornost na habanje, otpornost na koroziju i otpornost na povišenu temperaturu.

Nitiranje se izvodi na temperaturi ispod 600 °C. Rastvaranje azota u željezu može se pratiti preko dijagrama stanja Fe-N.

Svi čelici, koji u svom sastavu imaju legirajuće elemente sklone obrazovanju nitrida (Al, Cr, Mo) podvrgavaju se ovom postupku termohemijske obrade.

Razlikuje se nitiranje u gasnoj sredini i nitiranje u sonim kupatilima (meko nitiranje).

Gasno nitiranje izvodi se u struji amonijaka (NH₃), koji se na 200 °C raspada po reakciji:



Nastali azot difunduje i u površinskom sloju čelika gradi nitride. Dubina nitriranog sloja se povećava sa rastom temperature i vremena nitiranja.

3.3 Cijanizacija i karbonitriranje

Ovi postupci sastoje se u istovremenom obogaćivanju površine čeličnih djelova ugljenikom i azotom, posle čega se izvodi kaljenje. Cilj je da se postigne velika površinska tvrdoća kod alatnih čelika i otpornost prema habanju kod konstrukcionih čelika.

Cijanizacija – obavlja se potapanjem djelova u tečna sredstva, odnosno rastopljene soli kao što su: NaCN, KCN, Ca(CN)₂ i dr. Pored alatnih i konstrukcionih čelika cijaniziraju se i djelovi avionskih motora i automobila više klase (rukavci koljenastih vratila, bregaste osovine,

stabla ventila, cilindarske košuljice, brizgaljke dizel motora i sl.), zatim vretena mašina alatki, zupčanici, ekstruderi, matrice za presovanje plastike i kontrolnici.

U pogledu kvaliteta cijanizacija je slična cementaciji, ali daje znatno veću tvrdoću - najveću koja se može postići prije naknadne termičke obrade, koja se sastoji iz kaljenja i niskog otpuštanja.

Karbonitriranje – postupak difuznog unošenja ugljenika i azota iz odgovarajuće gasne atmosfere u plitke površinske slojeve čeličnih djelova. Posle toga obavlja se kaljenje, najčešće u ulju. Po svojoj suštini ovaj postupak je blizak visokotemperaturnoj cijanizaciji, a po rezultatima cementaciji. Zato karbonitriranje često zamjenjuje cementaciju jer kraće traje i daje čistije površine (zahvaljujući azotu).

3.4 Postupci sa difuzionim zasićenjem metalima

Cilj ovih postupaka je da se uvođenjem odgovarajućih elemenata u površinske slojeve čelika i livenih gvozdja postignu povoljna svojstva (povećana otpornost prema habanju, koroziji itd.). Za difuznu metalizaciju upotrebljavaju se uglavnom sprasene ferolegure (feroaluminijum, ferohrom i ferosilicijum) sa dodatkom nišadora NH_4Cl . Elementi Al, Cr, Si iz ferolegura, sa α -Fe grade supstitucijske čvrste rastvore, koji poboljšavaju osobine površinskih slojeva.

Alitiranje – obogaćivanje površinskih slojeva aluminijumom, radi povećanja otpornosti na oksidaciju do oko $900\text{ }^\circ\text{C}$ i koroziju u morskoj vodi.

Siliciranje – obogaćivanje površinskih slojeva silicijumom, što doprinosi korozionoj otpornosti u morskoj vodi i kiselinama HNO_3 , H_2SO_4 , HCl .

Hromiranje – obogaćivanje površinskih slojeva hromom, što daje visoku površinsku tvrdoću, otpornost na habanje, vatrootpornost i korozionu otpornost u morskoj vodi i HNO_3 .

4. TERMOMEHANIČKA OBRADA

Termo-mehanička obrada je način obrade čelika, zasnovan na plastičnoj deformaciji u austenitnoj oblasti i naknadnoj martenzitnoj transformaciji. U poređenju sa konvencionalnim poboljšanjem dobija se viša granica tečenja, povećanje zatezne čvrstoće i plastičnosti. Na osnovu temperature na kojoj se izvodi termo-mehanička obrada razlikuje se:

- *visokotemperaturna termo-mehanička obrada i*
- *niskotemperaturna termo-mehanička obrada.*

Kod visokotemperaturne termo-mehaničke obrade čelik se obrađuje plastičnom deformacijom u temperaturnoj oblasti stabilnog austenita (iznad Ac_3 tačke). Posle završenog toplog valjanja izvodi se brzo hlađenje vodenim mlazem što sprečava difuzionu promjenu austenita, a omogućava martenzitnu transformaciju. Potom se valjani proizvodi (ploče, profili, itd.) nisko otpuštaju.

Pri niskotemperaturnoj termo-mehaničkoj obradi čelik se prvo austenitizuje (iznad tačke Ac_3), potom naglo hladi do temperaturnog intervala metastabilnog austenita (oko $500\text{ }^\circ\text{C}$). Na toj temperaturi čelik se preradjuje valjanjem, pa zatim direktno kali i najzad nisko otpušta. Na ovaj način mogu se prerađivati samo čelici koji na dijagramu izotermalnog razlaganja imaju potpuno razdvojene oblasti perlitne i beinitne transformacije.

PRILOG – 1

Označavanje čelika po EN standardu

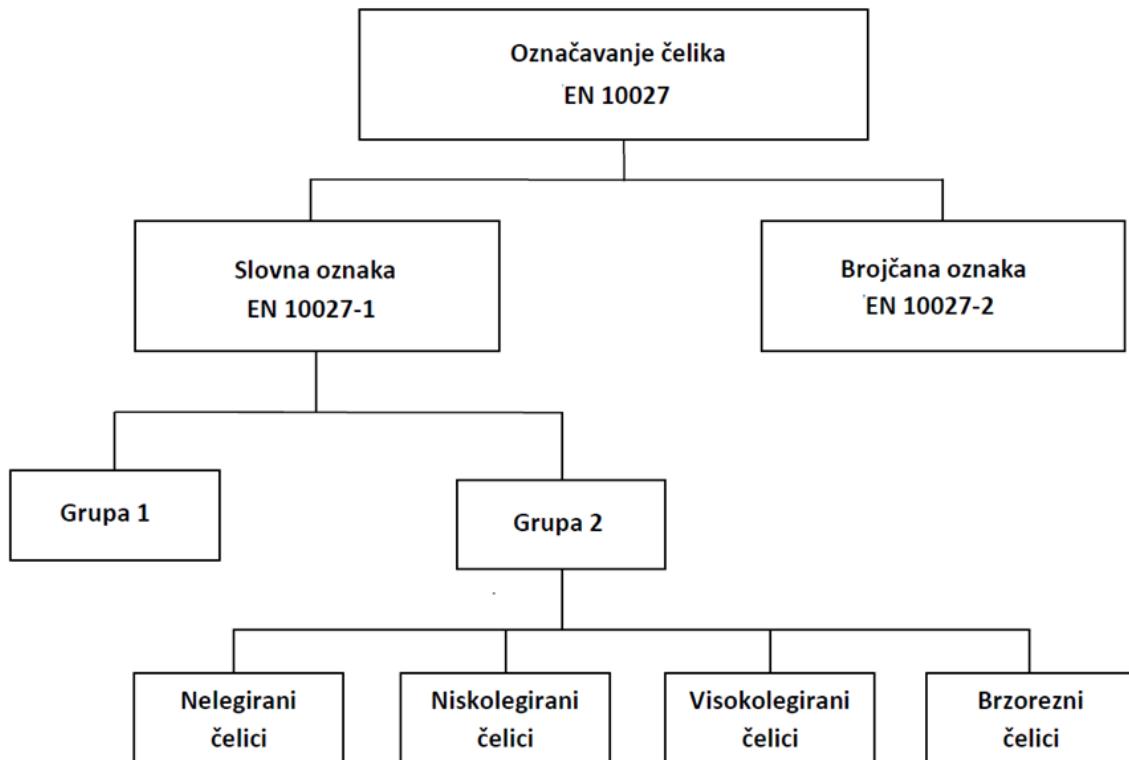
OZNAČAVANJE ČELIKA PO EN STANDARDU

EN je oznaka za standarde i srodne dokumente koje donosi *Evropski komitet za standardizaciju* (CEN), a koji su prihvaćeni od nacionalnih standarda.

Crnogorski standardi koji propisuju sistem za označavanje čelika su:

MEST EN 10027-1:2017 i **MEST EN 10027-2:2017**.

Na slici 1. šematski je prikazan osnovni sistem označavanja čelika po EN standardu.



Slika 1. Označavanje čelika po EN 10027 standardu

EN 10027-1, OZNAČAVANJE ČELIKA – SLOVIMA I BROJEVIMA

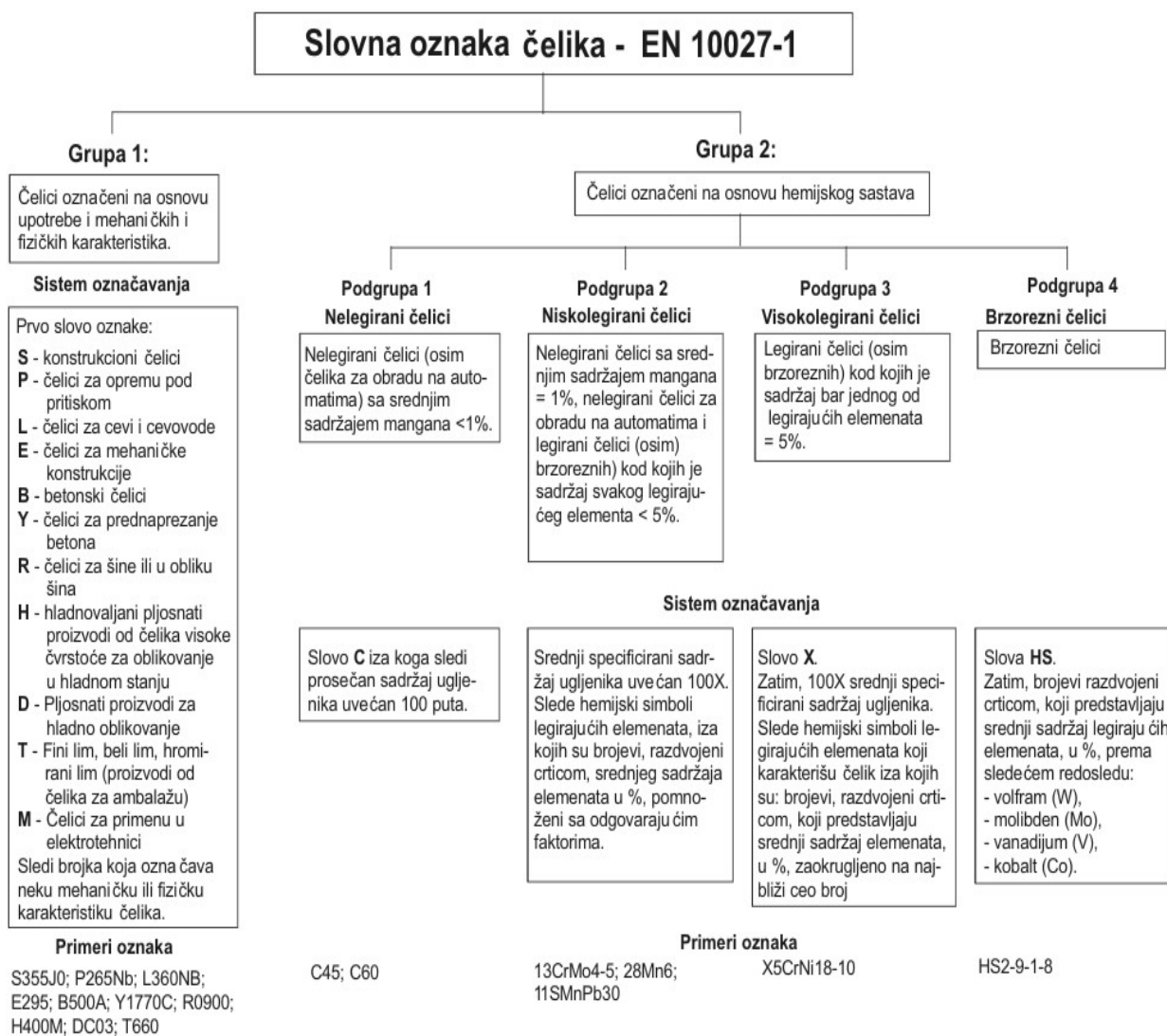
Ovim standardom utvrđuju se pravila za označavanje čelika slovnim i brojčanim oznakama koje izražavaju neke osnovne karakteristike, na primjer: osnovnu primjenu, mehaničke osobine, fizičke osobine, hemijske osobine, da bi čelici mogli da se identifikuju na pregledan način.

Prema ovom standardu, čelici se označavaju, odnosno podjeljeni su u 2 grupe (Slika 2):

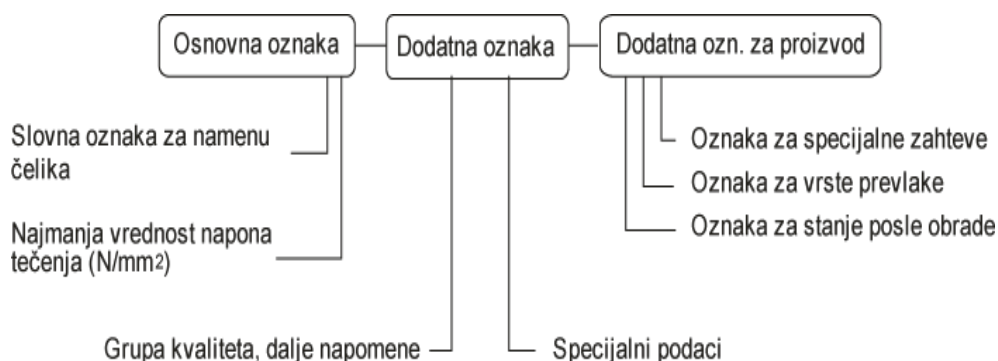
- **Grupa 1** - čelici označeni na osnovu upotrebe i mehaničkih i fizičkih karakteristika;
- **Grupa 2** - čelici označeni na osnovu hemijskog sastava.

Grupa 1 – sistem za označavanje

Grupu 1 čine čelici koji se označavaju u saglasnosti sa njihovom primjenom i mehaničkim i fizičkim karakteristikama. Ova oznaka se sastoji iz jednog ili više slova, koja su u vezi sa primjenom čelika, a dalje slijede brojevi koji su u vezi sa karakteristikama čelika (Slika 3).



Slika 2. Označavanje čelika po EN 10027-1 (grafički prikaz)



Slika 3. Označavanje čelika iz Grupe 1 (grafički prikaz)

Simbol na prvom mestu osnovne oznake je slovo koje označava primjenu čelika, a kada je čelik specificiran u obliku odlivka stavlja se slovna oznaka G. U tabeli 1. prikazani su prvi simboli osnovne oznake čelika Grupe 1 prema njihovoj primjeni.

Tabela 1. Prvi simbol osnovne oznake čelika Grupe 1

Simbol	Vrsta čelika prema karakteristikama
S	Konstruktivni čelici
P	Čelici za opremu pod pritiskom
L	Čelici za cevovode
E	Čelici za mehaničke konstrukcije
B	Betonski čelici
Y	Čelici za prednaprezanje betona
R	Čelici za šine ili u obliku šina
H	Hladnovaljani pljosnati proizvodi od čelika visoke čvrstoće za oblikovanje u hladnom stanju
D	Pljosnati proizvodi za hladno oblikovanje
T	Fini lim, beli lim, hromirani lim (proizvodi od čelika za ambalažu)
M	Čelici za primenu u elektrotehnici

Simbol na drugom mjestu osnovne oznake je broj (tri cifre) koji označava mehaničke karakteristike čelika i to:

- najmanju vrijednost utvrđenu za napon tečenja (R_e) u N/mm^2 (MPa) za opseg najmanjih debljina, za **S**, **P**, **L** i **E** čelike;
Primjeri: S355JO, P265NB, L360QB, E295
- vrijednost utvrđenu za napon tečenja (R_e) u N/mm^2 , za **B** čelike;
Primjer: B500A
- vrednost utvrđena za zateznu čvrstoću (R_m) u N/mm^2 , za **Y** čelike;
Primer: Y1770C
- najmanju vrijednost utvrđenu za zateznu čvrstoću (R_m) u N/mm^2 , za **R** čelike;
Primjer: R0900Mn
- najmanju vrijednost utvrđenu za napon tečenja (R_e) u N/mm^2 ili ako je specificirana samo zatezna čvrstoća (R_m) slovo **T** iza kojeg se piše broj koji označava najmanju vrijednost utvrđenu za zateznu čvrstoću (R_m) u N/mm^2 za **H** čelike;
Primjer: H420M
- jedan od tri simbola: **C** (za hladnovaljane proizvode), **D** (za toplovaljane proizvode namijenjene za oblikovanje u hladnom stanju) ili **X** (za proizvode za koje nijesu specificirani uslovi za valjanje) za **D** čelike;
Primjer: DC04EK
- slovo **H** i broj koji predstavlja utvrđenu srednju vrijednost tvrdoće za jednostruko redukovane proizvode ili broj koji predstavlja nazivnu vrijednost utvrđenu za napon tečenja (R_m) u N/mm^2 za dvostruko redukovane proizvode - za **T** čelike;
Primjer: TH52, T660
- najveći dozvoljeni gubitak ($\times 100$) u W/kg , nazivna debljina ($\times 100$) u mm i slovo (**A**, **D**, **E**, **N**, **S**, **P**) kojim se označava vrsta magnetskog čelika za **M** čelike;
Primjer: M400-50A

Označavanje čelika *Grupe 1* može se bolje sagledati iz tabele 2.

Tabela 2. Označavanje čelika *Grupe 1*

Osnovna oznaka		Dodatna oznaka				
Slova ozn.	Mehanička svojstva	Prvi dio			Drugi dio	
S =Konstrukcioni čelik G = liveni čelik (ako je potrebno)	Čelici za opštu primenu <i>Primjer: S355J0</i> Najmanja vrijednost napona tečenja (R_e), u N/mm^2 , za opseg najmanjih debljina (tri brojke)	Energija udara u J (Joule)		Temp. ispitiv.	C = specijalno oblikovanje u hladnom stanju D = prevlaka nanosena potapanjem u rastvor E = za emajliranje F = za kovanje H = šuplji profili L = za niske temperature M = termomehaničko oblikovanje N = normalizovanje ili normalizaciono valjanje O = <i>offshore</i> (za naftne platforme) P = potporni zid Q = kaljenje i otpuštanje S = za brodogradnju T = za cijevi W = otpornost prema atmosferskoj koroziji Slova i brojke = Hemijske oznake za propisane dodatne elemente. Npr. Cu daje se zajedno sa 10 puta uvećanom srednjom vrijednošću njegovog sadržaja (zaokruženo na 0,1).	
		27 J	40 J	60 J		°C
		JR	KR	LR		+ 20
		J0	K0	L0		0
		J2	K2	L2		- 20
		J3	K3	L3		- 30
		J4	K4	L4		- 40
		J5	K5	L5		- 50
		J6	K6	L6		- 60
				A = otvrdnjavanje termičkim taloženjem M = termomehaničko valjanje N = normalizovanje ili normalizaciono valjanje Q = kaljenje i otpuštanje G = druge osobine, kada se zahtijeva - sa 1 ili 2 naredne cifre.		
P =	Čelici za sudove pod pritiskom <i>Primjer: P265NB</i> Najmanja vrijednost napona tečenja (R_e), u N/mm^2 , za opseg najmanjih debljina (tri brojke)	M = termomehaničko valjanje N = normalizovanje ili normalizaciono valjanje Q = kaljenje i otpuštanje B = boce za gas S = jednostavne sudove pod pritiskom T = cijevi G = druge osobine, kada se zahtijeva - sa 1 ili 2 naredne cifre.			H = povišena temperatura L = niska temperatura R = temperatura okoline X = niska i povišena temperatura	
L =	Provodne cijevi <i>Primjer: L360QB</i> Najmanja vrijednost napona tečenja (R_e), u N/mm^2 , za opseg najmanjih debljina (tri brojke)	M = termomehaničko valjanje N = normalizovanje ili normalizaciono valjanje Q = kaljenje i otpuštanje G = druge osobine, kada se zahtijeva - sa 1 ili 2 naredne cifre.			Klasa zahtjeva (slovo) ukoliko se zahtijeva stavlja se jedna brojka	

nastavak tabele 2.

E=	<p>Čelici za mehaničke konstrukcije</p> <p>Primjer: E295</p> <p>Najmanja vrijednost napona tečenja (R_e), u N/mm^2, za opseg najmanjih debljina (tri brojke).</p>	<p>G = druge osobine, kada se zahtijeva - sa 1 ili 2 naredne cifre.</p>	<p>C = pogodnost za izvlačenje u hladnom stanju</p>	Tabela 10.
B=	<p>Betonski čelici</p> <p>Primjer: B500A</p> <p>Najmanja vrijednost napona tečenja (R_e), u N/mm^2, za opseg najmanjih debljina (tri cifre).</p>			Tabela 10.
Y=	<p>Čelici za prednaprezanje betona</p> <p>Primjer: Y1770C</p> <p>Najmanja vrijednost zatezne čvrstoće (R_m) u N/mm^2.</p>	<p>C = hladnovučena žica H = šipke oblikovane u toplom stanju ili prednapregnute Q = kaljena i otpuštena žica S = užad G = druge osobine, kada se zahteva - sa 1 ili 2 naredne cifre.</p>		Tabela 13.
R=	<p>Čelici za šine</p> <p>Primjer: R0900Mn</p> <p>Najmanja vrijednost zatezne čvrstoće (R_m) u N/mm^2 (slede četiri cifre, eventualno nula se stavlja i spred).</p>	<p>M = viši sadržaj Mn Cr = legiran hromom</p> <p>Slova i brojke = G = druge osobine, kada se zahtijeva - sa 1 ili 2 naredne cifre.</p>	<p>Q = kaljenje i otpuštanje</p>	
H(T)=	<p>Hladnovaljani pljosnati proizvodi od čelika visoke čvrstoće za oblikovanje u hladnom stanju</p> <p>Primjer: H420M</p> <p>Najmanja vrijednost granice tečenja (R_e) u N/mm^2 (slijede tri brojke). Najmanja vrijednost zatezne čvrstoće (R_m) u N/mm^2 (HT i tri brojke slijede).</p>	<p>M = termomehaničko valjanje i valjanje u hladnom stanju B = otvrdnjavanje starenjem P = sa fosforom X = dvofazni (čelik) Y = sa slobodnim intersticijama G = druge osobine, kada se zahtijeva - sa 1 ili 2 naredne cifre.</p>		Tabela 9.

nastavak tabele 2.

D=	<p>Pljosnati proizvodi za hladno deformisanje</p> <p><i>Primjer: DC04EK</i> C = hladnovaljano, iza su dva mjesta D = valjano u toplom stanju za direktno oblikovanje u hladnom stanju, iza su dva mjesta X = proizvod za koji nisu specificirani uslovi za valjanje, iza su dva mjesta.</p>	<p>D = za nanošenje prevlake u toplom stanju (potapanjem u rastop) EK = za uobičajeno emajliranje ED = za direktno emajliranje H = za šuplje profile T = za cijevi Slova i brojke = Hemijski simbol utvrđenog legirajućeg elementa, na primjer Cu, sa jednim brojem koji predstavlja desetostruku srednju vrijed. (zaokruženo na 0,1%) od utvrđenog opsega sadržaja tog elementa G = druge osobine, kada se zahtijeva</p>	Tabele 9 i 10.
T(H)=	<p>Limovi i trake za pakovanje</p> <p><i>Primjer: T660</i> Nazivna vrednost napona tečenja (Re) N/mm^2 (slijede tri brojke), za dvostruko redukovane proizvode. <i>Primjer: TH52</i> Propisana vrijednost tvrdoće za jednostruko redukovane proizvode (TH i slijede dvije brojke).</p>	Dodatne oznake nijesu predviđene.	Dodatne oznake nijesu predviđene.
M=	<p>Elektrolimovi i trake</p> <p><i>Primjer: M400-50A</i> Najveći dozvoljeni gubitak u promjeni polariteta u $W/kg \times 100$ (slijede četiri cifre) $100 \times$ nazivna debljina u <i>mm</i>. Oba podatka su razdvojeni crticom.</p>	<p><i>Napomene:</i> Za magnetnu indukciju pri 50 Hz od 1.5 T (<i>Tesla</i>) A = neorijentisana struktura (zrno) D = nelegiran poluproizvod (bez završnog žarenja) E = legiran poluproizvod (bez završnog žarenja) N = normalno orijentisana struktura (zrno) Za magnetnu indukciju od 1,7 T pri frekvenciji od 50 Hz S = orijentisana struktura (zrno) sa visokom permeabilnošću P = orijentisana struktura, sa niskom permeabilnošću</p>	Dodatne oznake nijesu predviđene.

Tabela 3. Dodatna oznaka - oznake za specijalne zahtjeve

Oznaka	Značenje
+H	Sposobnost za kaljenje (prokaljivost)
+Z15	Garantovane osobine po cijeloj debljini; najmanje suženje 15 %.
+Z25	Garantovane osobine po cijeloj debljini; najmanje suženje 25 %.
+Z35	Garantovane osobine po cijeloj debljini; najmanje suženje 35 %.

NAPOMENA: Oznake se odvajaju od prethodnih znakom plus (+). Ove oznake se odnose na specijalne zahtjeve za nešto što predstavlja uobičajenu karakteristiku čelika. Iz praktičnih razloga ove oznake su svrstane u oznake za proizvode od čelika.

Tabela 4. Dodatna oznaka - oznake za vrste prevlaka

Oznaka	Značenje
+A	Prevlaka od aluminijuma nanescna toplim postupkom (potapanjem u rastop)
+AR	Prevlaka od aluminijuma nanescna oblaganjem
+AS	Prevlaka od legure aluminijum-silicijum
+AZ	Prevlaka od legure aluminijum-cink (> 50 % Al)
+CE	Prevlaka od hrom / hrom-oksida nanescna elektrolitičkim postupkom (ECCS)
+CU	Prevlaka od bakra
+IC	Neorganska prevlaka
+O	Organska prevlaka
+S	Prevlaka od kalaja nanescna toplim postupkom (potapanjem u rastop)
+SE	Prevlaka od kalaja nanescna elektrolitičkim postupkom
+T	Prevlaka od legure olovo-kalaj nanescna toplim postupkom (potapanjem u rastop)
+TE	Prevlaka od legure olovo-kalaj nanescna elektrolitičkim postupkom
+Z	Prevlaka od cinka nanescna toplim postupkom (galvanizacijom)
+ZA	Prevlaka od legure cink-aluminijum (> 50 % Zn) nanescna toplim postupkom (potapanjem u rastop)
+ZE	Prevlaka od cinka nanescna elektrolitičkim postupkom
+ZF	Prevlaka od legure cink-železo nanescna toplim postupkom (potapanjem u rastop)
+ZN	Prevlaka od legure cink-nikal nanescna elektrolitičkim postupkom

NAPOMENA: Ove oznake se odvajaju od prethodnih znakom plus (+); Da bi se izbjeglo miješanje sa ostalim oznakama, ispred ovih oznaka može se staviti slovo **S**, na primer: **+SA**.

Tabela 5. Dodatna oznaka - oznake za stanje posle obrade

Oznaka	Značenje	Oznaka	Značenje
+A	Žareno radi omekšavanja (smanjenje tvrdoće)	+NT	Normalizovano i otpušteno
+AC	Žareno radi globulizacije (sferoidizacije) ugljenika	+P	Otvrdnjavanje termičkim taloženjem
+AR	Neobrađeno posle valjanja (bez posebnih uslova valjanja ili termičke obrade)	+Q	Kaljeno
+AT	Žareno radi rastvaranja	+QA	Kaljeno na vazduhu
+C	Otvrdnjavanje hladnom obradom	+QO	Kaljeno u ulju
+C _{mn}	Otvrdavanje hladnom obradom da bi se dobila najmanja zatezna čvrstoća od <i>mn</i> , u <i>N/mm²</i> .	+QT	Kaljeno i otpušteno
+CR	Valjano u hladnom stanju	+QW	Kaljeno u vodi
+DC	Uslov za isporuku – izbor proizvođača	+RA	Žareno radi rekristalizacije
+FP	Termički obrađeno radi dobijanja feritno-perlitne strukture i tvrdoće u određenom opsegu	+S	Termički obrađeno radi sečenja makazama (obrezivanja) u hladnom stanju
+HC	Valjano u toplom stanju i otvrdnuto u hladnom stanju	+T	Otpušteno
+I	Termički obrađeno na konstantnoj temperaturi (izotermički)	+TH	Termički obrađeno za dobijanje tvrdoće u određenom opsegu
+LC	Ravnanje (dresiranje) ili vučenje u hlad.stanju	+U	Neobrađeno
+M	Termomehanički oblikovano	+WW	Prerađeno u toplom stanju
+N	Normalizovano ili normalizaciono oblikovano		

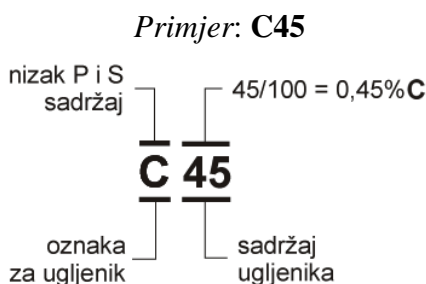
NAPOMENA: Ove oznake se odvajaju od prethodnih znakom plus (+), da bi se izbjeglo miješanje sa ostalim oznakama. Ispred ovih oznaka može se staviti slovo **T**, na primer: **+TA**.

Grupa 2 – sistem za označavanje

Grupu 2 čine čelici koji se označavaju u saglasnosti sa svojim hemijskim sastavom. Čelici su prema ovom sistemu podijeljeni u četiri podgrupe u zavisnosti od sastava legirajućih elemenata (*Tabela 7*).

1) Nelegirani čelici

Čelici sa srednjim sadržajem mangana $< 1\%$. Oznaka se sastoji od slova **C** i broja koji označava procentualni sadržaj ugljenika ($\times 100$).



2) Niskolegirani čelici

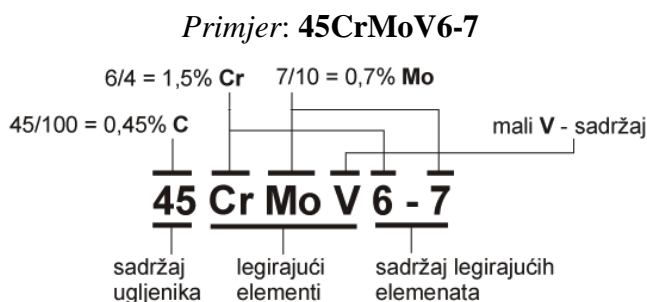
Čelici sa srednjim sadržajem mangana $\geq 1\%$, nelegirani čelici za obradu na automatima i legirani čelici (izuzev brzoreznih čelika) gde je sadržaj svakog legirajućeg elementa manji od 5%.

Slovna oznaka se sastoji od broja koji je 100 puta uvećan i specificira prosječni sadržaj ugljenika, koga slijede hemijski simboli koji predstavljaju legirajuće elemente koji karakterišu čelik (po opadajućem redosledu vrijednosti njihovih sadržaja), praćeno sa brojevima koji pokazuju vrijednosti sadržaja indiciranih vrijednosti sadržaja legirajućih elemenata. Ovi kasniji brojevi predstavljaju, respektivno, prosječni procentni sadržaj indicirajućeg elementa, uvećan faktorom koji zavisi od elementa, kao što je prikazano u tabeli 6.

Tabela 6. Faktori za legirajuće elemente

Element	Faktor
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

Brojevi koji se odnose na razl. elemente su zaokruženi na najbliži ceo broj i odvojeni su crticom.

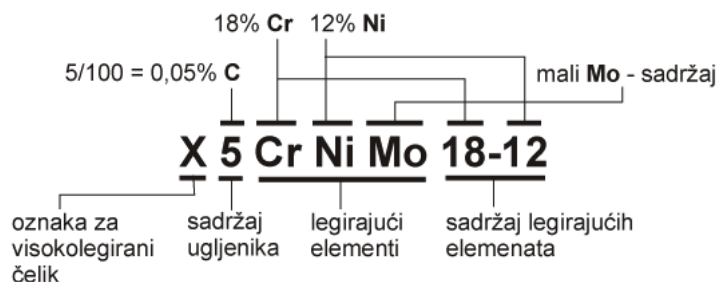


3) Visokolegirani čelici

Legirani čelici (osim brzoreznih) gde je sadržaj bar jednog legirajućeg elementa $\geq 5\%$.

Oznaka počinje slovom **X**, sledi broj koji je 100 puta uvećan procentni sadržaj ugljenika, koga slede hemijski simboli koji predstavljaju legirajuće elemente po opadajućem redosledu u zavisnosti od njihovog sadržaja. Ovdje broj predstavlja, respektivno, prosječan procentni sadržaj indiciranih elemenata, zaokruženih na najbliži broj i razdvojeni crticom.

Primjer: X5CrNiMo18-12



4) Brzorezni čelici

Oznaka se sastoji od slova **HS** koga slijede brojevi koji pokazuju vrijednosti procentnih sadržaja legirajućih elemenata po redosledu: volfram (W), molibden (Mo), vanadijum (V), kobalt (Co). Svaki broj predstavlja prosječni procentni sadržaj respektivnog elementa, zaokruženog na najbliži cio broj, sa brojevima različitih elemenata razdvojenih crticama.

Napomena: Za obje grupe (Grupa 1 i Grupa 2), ukoliko ispred imena čelika stoji slovo **G**, onda se čelik odnosi na liv.

Primjer: HS10-4-3-10

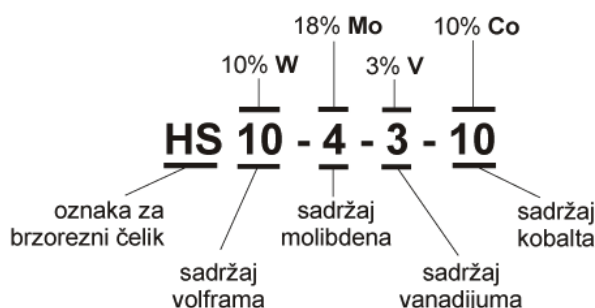


Tabela 7. Označavanje čelika **Grupe 2**

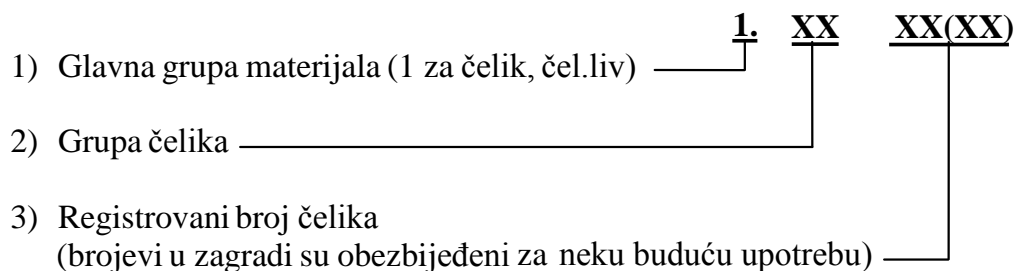
Podgrupe	Osnovna oznaka		Dodatna oznaka											
	Oznaka	Sadržaj C	Prvi dio	Drugi dio										
1. Nelegirani čelici	C = G = liveni čelik (ako je potrebno)	Nelegirani čelici sa srednjim sadržajem Mn < 1% izuzev kod čelika za obradu na automatima <i>Primjer: C35E</i> 100 × srednji utvrđeni sadržaj ugljenika, ako opseg sadržaja ugljenika nije utvrđen, mora se izabrati odgovarajuća reprezentativna vrijednost.	E = propisani max. S-sadržaj R = propisani opseg S-sadržaja D = za žicu za izvlačenje C = za oblikovanje u hladnom stanju S = za opruge T = za alate W = za žicu za elektrode G = ostale karakteristike, a ako je potrebno u nastavku je 1 ili 2 mjesta Iza oznake E i R može biti jedno mjesto koje predstavlja 100× najveći ili srednji sadržaj S zaokruženo na najbliži 0,1%.	Slova i cifre = Hemijski simbol utvrđenog legirajućeg elementa, na primjer Cu, sa jednim brojem koji predstavlja desetstruku srednju vrijednost (zaokružuje se na 0,1) od utvrđenog opsega sadržaja tog elementa										
2. Niskolegirani čelici	G = liveni čelik (ako je potrebno)	Nelegirani čelici sa srednjim sadržajem Mn ≥ 1%, nelegirani čelici za obradu na automatima i legirani čelici (osim brzoreznih) kod kojih je sadržaj svakog legirajućeg elementa < 5%. <i>Primjer: 28Mn6</i> 100 × srednji utvrđeni sadržaj ugljenika. ako opseg sadržaja ugljenika nije utvrđen, mora se izabrati odgovarajuća reprezentativna vrednost.	Legirajući elementi: Slova = Hemijski simboli legirajućih elemenata koji karakterišu čelik i iza kojih su: Brojke = brojevi, razdvojeni crticom, koji predstavljaju srednji sadržaj elemenata, u %, umnožen sledećim faktorima: <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Faktor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cr, Co, Mn, Ni, Si, W</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Ce, N, P, S</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>1000</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Faktor	Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4	Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10	Ce, N, P, S	100	B	1000	Dodatni simboli nisu predviđeni.
Element	Faktor													
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4													
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10													
Ce, N, P, S	100													
B	1000													
3. Visokolegirani čelici	X = G = liveni čelik (ako je potrebno)	Legirani čelici (osim brzoreznih) kod kojih je sadržaj bar jednog od legirajućih elemenata ≥ 5% <i>Primjer: X5CrNi18-10</i> 100 × srednji utvrđeni sadržaj ugljenika. ako opseg sadržaja ugljenika nije utvrđen, mora se izabrati odgovarajuća reprezentativna vrednost.	Legirajući elementi: Slova = Hemijski simboli za karakteristične legirajuće elemente poređani po opadajućem sadržaju elementa (pri istoj vrijednosti sadržaja uzima se alfabetski redosled elementa). Brojke = Brojevi, razdvojeni crticom, koji predstavljaju srednji sadržaj elemenata, u %, zaokruženo na najbliži cio broj.											
4. Brzorezni čelici	HS=	Brzorezni čelici <i>Primjer: HS2-9-1-8</i> Brojevi, koji su razdvojeni crticama, predstavljaju % sadržaj legirajućih elemenata po sledećem redosledu: W, Mo, V, Co	Dodatne oznake nisu predviđene.	Dodatne oznake nisu predviđene.										

EN 10027-2, OZNAČAVANJE ČELIKA – BROJČANI SISTEM

U ovom dijelu standarda utvrđuje se sistem za dodjeljivanje brojeva za označavanje vrsta čelika. U standardu se daju struktura brojčanih oznaka čelika, kao i organizacija za njihovo registrovanje, dodjeljivanje i proširivanje. Ovaj sistem naziva se *brojčani sistem*, a za svaku vrstu čelika dodeljuje se samo jedna brojčana oznaka.

Broj se sastoji od fiksnog broja cifara i zato je mnogo pogodniji za elektronsku obradu podataka.

Broj je oblika: **1.XXXX** gde se **1.** odnosi na čelik, a ostali brojevi se odnose na druge vrste materijala. Prve dvije cifre koje slijede "1" označavaju grupu čelika (*Slika 4, Tabela 8, Tabela 9*).



Slika 4. Šema označavanja čelika – brojčani sistem

Tabela 8. Primjeri za brojčanu oznaku čelika

Nelegirani čelici	
Osnovni čelici	1.00XX - osnovni čelici
Kvalitetni čelici	1.01XX - opšti konstrukcioni čelici sa $R_m < 500 \text{ N/mm}^2$
Specijalni čelici	1.11XX - konstrukcioni, za sudove pod pritiskom i inženjerski čelici sa $C < 0.50\%$
Legirani čelici	
Kvalitetni čelici	1.08XX - čelici sa specijalnim fizičkim karakteristikama
Specijalni čelici	
Alatni čelici	1.23XX - Cr-Mo, Cr-Mo-V ili Mo-V čelici
Razni čelici	1.35XX - čelici za ležajeve
Nerđajući i vatrootporni čelici	1.46XX - hemijski otporni i otporni na visoke temperature Ni čelici
Konstrukcioni, za sudove pod pritiskom i inženjerski čelici	1.51XX - Mn-Si ili Mn-Cr čelici

Finalne cifre u brojčanoj oznaci čelika su dodijeljene sekvencionalno. Danas se koriste samo dvije cifre, ali napravljeno je pravilo za proširenje sistema sa još dvije brojne oznake ukoliko se u budućnosti poveća broj vrsta čelika.

Tabela 9. Označavanje čelika brojčanim oznakama po EN 10027 - Grupa čelika

Nelegirani čelici			Legirani čelici								
Kvalitetni čelici		Plemeniti čel.	Kvalitetni čelici		Plemeniti čelici						
					Alatni čelici	Različiti čelici	Hemijski post. čelici	Opšti, mašinski konstruk. čelici i čelici za opremu pod pritiskom			
00	90	10 Čelici sa specijalnim fizičkim karakteristikama		20 Cr	30	40 ↑ bez Mo, Nb i Ti	50 Mn, Si, Cu	60 Cr-Ni sa ≥2,0% <3,0%Cr	70 Cr Cr-B	80 Cr-S-Mo Cr-Si-Mn-Mo Cr-Si-Mo-V Cr-Si-Mn-Mo-V	
01	91	11 Opšti, mašinski konstrukcioni čel. i čel. za opremu pod pritisk. sa <0,5%C		21 Cr-Si Cr-Mn Cr-Mn-St	31	41 ↑ sa Mo bez Nb i Ti	51 Mn-Si Mn-Cr	61	71 Cr-Si, Cr-Mn Cr-Mn-B Cr-Si-Mn	81 Cr-Si-V Cr-Mn-V Cr-Si-Mn-V	
02	92	12 Mašinski konstrukcioni čelici sa > 0,50 % C		22 Cr-V Cr-V-Si Cr-V-Mn Cr-V-Mn-Si	32 ↑ sa Co	42	52 Mn-Cu Mn-V, Si-V Mn-Si-V	62 Ni-Si Ni-Mn Ni-Cu	72 Cr-Mo sa < 0,35% Mo Cr-Mo-B	82 Cr-Mo-W Cr-Mo-W-V	
03	93	13 Opšti, mašinski konstrukcioni čel. i čel. za opr. pod pr. sa spec. zahtevima		23 Cr-Mo Cr-Mo-V Mo-V	33 ↑ Brazovani čelici ↓ bez Co	43 ↑ Nerđajući čelici ↓ sa Mo, bez Nb i Ti	53 Mn-Ti, Si-Ti	63 Ni-Mo Ni-Mn Ni-Mo-Cu, Ni-Mo-V Ni-Mn-V	73 Cr-Mo sa ≥ 0,35% Mo	83	
04	94	14 Čelici sa prosečnim sadržajem ≥ 0,12% < 0,25% C ili sa $R_m \geq 400 < 500 \text{ N/mm}^2$		24 W Cr-W	34 ↑ čelici otporni na habanje	44 ↑ sa Mo, bez Nb i Ti	54 Mo, Nb Ti, V, W	64	74	84 Cr-Si-Ti Cr-Mn-Ti Cr-Si-Mn-Ti	
05	95	15 Čelici sa prosečnim sadržajem ≥ 0,25% < 0,55% C ili sa $R_m \geq 500 < 700 \text{ N/mm}^2$		25 W-V Cr-W-V	35 ↑ čelici za kotrljajne ležaje	45 ↑ sa specijalnim dodacima	55 B Mn-B < 1,65% Mn	65 Cr-Ni-Mo sa < 0,4% Mo + < 2,0%Ni	75 Cr-V sa < 2,0% Cr	85 Čelici za nitriranje	
06	96	16 Čelici sa prosečnim sadržajem ugljenika ≥ 0,55 % ili $R_m \geq 700 \text{ N/mm}^2$		26 W izuzev klasa 24, 25 i 27	36 ↑ Materijali sa specijalnim fizičkim karakteristikama	46 ↑ sa specijalnim dodacima	56 Ni	66 Cr-Ni-Mo sa < 0,4% Mo + ≥2,0% <3,5% Ni	76 Cr-V sa > 2,0% Cr	86	
07	97	17 Čelici sa povišenim sadržajem P ili S		27 sa Ni	37 ↑ Materijali sa specijalnim fizičkim karakteristikama	47 ↑ sa <2,5% Ni	57 Cr-Ni sa < 1,0% Cr	67 Cr-Ni-Mo sa <0,4% Mo + ≥3,5% <5,0% Ni ili ≥ 0,4% Mo	77 Cr-Mo-V	87 ↑ Čelici koji nisu namenjeni za TO koja se vrši kod korisnika	
		18 Alatni čelici	08 Čelici sa specijalnim fizičkim karakteristikama	28 Ostalo	38 ↑ Materijali sa specijalnim fizičkim karakteristikama	48 ↑ Vatrootporni čelici ↓ sa ≥2,5% Ni	58 Cr-Ni sa ≥1,0% < 1,5%Cr	68 Cr-Ni-V Cr-Ni-W Cr-Ni-V-W	78	88 ↑ Čelici koji nisu namenjeni za TO koja se vrši kod korisnika	
		19	09 Čelici sa različitim područjima korišćenja	29	39 ↑ Materijali sa specijalnim fizičkim karakteristikama	49 ↑ Izuzetno vatrootporni materijali	59 Cr-Ni sa ≥1,5% < 2,0%Cr	69 Cr-Ni izuzev klasa 57 i 68	79 Cr-Mn-Mo Cr-Mn-Mo-V	89 ↑ Čelici koji nisu namenjeni za TO koja se vrši kod korisnika	

PRILOG – 2

Vježbe

MAŠINSKI MATERIJALI

VJEŽBA BROJ 1:

UPISATI NAZIV VJEŽBE

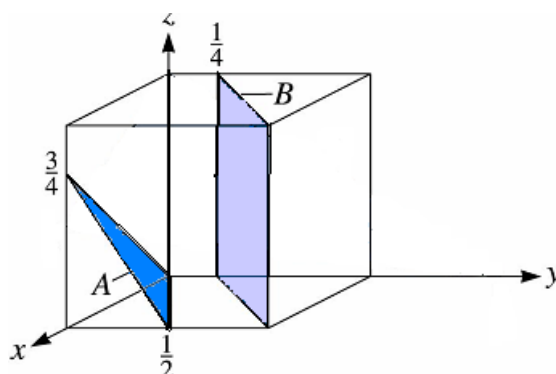
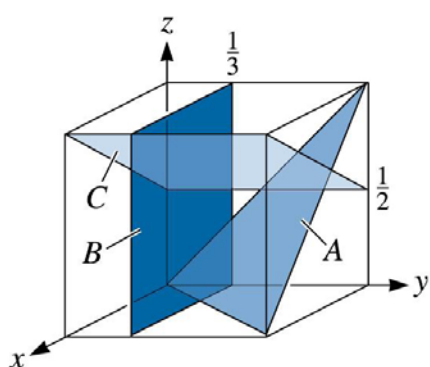
Ime i prezime:

Broj indeksa:

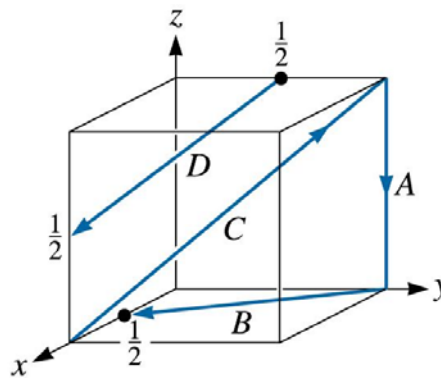
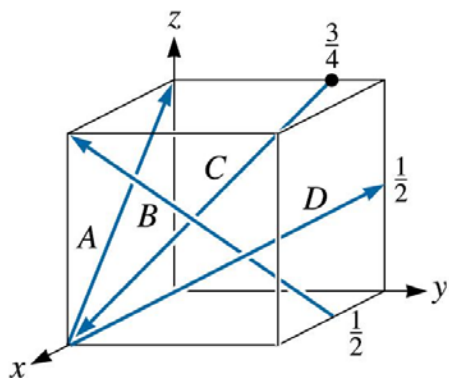
Vježba br. 1: KRISTALOGRAFIJA

ZADACI

- 1) Šta je kristalna rešetka i elementarna ćelija? Nacrtati osnovne tipove ćelija kubnog i heksagonalnog sistema. Odrediti broj atoma koji pripadaju svakoj od ćelija, minimalno rastojanje između atoma i koordinacioni broj.
- 2) Šta su parametarski koeficijenti rešetke? Šta su Miller-ovi indeksi? Odrediti Miller-ove indekse ravni ako su dati parametri $(1,2,3)$; $(1,1,-2)$; $(2,\infty,-1)$.
- 3) Nacrtati ravni $(0\bar{1}1)$; $(01\bar{1})$; (100) ; (010) ; $(\bar{1}\bar{3}2)$; $(\bar{2}10)$ i pravce $[001]$; $[011]$; $[1\bar{1}1]$; $[1\bar{1}2]$; $[31\bar{2}]$.
- 4) Za označene ravni odrediti Miller-ove indekse.



- 5) Za označene pravce odrediti Miller-ove indekse pravca.



- 6) Realna građa metala – objasniti, greške.

Vježba br. 2: **DIJAGRAMI STANJA**

ZADACI

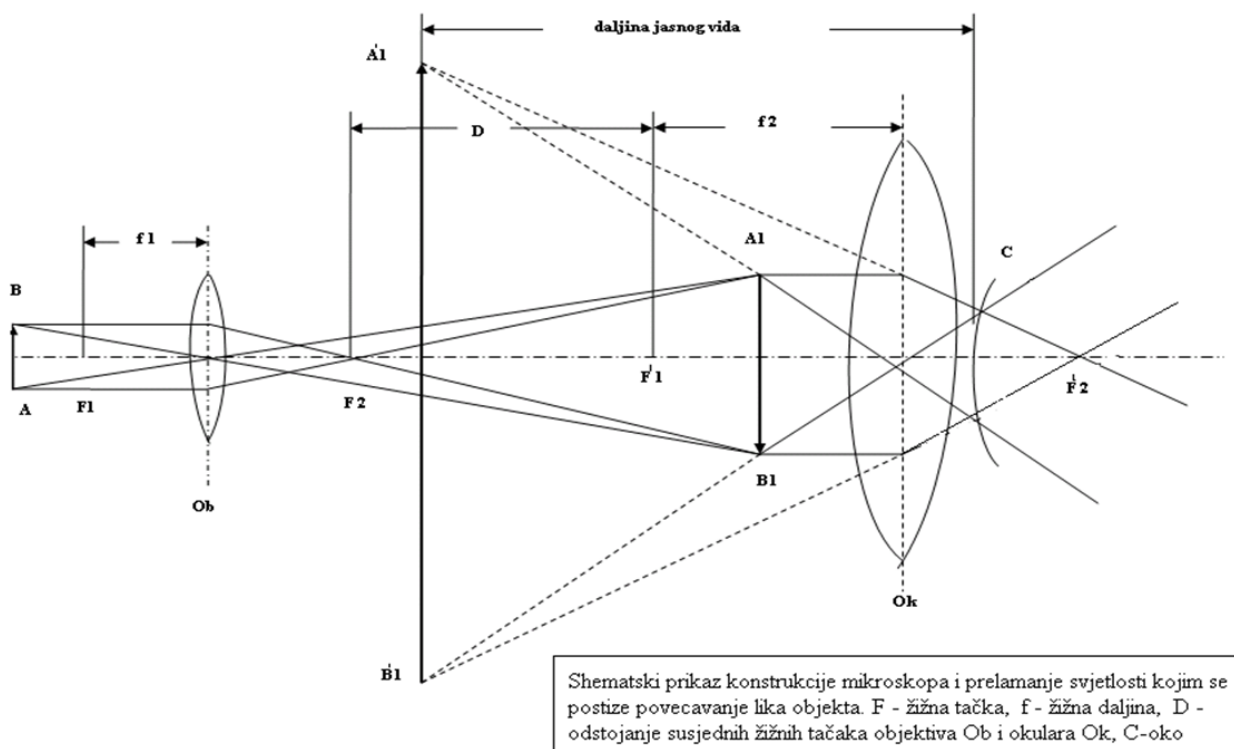
- 1) Definisati pojmove: *legura, faza* i *čvrsti rastvor*. Koje vrste čvrstih rastvora postoje?
- 2) Šta su dijagrami stanja?
- 3) Šta su krive hlađenja? Nacrtati krivu hlađenja za jednokomponentni sistem.
- 4) Nacrtati eutektički dijagram stanja legura čije se komponente međusobno ne rastvaraju, naznačiti fazna polja, likvidus i solidus linije i napisati eutektičku reakciju. Za jednu podeutektičku leguru snimiti krivu hlađenja. Objasniti tok kristalizacije eutektičkih i nadeutektičkih legura.
- 5) Nacrtati dijagram stanja legura sa potpunom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju. Za jednu leguru snimiti krivu hlađenja. Objasniti tok kristalizacije.
- 6) Nacrtati eutektički ravnotežni dijagram stanja legura sa ograničenom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju. Za jednu podeutektičku leguru snimiti krivu hlađenja i objasniti tok kristalizacije.
- 7) Nacrtati peritektički dijagram stanja legura sa ograničenom rastvorljivošću komponenti u čvrstom stanju. Nacrtati krive hlađenja i objasniti tok kristalizacije za jednu podperitektičku i jednu nadperitektičku leguru.

Vježba br. 3:

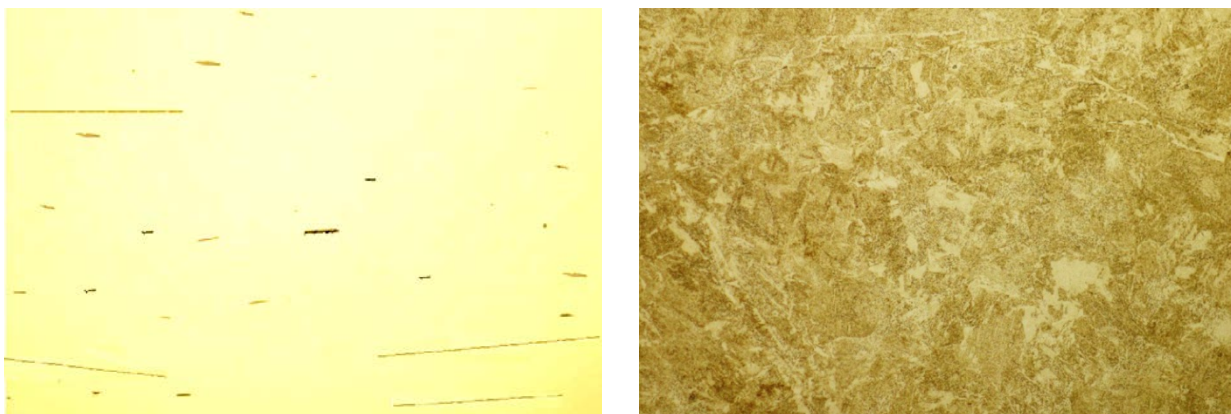
RAD SA MIKROSKOPOM I MEHANIČKA PRIPREMA UZORKA ZA MIKROSKOPSKA ISPITIVANJA

ZADACI

- 1) Nacrtati optičku šemu mikroskopa (*Slika 1*).
- 2) Navesti marku i tip mikroskopa, nabrojati njegove sastavne djelove i mogućnosti.
- 3) Opisati postupak mehaničke pripreme uzorka. Iznijeti zapažanja o ponašanju uzorka u toku brušenja i poliranja. Šta je prouzrokovalo najveće teškoće?
- 4) Pažljivo ispitati i opisati neneagrižene površine uzorka pod uvećanjem 100 puta (*Slika 2b*). Da li su na njima prisutne neke greške i kakve su to greške?



Slika 1. Optička šema mikroskopa



a)

b)

Slika 2. Mikrostruktura čelika sa nenagriženom (a) i nagriženom (b) površinom

**Vježba br. 4: RAVNOTEŽNE I NERAVNOTEŽNE STRUKTURE
UGLJENIČNIH ČELIKA**

ZADACI

- 1) Nacrtati Fe – Fe₃C dijagram stanja.
- 2) Na Fe – Fe₃C dijagramu stanja naznačiti čelike sa: 0.15 % C, 0.4 % C, 0.8 % C i 1.2 % C. Snimiti njihove krive hlađenja, opisati tok kristalizacije i objasniti strukturu.
- 3) Na sobnoj temperaturi izračunati količine faza i mikrokonstituenata datih čelika.
- 4) Nacrtati strukture ispitivanih čelika.
- 5) Nacrtati dijagram *tempertura – brzina hlađenja* za čelika sa 0.4 % C, objasniti uticaj brzine hlađenja na strukturu čelika i nacrtati strukture čelika za date brzine hlađenja.

**Vježba br. 5: ISPITIVANJE MIKROSTRUKTURE
LEGIRANIH ČELIKA I LIVENOG GVOŽĐA**

ZADACI

- 1) Nacrtati i objasniti ravnotežne dijagrame stanja legiranih čelika sa *otvorenim* i *zavorenim* γ područjem.
- 2) Nacrtati i opisati mikrostrukture legiranih čelika pri odgovarajućem uvećanju, identifikovati faze i mikrokonstituente.
- 3) Nacrtati stabilni dijagram stanja Fe-C.
- 4) Nacrtati i opisati prikazane mikrostrukture livenog gvožđa u nagriženom stanju i objasniti strukturu.

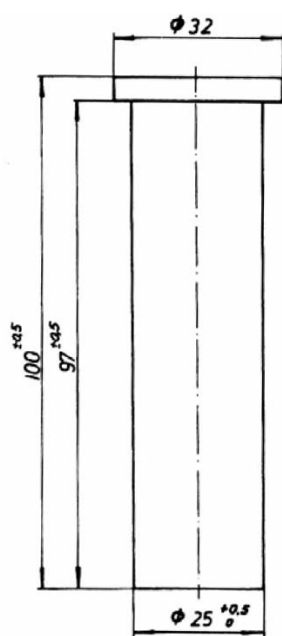
ZADACI

- 1) Nacrtati ravnotežni dijagram stanja legura Al-Cu, i na njemu naznačiti legure sa 4 % i 9 % Cu i snimiti (nacrtati) krive hlađenja.
- 2) Nacrtati i objasniti strukturu Al-Cu leguru i objasniti postupak ojačavanja termičkim taloženjem.
- 3) Nacrtati i objasniti strukturu duraluminijuma i objasniti postupak ojačavanja termičkim taloženjem.
- 4) Nacrtati ravnotežni dijagram stanja Al-Si, na njemu naznačiti leguru sa 13% Si, nacrtati i objasniti strukturu u nemodificiranom i modificiranom stanju, objasniti postupak modificiranja.
- 5) Nacrtati dijagram stanja Cu-Zn, podijeliti leguru prema strukturi, objasniti strukture u livenom i žarenom stanju.

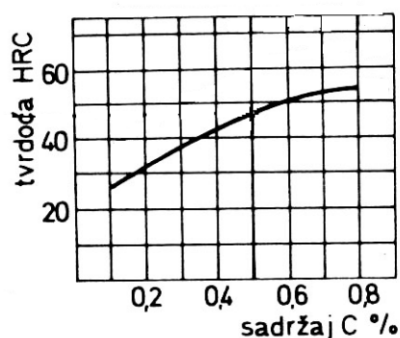
Vježba br. 7: ODREĐIVANJE PROKALJIVOSTI ČELIKA JOMINY METODOM

ZADACI

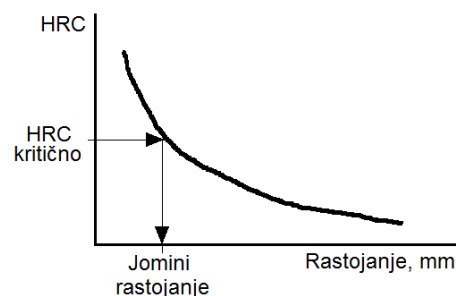
- 1) Skicirati Jominy epruvetu sa potrebnim dimenzijama (Slika 1).
- 2) Tabelarno prikazati hemijski sastav ispitivanih čelika (Tabela 1).
- 3) Tabelarno prikazati izmjerene vrijednosti tvrdoće (po metodi Rockvel-a) duž jedne izvodnice na Jominy epruvetama (Tabela 2).
- 4) Nacrtati dijagram HRC – *cađržaj C %* u čeliku (Slika 2) i pomoću njega za ispitivane čelike odrediti kritične vrijednosti tvrdoće (HRC_{kr}).
- 5) Za ispitivane čelike, na osnovu podataka iz tabele 2, uraditi dijagrame promjene tvrdoće HRC – *udaljenost od čela epruvete* i odrediti *Jominy* rastojanje za oba čelika (prema skici na slici 3).



Slika 1. Skica Jominy epruvete



Slika 2. Promjena tvrdoće u zavisnosti od sadržaja ugljenika u čeliku



Slika 3. Skica postupka određivanja Jominy rastojanja

Tabela 1. Hemijski sastav ispitivanih čelika

Čelik	Sadržaj legirajućih elemenata, (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
Č.4732	0.35	0.40	0.70	0.035	0.035	0.30	1	0.25
Č.1530	0.46	0.25	0.70	0.035	0.035	0.30	0.25	-

Tabela 2. Promjena tvrdoće u zavisnosti od rastojanja od čela Jominy epruvete

Rastojanje, (mm)	2	4	6	8	10	12	14	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56
HRC za Č.1530	59	41	33	32	31	28	25	24	23.5	23	22	21	20	18	18	18	16	16
HRC za Č.4732	60	59	58	56.5	56	56	55	54	52.5	51	47	45	43.5	43	42	41.5	41	41