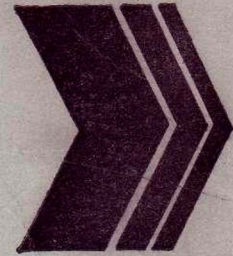
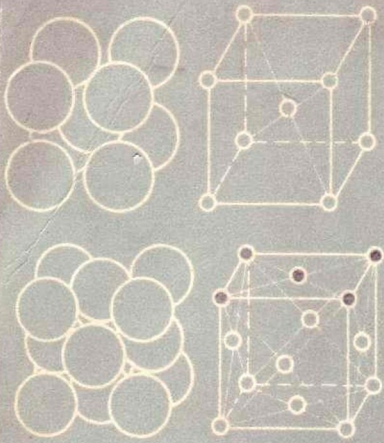
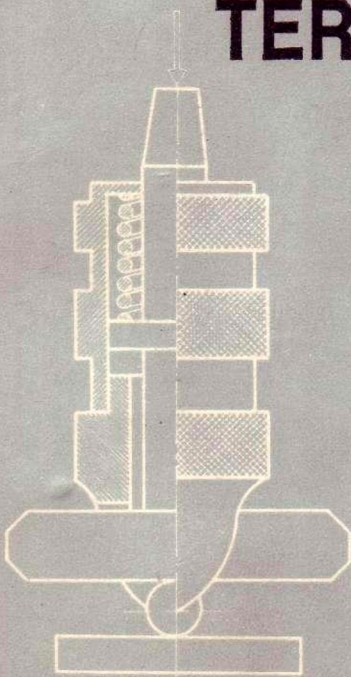


730



ZDRAVKO SIMEUNOVIĆ

TERMIČKA OBRADA S ISPITIVANJEM MATERIJALA



ZA
4.
RAZRED
MAŠINSKE
STRUKE

"SVJETLOST", OOUR ZAVOD ZA UDŽBENIKE I NASTAVNA SREDSTVA
SARAJEVO

Zdravko SIMEUNOVIĆ, dipl. inž.

TERMIČKA OBRADA S ISPITIVANJEM MATERIJALA

ZA ČETVRTI RAZRED MAŠINSKE STRUKE
ZA ZANIMANJA MAŠINSKIH TEHNIČARA

DRUGO IZDANJE

„SVJETLOST“
OOUR Zavod za udžbenike i nastavna sredstva,
Sarajevo, 1986.

Odgovorni urednik

Muhamed Rustempašić

Recenzenti

mr *Vladimir Semjan*, dipl. inž., Mašinski fakultet Sarajevo
Milena Jovičević-Ličen, dipl. inž., UNIS – RZ istraživanje i razvoj Sarajevo
Abaz Zubčević, dipl. inž., Školski centar Trebinje

Lektor

Milica Borić

Ilustrator

Omer Šatara

Naslovna strana

Musa Rehić

Tehnički urednik

Fikret Dautović

Korektor

Branislava Varićak

Izdaje

„Svjetlost”, OOUR Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Sarajevo

Za izdavača

Savo Zirojević

Tiraž: 2500 primjeraka

Štampa

SOUR „GRAFIS”, RO „MINERVA”, OOUR štamparska delatnost, Subotica

Za štampariju

Lazar Andrašić, graf. inž.

Savjet za unapređivanje vaspitno-obrazovnog rada Bosne i Hercegovine odobrio je izdavanje i upotrebu ovog udžbenika u četvrtom razredu srednjeg usmjerenog obrazovanja svojom odlukom broj 07-106/84 od 17. 07. 1984. godine.

1. METALOGRAFIJA

Metalografija je dio nauke o metalima koja se bavi proučavanjem unutrašnje strukture metala i legura kao i uzajamnog odnosa između strukture i fizičkih, mehaničkih i hemijskih osobina.

U metalografiji postoji niz metoda pomoću kojih možemo dobiti jasnu sliku o strukturi metala i legura. Nije davno bilo kada su izvršena prva ispitivanja strukture metala. Krajem XIX vijeka izrađen je i prvi metalografski mikroskop. Taj mikroskop se razlikuje od mikroskopa kojim se služe biolozi. Kod biološkog mikroskopa svjetlost prolazi kroz uzorak, ali to nije moguće kod metala — jer oni ne propuštaju svjetlost. Metalografski mikroskop radi na principu odbijanja svjetlosti sa povećanjem do 2000 puta. Veća povećanja mikroskopa nemaju svrhe zbog toga što se ne otkrivaju dopunski elementi strukture. Odvojene čestice čije su dimenzije približno $0,15 \mu\text{m}$ dobro se vide pri uvećanju od 2000 puta. Manje čestice ne odbijaju svjetlost i ne vide se pod mikroskopom.

Nagli razvoj teoretske fizike doveo je do saznanja da se elektronima koji se kreću velikom brzinom može pripisati talasna priroda. Ovo je omogućilo da se sitni dijelovi mogu projektovati, i na osnovu toga dobiti slika o strukturi metala i legura. Ovo se postiže pomoću elektronskog mikroskopa. Kod elektronskog mikroskopa elektroni na anodi stvaraju snop zraka, koji prolazi kroz uzorak i stvara sliku na fluorescentnom ekranu ili sliku koju možemo fotografisati. Optičkim i elektronskim mikroskopima može se posmatrati površina i dobiti slika o površinskom sloju.

Rendgenološka metoda je omogućila da prodremo u tajne unutrašnje kristalne građe metala i legura. Rendgenski zraci su elektromagnetni talasi male talasne dužine koji su sposobni da prodiru kroz čvrste neprozirne materije. Tako je moguće na specijalnim uzorcima, iza kojih se postavlja film, snimiti strukturu materijala. Ova metoda omogućava da se odredi raspored atoma u kristalnoj rešetki čvrstih materija. Osim toga, moguće je odrediti stepen savršenstva kristala, njihovu orijentaciju, i detaljno proučavati strukturne promjene u legurama pri njihovoj termičkoj i mehaničkoj obradi.

Rendgenski metod ima veliku primjenu pri određivanju optimalnih režima obrade metala i legura, kao i za kontrolu tehnoloških postupaka. Moguće je odrediti vrstu greške nastalu u procesu prerade, veličinu metalnog zrna i drugo.

Metalografija je napredovala zahvaljujući razvoju postupaka:

- mikroskopskih ispitivanja
- termijske analize i
- strukturne rendgenske analize.

Možemo reći da metalografija dosad nije dala odgovore na sva pitanja i probleme iz ove oblasti. Tako, na primjer, metalografija je nemoćna kada su u pitanju razne vrste krtosti materijala. Osim toga, metalografija nije mogla objasniti u svim slučajevima vezu između strukture i osobina materijala.

Metalografskim ispitivanjem može se pratiti i kontrolisati proces prerade i ukazati na izvore i uzroke grešaka koje moramo izbjegavati da bismo dobili materijal određenog oblika i osobina.

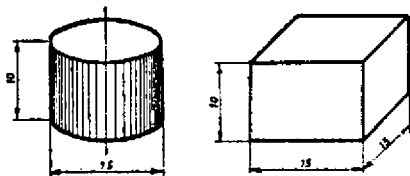
Metalografska ispitivanja možemo podijeliti na:

- makro ispitivanja i
- mikro ispitivanja.

Da bi se mogla izvršiti metalografska ispitivanja, najčešće je potrebno izvršiti pripremu uzorka pogodnog za ispitivanje.

1.1. PRIPREMA METALOGRAFSKIH UZORAKA

Razni mašinski dijelovi sa kojima se svakodnevno susrećemo imaju površinu koja je hrapava, oksidisana ili zaprljana raznim uljima, mastima, namjerno premazana bojama ili lakovima. Na ovakvoj površini nije moguće vršiti metalografska ispitivanja. Da bi se ova ispitivanja mogla obaviti, treba pripremiti uzorak. Prije uzimanja uzorka treba odabrati mjesto sa kojeg će se izvaditi uzorak, koji treba da reprezentuje komad od kojeg je uzet.



Slika 1.1. Normalna veličina uzorka

Veličina jednog uzorka za metalografska ispitivanja kreće se oko $15 \times 15 \times 10$ mm (slika 1.1). Kod uzimanja uzorka treba voditi računa o tome da visina bude uvijek manja od dužine ili širine. Međutim, u mnogim slučajevima, veličina uzorka se ravna prema objektu ispitivanja te može imati različit oblik i dimenzije.

Prilikom isijecanja uzorka i njegove dalje obrade, treba paziti da se ne promijeni struktura materijala. Od mekih i žilavih materijala uzorci se uzimaju na mašinama alatkama (strugovi, glodalice, rendisaljke) sa smanjenom brzinom rezanja, malim korakom i dubinom rezanja — uz obilno hlađenje. Ovo je potrebno zbog toga da toplota, koja je nastala u procesu obrade, ne bi uticala na promjenu strukture materijala u površinskom sloju, koji upravo i želimo posmatrati.

Da bi se dobila potpuna ravna i glatka površina pogodna za posmatranje, uzorak se priprema brušenjem, poliranjem i nagrivanjem. Ukoliko na uzorku nisu potrebne oštre ivice, one se zaoble turpijom prije početka brušenja kako bi se brusni papir i tkanina za poliranje sačuvali od oštećenja. Mali uzorci, koji se ne mogu držati u ruci, zalivaju se u plastičnu masu i obrađuju kao cjelina.

Za brušenje u metalografiji služi brusna hartija, koja se sastoji od papirne podloge na koju je nanoseno sredstvo za brušenje, koje je vezano sredstvom za lijepljenje. Brusna sredstva su najčešće silicijumkarbid SiC , korund Al_2O_3 i dijamantski prah.

Uzorak se brusi suhim ili mokrim postupkom na staklenoj ili metalnoj rotacionoj ploči, koja se obrće do 1500 min^{-1} , na kojoj je zategnuta brusna hartija. Uzorak se povlači tamo-amo u jednom pravcu, sve dok ne ostanu samo tragovi brušenja u tom pravcu. Brušenje se prvo izvodi najgrubljom hartijom za brušenje, a zatim se komad okrene za 90° i brušenje vrši hartijom manje krupnoće. To se ponavlja sve do najfinije hartije za brušenje. Pri brušenju treba voditi računa da se uzorak ne zagrije. Da bi se ovo postiglo, treba brusiti sa malim pritiskom.

Poslije brušenja izvodi se poliranje ili eventualno pretpoliranje. Poliranje se izvodi sredstvom za poliranje, koje se sastoji od vodene suspenzije Al_2O_3 , MgO i Fe_2O_3 ili dijamantske paste. Sredstvo za poliranje nanosi se na filc, svilu ili somot, koji su razapeti na disku koji se okreće velikom brzinom.

U toku poliranja uzorak se mora stalno okretati. Poliranje ne smije dugo trajati zbog toga što bi se mekše strukture dublje ispolirale i površina bi postala reljefna.

Po završetku poliranja površina je veoma glatka i ima visoki sjaj — bez ikakvih tragova obrade. Zatim se uzorak pere u hladnoj ili toploj vodi, i ispira u alkoholu. Sušenje se vrši u struji toplog vazduha.

Da bi se skratilo vrijeme poliranja, a izbjegla i mogućnost plastičnih deformacija u površinskom sloju, koje se pojavljuju pri mehaničkom poliranju, u novije vrijeme primjenjuje se elektrolitičko poliranje.

Pripremljeni uzorak se posmatra prvo golim okom, a zatim pod lupom i mikroskopom. Na ovaj način se dobije opšta slika o pripremljenom uzorku. Mogu se primijetiti tragovi brušenja, naprsline pri kaljenju, lunkeri, nemetalni uključci, početak korozije i slično, ali se ne može konstatovati struktura.

Da bi se pojedine strukture mogle vidjeti pod mikroskopom, potrebno je izvršiti nagrivanje ispolirane površine. Zavisno od vrste materijala i od toga šta želimo, biramo sredstvo za nagrivanje. Za ugljenične čelike uzima se rastvor od 1 do 5% azotne kiseline u alkoholu. Nagrivanje se može izvršiti i elektrolitskim putem.

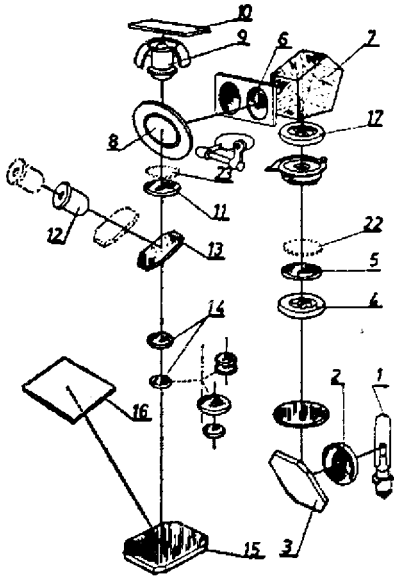
1.2. MAKROSKOPSKO I MIKROSKOPSKO ISPITIVANJE

Makroskopska ispitivanja se izvode golim okom ili pod lupom sa povećanjem do 20 puta. Cilj ovog ispitivanja je da se utvrdi kakva je površina materijala poslije livenja, kovanja, valjanja, termičke obrade, zaštite od korozije itd. Posmatranjem pripremljenih uzoraka može se utvrditi da li na posmatranoj površini ima šupljina, gasnih mjehurova, tragova korozije, naprsline i drugo.

Mikroskopska ispitivanja se izvode na pripremljenim uzorcima i imaju za cilj da se utvrdi struktura različitih metala i legura i odredi veličina metalnog zrna. Ova ispitivanja imaju veliku praktičnu vrijednost pri termičkoj obradi, obradi deformacijom, zavarivanju i drugim postupcima prerade.

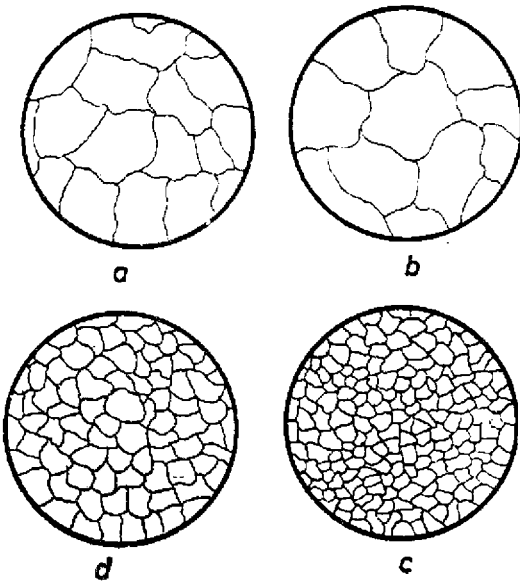
Pomoću mikroskopa može se utvrditi da metali i legure nisu jednostavne građe, već se sastoje od jednostavne ili složene skupine raznovrsnih zrna. Zrna koja se vide pod mikroskopom čine opštu strukturu legure. Faze u pojedinim različitim zrnima zovu se mikrostrukturom. Legura određenog sastava može imati različitu strukturu, što zavisi od vrste obrade (livenje, kovanje, valjanje, termička obrada i slično).

Za vizuelna posmatranja, a takođe i za fotografisanja struktura metala, legura i drugih neprozračnih tijela, služe metalografski mikroskopi. U ovoj knjizi biće obrađena optička shema metalografskog mikroskopa MIM-7 sovjetske izrade.



Slika 1.2. Optička shema metalografskog mikroskopa MIM-7

Svjetlosni zraci dobijeni od svjetlosnog izvora 1. (slika 1.2) prolaze kroz kolektor 2, a zatim se odbijaju od ogledala 3 i dolaze u dijafragmu 4. Prolaskom kroz dijafragmu svjetlosni zraci prolaze kroz sočivo 5, zatim kroz dijafragmu 17 (koja je smještena u žižnoj daljini sočiva 5), prelamaju se u prizmi 7 i prolaze kroz sočivo 6. Pri daljem kretanju svjetlosni zraci se odbijaju od odbojne ploče 8, koja je koso postavljena i dolaze u objektiv 9, a zatim padaju na pripremljeni uzorak 10. Od uzorka svjetlosni zraci se odbijaju, prolaze kroz objektiv i odbojnu ploču i dolaze u sočivo 11. Prelamanjem kroz sočivo 11 dobije se paralelan snop svjetlosnih zraka, koji pada na ogledalo 13 i odbijen dolazi u okular 12. U okularu, zavisno od izbora okulara i objektiva koji se mogu mijenjati, dobićemo sliku dijela osvijetljene površine



Slika 1.3. Vrste kristalnih struktura a i b — krupnozrnasta struktura c i d — sitnozrnasta struktura

sa manjim ili većim uvećanjem. Ovaj metalografski mikroskop može dati veći broj uvećanja od 60 do 1440 puta.

Ako želimo da napravimo fotografski snimak strukture, uklanjamo ogledalo 13 sa puta paralelnog snopa svjetlosnih zraka koji dolazi u foto-okular 14, a zatim se odbija od ogledala 15 i dolazi na fotografsku ploču ili film 16.

Posmatranjem u okularu može se zaključiti da su metali i legure izgrađeni od velikog broja malih zrna koja zovemo kristalitima. Zbog toga kažemo da su metali i legure polikristalni.

Prema broju zrna na površini od jednog kvadratnog cola koja se vidi pod mikroskopom pri uvećanju od 100 puta, metale i legure možemo podijeliti na krupnozrnaste i sitnozrnaste.

Metali i legure koji na ovoj površini imaju od 1 do 12 zrna spadaju u grupu krupnozrnastih, a preko 12 u grupu sitnozrnastih (slika 1.3).

Veličina zrna se može mijenjati raznim postupcima prerade, kao što su: livenje, kovanje, presovanje i žarenje. Kako od veličine zrna zavise izvjesne mehaničke osobine materijala, to kontrolom pomoću mikroskopa utvrđujemo da li je postupak prerade dobro obavljen i da li će komad imati određene karakteristike.

1.3 GRAĐA METALA

Metali su elementi koji se mogu obrađivati plastičnim deformacijama i imaju dobru provodljivost električne struje i toplote. Kod nekih metala ove osobine su izražene jače dok su kod drugih izražene slabije. Karakteristične osobine metala mogu se objasniti građom njihovih atoma.

Iako atomi imaju male dimenzije, oni su složene građe. Svaki atom sastoji se od pozitivno naelektrisanog jezgra i negativno naelektrisanih elektrona. Broj elektrona jednak je rednom broju elementa u Mendeljejevom sistemu. U jezgru atoma nalaze se pozitivno naelektrisane čestice, koje se zovu protoni. Broj protona jednak je broju elektrona. Osim protona u jezgru se nalaze i neutralne čestice koje se zovu neutroni. Masa elektrona je 1840 puta manja od mase protona ili neutrona. Zbog toga možemo smatrati da je masa atoma skoncentrisana u jezgru.

Elektroni se kreću velikim brzinama oko jezgra po određenim putanjama. Spoljašnji elektroni (koji su najudaljeniji od jezgra) slabo su vezani sa jezgrom. Elementi-metali lako odaju spoljašnje elektrone i stupaju u hemijske reakcije sa elementima-nemetalima. Slaba veza vanjskih valentnih elektrona sa jezgrom objašnjava metalna svojstva metala.

Hemija sve elemente dijeli na dvije grupe, i to: metale i nemetale, prema njihovom ponašanju u hemijskim reakcijama.

1.3.1. Razlike između metala i nemetala

Osnovni kriterijumi na osnovu kojih pravimo razliku između metala i nemetala su:

— elektrolitičko ponašanje; metali su oni elementi koji se prilikom elektrolize jedinjenja izdvajaju na katodi, dok se nemetali izdvajaju na anodi.

Ovaj kriterijum ne možemo smatrati potpuno ispravnim zbog toga što se neki elementi (kao, npr., vodonik) izdvajaju na katodi, a poznato je da ne spadaju u grupu metala.

— metalni sjaj; svi metali, kada se ispoliraju, imaju metalni sjaj. Ova karakteristika metala koristi se kod izrade raznih optičkih instrumenata. Nemetali, i poslije poliranja, nemaju sjaj.

— sposobnost plastičnih deformacija; metale možemo pod uticajem sile deformisati, a da pri tome ne dolazi do loma. Tako, plastičnom deformacijom metala dobijamo predmete različitog oblika. Nasuprot ovome, većina nemetala su veoma krta i pod uticajem sile; iako su neki veoma velike čvrstoće, lako se lome.

— provodljivost toplote i elektriciteta; metali su dobri provodnici toplote i elektriciteta. Nasuprot tome, nemetali su slabi provodnici toplote i elektriciteta. Nemetali u rastvorima provode električnu struju, pa se zbog toga zovu provodnici drugog reda, a metali se zovu provodnici prvog reda.

— kristalna građa; svi metali imaju kristalnu građu. Kod njih su atomi pravilno raspoređeni u kristalnim rešetkama, dok je kod nemetala prisutan nepravilan raspored atoma.

Između metala i nemetala nema jasne granice. Neki elementi, kao što su ugljenik (C), silicijum (Si) i fosfor (P) imaju osobine metala i nemetala. Ove elemente nazivamo metaloidima.

1.3.2. Kristalografski sistemi

Svi elementi su sastavljeni od sitnih djelića — atoma. Međutim, ni atomi nisu nedjeljivi, već imaju složenu građu. Osobine materijala ne zavise samo od prirode atoma, nego i od načina njihovog grupisanja u prostoru.

Raspoređivanje atoma kod svih materija nije isto. Neke materije imaju pravilan raspored atoma, a druge potpuno nepravilan. Prema načinu grupisanja atoma u prostoru sve materije možemo podijeliti u dvije grupe:

- amorfne i
- kristalne materije.

Kod amorfnih materija (staklo, smola, plastične mase itd.), prilikom prelaska iz tečnog u čvrsto stanje, nema pravilnog grupisanja atoma. Zbog ovakvog rasporeda atoma, kod ovih materija svojstva u svim pravcima su ista. Ova pojava se zove izotropija.

Kristalne materije (metali, dijamant itd.) su takve materije kod kojih se atomi pri prelasku iz tečnog stanja u čvrsto potpuno pravilno raspoređuju po nekom pravilu. Svi metali imaju kristalnu građu. Pravilno raspoređeni atomi čine tzv. kristalnu rešetku. Od oblika kristalne rešetke zavise osobine materijala. Atomi u ovim kristalnim rešetkama održavaju se na tačno određenom rastojanju — pomoću privlačnih sila.

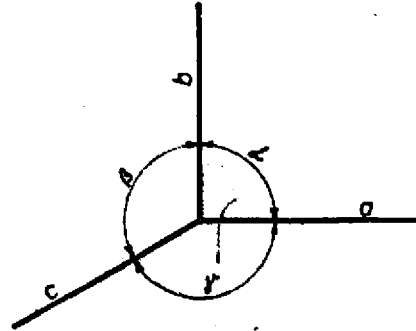
Nauka koja se bavi proučavanjem rasporeda atoma u kristalima zove se kristalografija.

Prema kristalografiji svaki sistem kristalisanja definisan je osama i uglovima između tih osa (slika 1.4).

U prirodi se pojavljuje 14 vrsta kristalnih rešetki. U ovim kristalnim rešetkama atomi su pravilno raspoređeni, a između njih sa pojavljuje slobodan međuprostor. Postojanje ovog slobodnog međuprostora može se objasniti difuzijom, o kojoj će kasnije biti govora.

Svaka kristalna rešetka ima svoje karakteristike, a to su: parametar, kristalna ravan i gustina grupisanja.

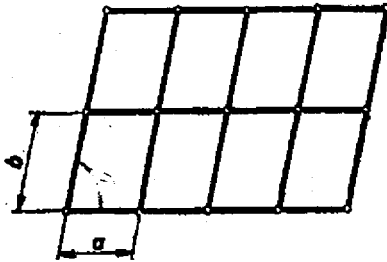
Parametar kristalne rešetke je rastojanje od težišta jednog do težišta drugog atoma, u jednoj kristalnoj ravni (slika 1.5).



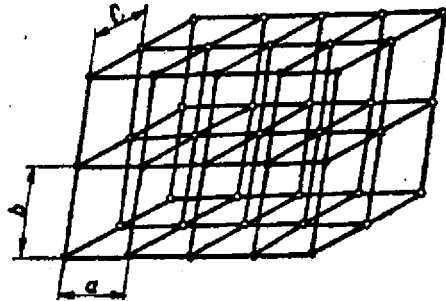
Slika 1.4. Definisanje sistema kristalisanja

Tri ili više atoma koji leže u ravni čine tzv. kristalnu ravan.

Pod pojmom gustine grupisanja podrazumijevamo broj atoma koji otpada na jednu elementarnu ćeliju kada se ona nalazi u sklopu jedne složene kristalne rešetke. Kod kubne rešetke (slika 1.6), jednu rešetku okružuje osam istih rešetki, tako da svaki atom u roglju pripada svakoj od osam rešetki.



Slika 1.5. Parametar i kristalna ravan



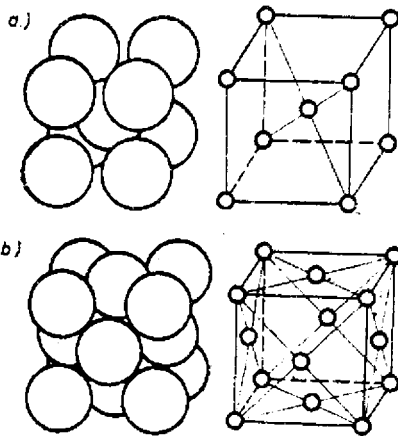
Slika 1.6. Prostorna rešetka

Pomoću tri konstante a , b , c i tri ugla α , β i γ potpuno je definisan kristalni sistem neke kristalne materije. Na osnovu ovih veličina utvrđeno je da u prirodi postoji sedam različitih kristalografskih sistema koji su dati u tabeli 1.1.

Većina metala i njihovih legura kristališe u tri kristalografska sistema: kubni, heksagonalni i tetragonalni.

Kristalni sistem	Parametri rešetki	Osni uglovi
1. Kubni	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
2. Tetragonalni	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
3. Ortorembični	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
4. Romboedarski	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
5. Heksagonalni	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$
6. Monoklinični	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ; \beta \neq 90^\circ$
7. Triklinični	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

1.3.3. Kristalna građa metala



Slika 1.7. Kubne rešetke: a – prostorno centrirana, b – površinski centrirana

Najveći broj metala kristališe po kubnom kristalografskom sistemu. Razlikujemo tri vrste kubnih rešetki (slika 1.7), i to: obična, prostorno centrirana i površinski centrirana.

Po običnoj kubnoj rešetki ne kristališe nijedan čist metal, izuzev nekih legura. Kod ove rešetke u svakom roglju nalazi se smješten po jedan atom.

Prostorno centrirana kubna rešetka javlja se vrlo često kod metala. Kod ove rešetke u svakom roglju nalazi se smješten po jedan atom elementa, a takođe i u presjeku dijagonale kocke. Po ovoj kristalnoj rešetki kristališu metali dati u tabeli 1.2.

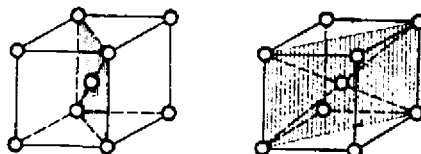
Tabela 1.2

Metali koji kristališu po prostorno centriranoj kubnoj rešetki

Metal	α Fe	α Cr	V	M_0	W	Ta
Parametar $a \times 10^{-10}$ [m]	2,87	2,88	3,01	3,14	3,16	3,30

Na slici 1.7 predstavljene su kubne rešetke shematski, što nema realne osnove, ali omogućava da lakše shvatimo osobine metala koji kristališu po ovom sistemu. Uz pretpostavku da su atomi loptice smješteni u rogljevima (a kod prostorno centrirane nalazi se još jedan atom u presjeku dijagonale) i da se atomi po dijagonali dodiruju sa atomima na rogljevima, tada bi prečnik atoma mogao da bude najviše 1/2 dijagonale kuba. To znači da se atomi

na rogljevima međusobno ne mogu dodirivati, tj. između njih postoji prazan međuprostor u koji se može uključiti neki strani atom manjeg prečnika. Ovaj međuprostor takođe omogućava da se atomi mogu lakše razmještati i imati manji otpor pri prodiranju stranog tijela u njihovu površinu. Zbog toga su svi metali koji po ovoj kristalnoj rešetki kristališu — meki.



Slika 1.8. Ravni klizanja kod prostorno centrirane kubne rešetke

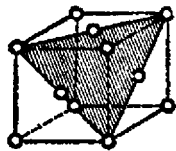
Prostorno centrirana kubna rešetka ima dvije ravni koje su najviše zastupljene atomima, a to su ravni koje prolaze kroz rogljeve i dijagonalu (slika 1.8). Ravni koje su najviše ispunjene atomima zovu se ravni klizanja. Prema tome, možemo zaključiti da ova rešetka ima dvije mogućnosti klizanja, pa metali koji kristališu po ovoj kristalnoj rešetki nisu najpogodniji za plastične deformacije.

Površinski centrirana kubna rešetka ima atome raspoređene u rogljevima kocke i u presjeku dijagonala svake strane. Ova rešetka ima ukupno 14 atoma. Po ovoj kristalnoj rešetki kristališu metali dati u tabeli 1.3.

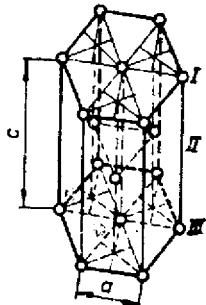
Tabela 1.3 Metali koji kristališu po površinski centriranoj kubnoj rešetki

Metal	Cu	Ag	Au	Al	Pb	γ Fe	β Co	Ni
Parametar $a \times 10^{-10}$ [m]	3,61	4,07	4,07	4,04	4,94	3,64	3,55	3,52

Površinski centrirana kubna rešetka ima 8 ravni klizanja. Te ravni mogli bismo lako predstaviti, ako najzmjenično skidamo po jedan atom sa roglja. Dobićemo osam takvih ravni. Jedna takva ravan je prikazana na slici 1.9.



Slika 1.9. Ravni klizanja kod površinski centrirane kubne rešetke



Slika 1.10. Heksagonalna kristalna rešetka

Po ovim ravnima je omogućeno najlakše klizanje dvaju dijela kristalne rešetke pri plastičnim deformacijama. Pošto ova kristalna rešetka ima 8 ovakvih ravni, to su metali koji kristališu na ovaj način jako istegljivi i mogu se lako oblikovati plastičnim deformacijama.

Pored dobrih osobina za plastične deformacije površinski centrirana kubna rešetka ima sposobnost za stvaranje tzv. mješovitih kristala. U slobodnom prostoru koji se nalazi u presjeku prostornih dijagonala kocke može se smjestiti neki manji strani atom, a da pri tome ne nastupe znatnije deformacije kristalne rešetke. Tako ugljenik može da se rastvara u γ Fe, tj. da se atom ugljenika smjesti u presjeku prostornih dijagonala i na taj način stvaraju mješovite kristale željeza poznate pod imenom austenit.

Heksagonalna kristalna rešetka se često javlja kod metala. Kod ove kristalne rešetke atomi su raspoređeni (slika 1.10) u rogljevima zamišljenih

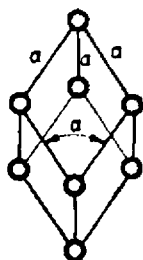
šestouglova, a po jedan atom smješten je u težištu svake treće trostrane prizme. Ova kristalna rešetka ima tri ravni, koje su najviše ispunjene atomima (I, II, III). Ova kristalna rešetka je jako siromašna ravnima klizanja, pa metali koji kristališu po ovom sistemu nisu pogodni za plastične deformacije. Po ovoj kristalnoj rešetki kristališu metali iz tabele 1.4.

Tabela 1.4

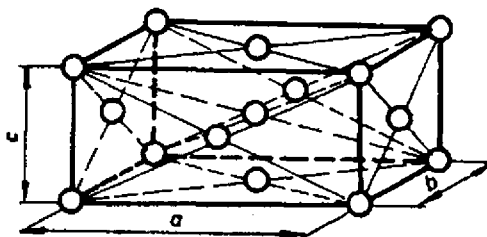
Metali koji kristališu po heksagonalnoj kristalnoj rešetki

Metal		Be	Mg	Zn	Cd	β Cr	Co
Parametri $\times 10^{-10}\text{m}$	a	2,27	3,20	2,66	2,97	2,72	2,51
	c	3,59	5,20	4,94	5,60	4,42	4,07

Pored ovih kristalnih rešetki, pojavljuju se još romboedarska kristalna rešetka (slika 1.11), po kojoj kristališu Bi, Hg, Sb i As, i tetragonalna (slika 1.12), koja može biti površinski centrirana (Indijum In) i prostorno centrirana — po kojoj kristališe β kalaj (β Sn).



Slika 1.11. Romboedarska kristalna rešetka



Slika 1.12. Tetragonalna površinski centrirana kristalna rešetka

Izvjestan broj metala kristališe u više kristalnih rešetki. U tom slučaju određenoj oblasti temperatura odgovara određeni oblik kristalne rešetke. Promjenom oblika kristalne rešetke mijenjaju se kod metala mehaničke i tehnološke osobine.

1.3.4. Kristalne rešetke legura

Legure su materije koje nastaju rastvaranjem dvaju ili više metala, metala i nemetala u rastopljenom stanju i njihovim zajedničkim očvršćavanjem. Elemente koji ulaze u sastav legure nazivamo komponentama. Kod svih legura obično razlikujemo osnovnu komponentu i dodatne komponente (jedna ili više).

Čisti metali imaju ograničenu primjenu zbog toga što njihove osobine ne mogu zadovoljiti uslove pod kojima rade pojedini mašinski elementi. Čisti metali su našli svoju primjenu samo u određenim slučajevima, npr., bakar i aluminij kao odlični provodnici električne struje.

Legiranjem metala raznim elementima dobijaju se legure koje se u pogledu osobina znatno razlikuju od osobina komponenata koje ulaze u sastav legure. Ranije su određivani uslovi pod kojima će neki metal da radi, a danas se iznalaze i određuju legure koje će zadovoljiti određene uslove rada.

Prema broju komponenata koje ulaze u sastav jedne legure, one se dijele na dvojne, trojne i legure sastavljene od više komponenata, odnosno, binarne, ternarne i višekomponentne. Pri ovome ne uzimaju se u obzir primjese koje su dospjele u leguru kao rezultat nesavršenosti procesa dobijanja metala. Tako, npr., redovne primjese kod željeza su sumpor i fosfor. Primjesom možemo smatrati samo one elemente koji svojim procentualnim prisustvom u leguri ne utiču bitno na mehaničke, fizičke, hemijske i tehnološke osobine.

Kod legura imamo takođe pravilno grupisanje atoma u kristalnim rešetkama.

Razlikujemo tri osnovna načina grupisanja atoma različitih metala ili nemetala u leguri, i to:

1. Atomi legirajućih elemenata se u tečnom stanju potpuno rastvaraju, a prilikom očvršćavanja svaki elemenat gradi svoju rešetku. Osobine ove legure stoje u razmjeri sadržaja i osobina komponenata koje ulaze u sastav legure. Struktura se sastoji od mješavine raznovrsnih kristala.

2. Atomi legirajućih elemenata grade hemijska jedinjenja, koja kristališu po posebnim kristalnim rešetkama, koje se razlikuju od kristalnih rešetki sastavnih komponenata.

3. Atomi legirajućih elemenata koji ulaze u sastav legure grade zajedničku rešetku. Pri tome zadržava se rešetka najviše zastupljenog elementa, dok se atomi manje zastupljenog elementa (rastvorenog) smještaju u rešetku najviše zastupljenog elementa (rastvarača).

Legure sastavljene od kristala ove vrste grade čvrsti rastvor. Atomi elementa koji ulaze u kristalnu rešetku rastvarača izazivaju deformacije unutar same rešetke, što dovodi do promjena osobina rastvarača. To se naročito ogleda u snižavanju temperature topljenja, povećanju tvrdoće i čvrstoće.

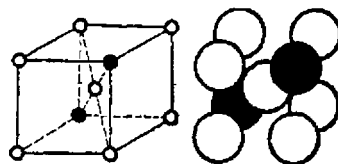
Pri nastajanju čvrstog rastvora (mješovitih kristala) atomi rastvorenog elementa mogu ući u kristalnu rešetku rastvarača na dva načina:

- zamjenom atoma i
- ispunjavanjem slobodnog prostora.

Pri nastajanju čvrstog rastvora zamjenom atoma, atomi rastvorenog elementa zauzimaju mjesta atoma osnovnog elementa (slika 1.13). Kod ovakvog nastanka mješovitog kristala mogu se desiti dva slučaja:

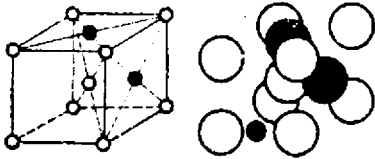
- a) atomi elementa koji se rastvara smješteni su pravilno, na određenim mjestima u rešetkama rastvarača,
- b) atomi elementa koji se rastvara smješteni su u rešetku rastvarača nepravilno.

Kod pravilne raspodjele atoma zbog simetrične deformacije rešetke može doći i do promjene tipa rešetke.



Slika 1.13. Kristalne rešetke legura nastale zamjenom atoma

Kod nepravilne raspodjele atoma u kristalnoj rešetki dolazi takođe do njene deformacije, a pri zagrijavanju na više temperature dolazi do seljenja atoma rastvorenog elementa iz zone gušće zaposjednutog dijela rešetke u zonu



Slika 1.14. Kristalne rešetke legura nastale ispunom slobodnog prostora

gdje ih ima manje. Ova pojava poznata je pod imenom difuzija. Ukoliko je temperatura viša, intenzitet difuzije je veći. Često vršimo zagrijavanja materijala radi difuzije da bismo postigli određena svojstva legura.

Kod nastajanja čvrstog rastvora ispunjavanjem slobodnog prostora atomi rastvorenog elementa ulaze u slobodne

prostore kristalne rešetke rastvarača (slika 1.14.) Ovakav nastanak kristalne rešetke mješovitih kristala javlja se kod legiranja željeza ugljenikom, niklom i drugim elementima.

1.3.5. Proces kristalizacije

Proces kristalizacije metala i njihovih legura obavlja se pri prelazu iz tečne faze u čvrsto stanje. Osim toga, do kristalizacije može doći i u čvrstom stanju pri prelazu iz jedne u drugu alotropsku modifikaciju (prekristalizacija).

Na osnovu dugogodišnjih ispitivanja došlo se do zaključka da se proces kristalizacije obavlja u dvije faze, i to:

- obrazovanje centara kristalizacije u cijeloj tečnoj fazi i
- rast kristala oko obrazovanih centara kristalizacije.

Oba procesa pri kristalizaciji dešavaju se istovremeno.

Osnovni uzrok i pokretačka sila procesa kristalizacije je težnja materijala ka minimumu slobodne energije.

Atomi materijala koji je u tečnom stanju nalaze se u haotičnom kretanju, dok se u čvrstom stanju ti isti atomi nalaze na tačno određenim mjestima u kristalnim rešetkama. I u samoj kristalnoj rešetki atomi se ne nalaze u stanju mirovanja, već osciluju oko svojih ravnotežnih položaja. Sa povišenjem temperature, amplituda oscilacija atoma u kristalnoj rešetki rastu. Sa porastom amplituda oscilacija (uz neprekidno dovođenje toplote), dolazi u jednom trenutku do granice kada privlačne sile unutar kristalne rešetke nisu u stanju da održe atome i oni prelaze u haotično kretanje (materijal se topi). Obrnuto, s odvođenjem toplote brzine kretanja atoma opadaju, a privlačne sile između njih postaju dovoljne da ih održe na tačno određenom mjestu i nastaje proces kristalizacije. Oba procesa se obavljaju uz dovođenje, odnosno odvođenje toplote, tj. čvrsto stanje \rightleftharpoons tečno stanje \pm toplota.

Kod topljenja materijala dovodimo toplotu, a pri očvršćavanju odvodimo toplotu.

Prelaz materijala iz jednog agregatnog stanja u drugo naziva se fazni preobražaj. Razlikujemo prelazak materijala iz čvrstog stanja u tečno (topljenje) i obrnuto — prelazak iz tečne faze u čvrsto stanje (očvršćavanja, krista-

lizacija). I jedan i drugi proces za čiste metale obavlja se na konstantnoj temperaturi, koja je različita za svaki metal, dok se kod legura ovaj proces obavlja u intervalu temperatura.

Da bi se obavio proces kristalizacije, potreban je vremenski interval koji zavisi od brzine hlađenja.

Proces kristalizacije shematski je prikazan na slici 1.15. Kristalizacija najčešće počinje na više mjesta u tečnoj fazi — stvaranjem centara kristalizacije. Na formiranje broja centara kristalizacije može se uticati brzinom hlađenja, prisustvom nečistoća i dodavanjem rastopini specijalnih materija, tzv. modifikatora.

Pojavu prvih centara kristalizacije prati oslobađanje toplote, a da bi se proces kristalisanja nastavio, potrebno je odvoditi toplotu. Novonastali kristali nadovezuju se na centre kristalizacije uz istovremenu pojavu novih centara kristalizacije. Kristali se orijentišu u pravcu odvođenja toplote. U istopljenoj metalnoj masi pravci odvođenja toplote su različiti, pa je i orijentacija nastalih kristala takođe različita.

Povećanjem broja izdvojenih kristala smanjuje se količina tečne faze, i u jednom trenutku kristali se počinju dodirivati i zadirati jedan u drugi.

Masa koja je očvrsla oko jednog centra kristalizacije zove se metalno (kristalno) zrno ili kristalit. Kristalno zrno sastavljeno je od veoma velikog broja elementarnih kristalnih ćelija. Metalna zrna nemaju pravilan oblik zbog pojave ometanja pri kraju kristalizacije. S obzirom na to da su metalna zrna nepravilno orijentisana, u ukupnoj masi neće doći do pojave anizotropije, tj. različitih svojstava u različitim pravcima.

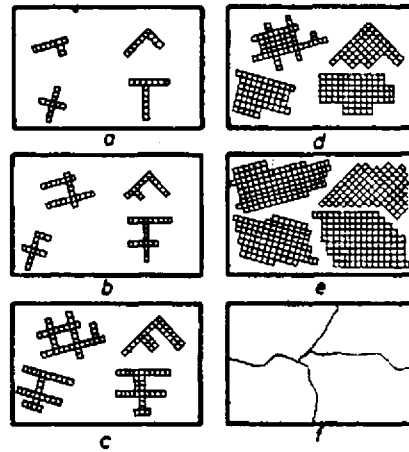
Na broj metalnih zrna, a time i na njihovu veličinu, možemo uticati u procesu livenja, a i kasnije — daljom preradom, kovanjem, valjanjem, presovanjem i termičkom obradom.

Na veličinu metalnog zrna u procesu kristalizacije možemo uticati na dva načina, i to:

- brojem centara kristalizacije koji se pojavljuju po jednom kvadratnom centimetru u jednoj minuti,
- brzinom kristalizacije (brzina porasta metalnog zrna mm/min.).

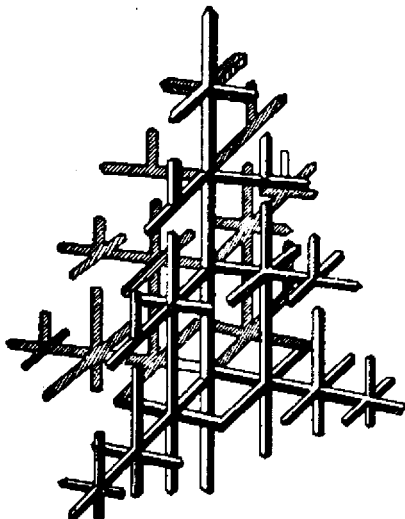
Sa povećanjem brzine hlađenja povećava se broj centara kristalizacije. Zbog toga predmeti koji se liju u kokilama imaju sitnozrnastiju strukturu od predmeta livenih u pijesku.

Jedna od vrlo važnih pojava u procesu kristalizacije je tendencija kristala da rastu u određenim pravcima. Na slici 1.16 prikazan je pojednostavljeni crtež kristala, koji se javlja kod metala i legura koji kristališu po kubnom sistemu. Zbog sličnosti sa drvetom dobio je ime dendrit (od grčke riječi koja

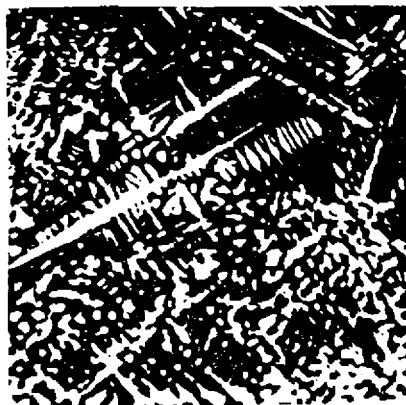


Slika 1.15. Proces kristalizacije

znači „sličan drvetu”). Na slici se vidi da se kristal grana u tri međusobno okomita pravca. Ovo je idealizirani oblik dendrita, a kako izgleda stvarni, vidi se na slici 1.17, koja prikazuje dendritnu građu u leguri bakar – cink.



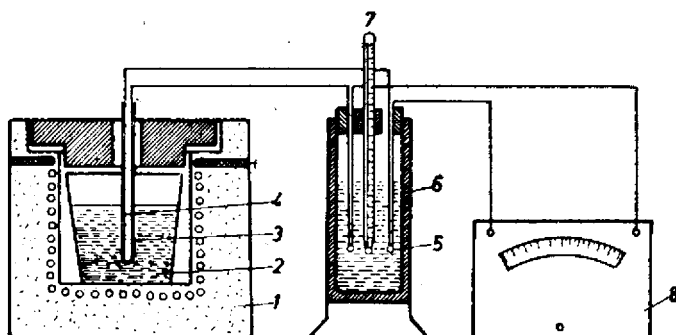
Slika 1.16. Dendrit



Slika 1.17.
Dendritna struktura u leguri bakar-cink

1.4. TERMIJSKA ANALIZA KRIVE ZAGRIJAVANJA I HLAĐENJA ČISTIH METALA

Svaka promjena strukture, metala ili legure za vrijeme hlađenja ili zagrijavanja praćena je promjenom fizičkih i mehaničkih osobina. Ponašanje materijala pri hlađenju ili zagrijavanju možemo proučavati termijskom analizom. Shema uređaja za termijsku analizu data je na slici 1.18. Uređaj se



Slika 1.18. Shema uređaja za termijsku analizu

sastoji od električne peći (1), u koju je smješten lončić (2), u kome se nalazi uzorak metala ili legure za ispitivanje. U uzorak je uronjena zaštitna cjevčica

(3), u kojoj je smješten termoelement (4). Termoelement se sastoji od dvije žice malog prečnika od različitog metala ili legure koje su na jednom kraju zavarene i čine topli spoj. Slobodni krajevi se vode u termos-bocu (6), koja održava konstantnu temperaturu (najčešće 0°C) i čine mjesta hladnog spoja (5). Od mjesta hladnog spoja provodnicima povezujemo uređaj za termijsku analizu sa milivoltmetrom (8), čija je skala obično baždarena u $^{\circ}\text{C}$. U termos-bocu smješten je termometar 7 pomoću kojeg kontroliramo temperaturu u termos-boci. Ako se zagrijava topli spoj, na krajevima hladnog spoja javlja se električni napon — termo napon. Ukoliko je veća razlika temperatura toplog i hladnog spoja, utoliko će i napon na krajevima biti veći, a time i otklon kazaljke na milivoltmetru, koja odmah pokazuje temperaturu uzorka za ispitivanje.

Ponašanje materijala prilikom hlađenja ili zagrijavanja možemo prikazati u dijagramu, gdje se na ordinatu nanosi temperatura, a na apscisu vrijeme hlađenja ili zagrijavanja. Unošenjem podataka za temperaturu i vrijeme u dijagram dobijemo niz tačaka od kojih, kada ih spojimo, dobijemo krivu hlađenja.

Promjene koje nastaju pri hlađenju ili zagrijavanju pokazaćemo na čistom bakru. Uzorak zagrijavanjem prevodimo u tečno stanje i još pregrijemo, a zatim isključimo peč i veoma lagano hladimo. Promjene temperature pratimo na milivoltmetru.

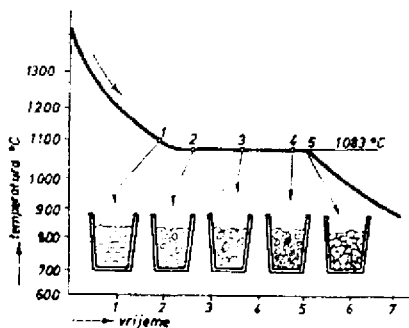
Pri kontinualnom odvođenju toplote dolazi do stalnog snižavanja temperature, a time i smanjenja brzine kretanja molekula tečnog bakra sve do određene temperature poznate pod imenom temperatura ili tačka očvršćavanja, odnosno temperatura kristalizacije, kada se atomi sređuju u određene kristalne rešetke.

Tada se u tečnoj masi formiraju prvi centri kristalizacije oko kojih se obavlja očvršćavanje i stvaranje metalnih zrna. Pojavom prvih kristala oslobada se određena količina toplote, koja ne dozvoljava snižavanje temperature. Očvršćavanjem se smanjuje količina tečne faze, a očvrslih kristala je sve više (slika 1.19). Na kraju očvršćavanja u tački 5. sva tečna faza je prešla u čvrsto stanje, kada prestaje oslobađanje toplote, a temperatura ravnomjerno dalje opada.

Količina toplote u džulima koja se oslobodi pri očvršćavanju 1 grama tečne materije na temperaturi očvršćavanja naziva se latentna ili skrivena toplota očvršćavanja.

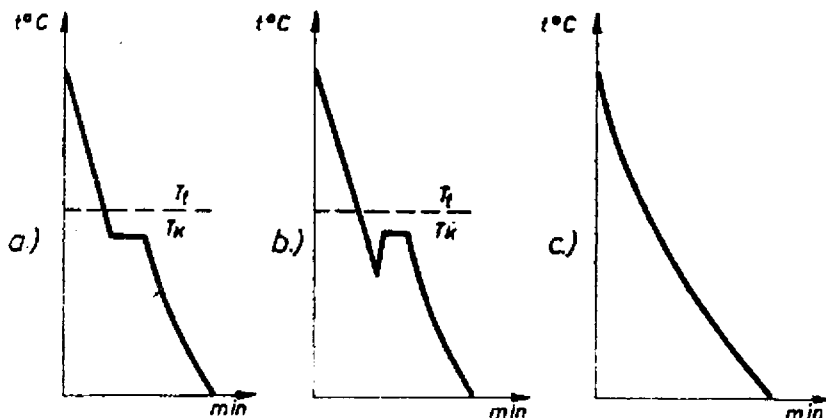
Obrnuto, zagrijavanjem čistog bakra do 1038°C , temperatura će kontinualno rasti i tada nastaje zastoj, a bakar se počinje topiti. Temperatura

neće rasti iako dovodimo toplotu sve dotle dok sav bakar ne pređe u tečnu fazu, poslije čega temperatura ponovo ravnomjerno raste. Teoretski, temperatura topljenja jednaka je temperaturi očvršćavanja. Da bi se ovo ostvarilo, mora se vršiti veoma lagano hlađenje. Ako se brzo hladi, kao što je



Slika 1.19. Kriva hlađenja čistog bakra

slučaj u praksi kod livenja, dolazi do pothlađivanja i kristalizacija se obavlja na nižoj temperaturi (slika 1.20). Ispitivanja su pokazala da se tečni materijali mogu pothladiti do 18% ispod temperature topljenja T_f .



Slika 1.20. Krive hlađenja: a i b – kristalne materije, c – amorfne materije

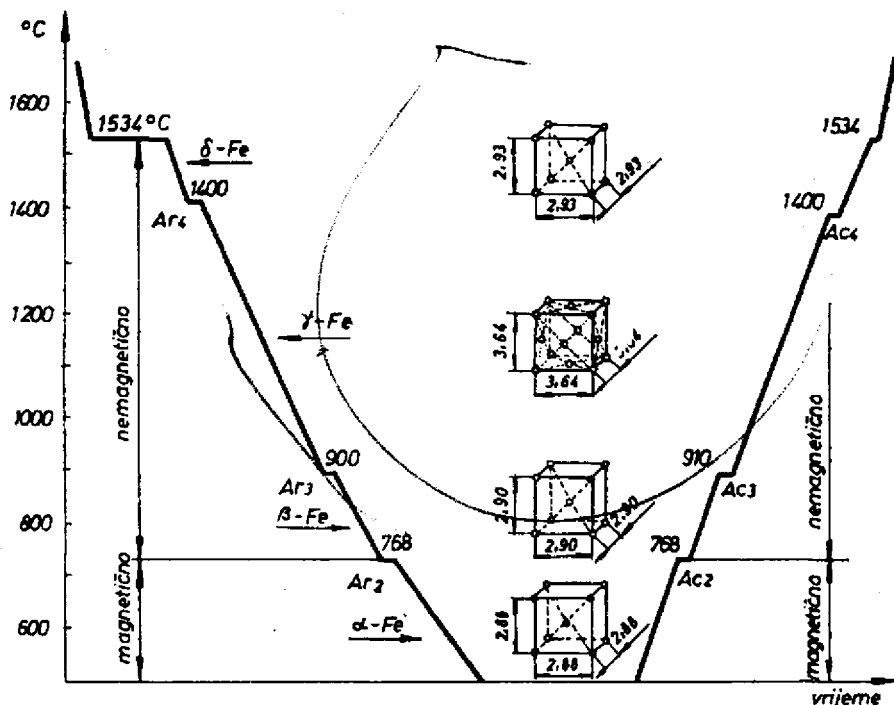
Ako je hlađenje nešto sporije, do pothlađivanja takođe dolazi. Poslije izdvojenih prvih kristala, zbog oslobađanja toplote, kristalizacija se obavlja na nešto višoj temperaturi, ali još uvijek nižoj od temperature topljenja (slika 1.20b). Ovako prikazane krive hlađenja odnose se na metale koji poslije očvršćavanja ne mijenjaju kristalnu rešetku. Amorfne materije nemaju tačke zastoja.

Mnogi metali, kao što su željezo, kobalt, titan, hrom i drugi po završetku kristalizacije mijenjaju svoju kristalnu rešetku — zavisno od temperature.

Sposobnost metala da mijenjaju oblik kristalne rešetke sa promjenom temperature naziva se alotropija. Kristalne strukture dobivene na ovaj način nazivaju se alotropske modifikacije i označavaju grčkim slovima α , β , γ , δ itd. Alotropne modifikacije koje odgovaraju nižim temperaturama, nose oznaku α , a idući prema višim temperaturama oznaku β itd. Krive hlađenja i zagrijavanja za metale koji imaju alotropske modifikacije prikazane su na slici 1.21 za željezo.

Do temperature od 1534°C imamo lagano hlađenje i opadanje temperature. Na toj temperaturi dolazi do kristalizacije željeza. Prvi izdvojeni kristali su kristali δ Fe — sa prostorno centriranom kubnom rešetkom. Po završetku kristalizacije temperatura ravnomjerno opada do 1400°C , kada se ponovo pojavljuje zastoj, iako odvodimo toplotu. Na toj temperaturi dolazi do prekrystalizacije. Prekrystalizacija se obavlja uz oslobađanje toplote i nastaje tzv. γ Fe koje ima površinski centriranu kubnu rešetku. Po završetku prekrystalizacije temperatura ponovo opada sve do 900°C , kada se ponovo pojavljuje zastoj. Odvodimo toplotu, a temperatura ostaje konstantna. Ponovo dolazi do prekrystalizacije γ Fe u β Fe koje ima prostorno centriranu kubnu rešetku. Daljim hlađenjem dolazi do još jednog zastoja na temperaturi 768°C . Na toj temperaturi nema promjene kristalne rešetke i metalnih zrna. Na temperaturi 768°C željezo dobiva magnetne osobine i ispod te temperature je magnetično, a iznad te temperature je nemagnetično. Ova zastojna tačka nosi oznaku A_{r_2} i zove se tačka Kiri.

Pri zagrijavanju promjene se odigravaju u suprotnom pravcu i na istim temperaturama, osim tačke Ac_3 , koja je za 10°C viša, nego pri hlađenju. To znači da će preobražaj β Fe u γ Fe pri zagrijavanju teći na temperaturi 910°C .



Slika 1.21. Krive hlađenja i zagrijavanja za čisto željezo

Pošto se sve tačke preobražaja pri hlađenju i zagrijavanju ne odvijaju uvijek na istim temperaturama, to pored oznake A dajemo indeks c za zagrijavanje i r za hlađenje. Na taj način preobražaj δ Fe \rightarrow γ Fe nosi oznaku Ar_4 ; γ Fe \rightarrow δ Fe — Ac_4 , γ Fe \rightarrow β Fe — Ar_3 , β Fe \rightarrow γ Fe Ac_3 , β Fe \rightarrow α Fe — Ar_2 i α Fe \rightarrow β Fe — Ac_2 .

1.5. REKRISTALIZACIJA

Pri obradi predmeta plastičnim deformacijama dolazi do deformacije kristalnih zrna, a time i do promjene mehaničkih osobina. Da bismo do izvjesne granice vratili metalna zrna u prvobitni oblik, koristimo se rekristalizacijom.

Pod rekristalizacijom podrazumijevamo proces oslobađanja deformisanog metala ili legure od izobličenosti i defekta njegove kristalne strukture. Proces rekristalizacije prati odstranjivanje unutrašnjih naprezanja, stvaranje novih zrna pravilnog oblika u zamjenu za deformisane, daljim njihovim rastom uz smanjivanje tvrdoće, a povećanje plastičnosti.

Da bi se obavio proces rekristalizacije, potrebna je određena temperatura. Ispitivanjem je utvrđeno da temperatura rekristalizacije zavisi od temperature topljenja i za neke važnije metale približno iznosi: željezo 450°C , bakar 270°C , aluminijum i magnezijum 150°C , volfram 1200°C , olovo i kalaj niže od 20°C itd.

Pri zagrijavanju u području niskih temperatura deformisani materijal gubi jedan dio unutrašnjih naprezanja i potpuno odstranjuje elastična naprezanja i iskrivljenosti kristalne rešetke, u granicama jednog metalnog zrna. Pri tome dolazi do vraćanja kristalnih rešetki u normalno i djelimično vraćanje u prvobitno stanje.

Daljim zagrijavanjem materijala do temperature rekristalizacije stvaraju se novi centri rekristalizacije oko kojih rastu novi kristali na račun deformisanih kristalnih zrna. Orijentacija novih zrna je proizvoljna i nezavisna od orijentisanih deformisanih kristalnih zrna.

Deformisana struktura se u potpunosti zamjenjuje novim nedeformisanim kristalnim zrnima.

Kao rezultat rekristalizacije javlja se potpuno oslobođenje materijala od unutrašnjih naprezanja sa znatnim smanjenjem tvrdoće i jačine na kidanje uz povećanje plastičnosti.

Novonastala metalna zrna rekristalizacijom su po zapremini mala i kao takva termodinamički nepostojana. Zbog toga ova zrna imaju težnju da se uvećaju.

Ispitivanja pokazuju da zadržavanjem materijala na postignutoj temperaturi dolazi do rasta metalnih zrna. Krupnija metalna zrna na račun manjih zrna, koja ih okružuju, dalje rastu, tako da mala zrna potpuno iščezavaju i na taj način dobijamo krupnozrnastu strukturu, čime se mijenjaju osobine materijala.

1.6. DIJAGRAMI STANJA

Čisti metali po svojim osobinama ne mogu odgovoriti zahtjevima savremenih mašina i uređaja. Zbog toga u tehnici najveću primjenu nemaju metali, već njihove legure. Legure često imaju dobre mehaničke, tehnološke, magnetne i druge osobine, koje nisu svojstvene čistim metalima. Građa legura je složenija nego građa čistih metala.

Legura se sastoji najmanje od dva elementa, od kojih jedan mora biti metal. Elementi koji grade legure zovu se komponente. Prema broju komponentata legure se mogu podijeliti na: dvo, tro i više komponentne legure. Legure uvijek sadrže izvjestan procenat primjesa, ali se one ne uzimaju u obzir zbog svoje male količine, koja bitno ne utiče na tok kristalizacije, a i osobine legure.

Legure se dobijaju kada se elementi pomiješaju i prevedu u tečno stanje. U tečnom stanju velik broj elemenata se rastvara jedan u drugom, u bilo kom procentu. Prilikom hlađenja kristalizacijom nastaju legure. Međutim, postoje i izuzeci, npr., željezo i olovo. Ova dva metala se ne rastvaraju ni u čvrstom ni u tečnom stanju. Ne rastvaraju se metali u tečnom stanju ako imaju veliku razliku između prečnika atoma i temperatura topljenja.

Pri očvršćavanju, legure mogu da sadrže tri različita tipa izgrađenih kristala, i to: kristale čistih metala, kristale čvrstog rastvora i kristale hemijskog jedinjenja. Ove tipove kristala nazivamo fazama. Jedna faza je homogena i ima na svakom mjestu isti sastav, tvrdoću, gustinu itd.

Tako tečni rastvor predstavlja jednu fazu, izdvojen metal drugu, hemijsko jedinjenje treću itd. Alotropne modifikacije su različite faze istog metala.

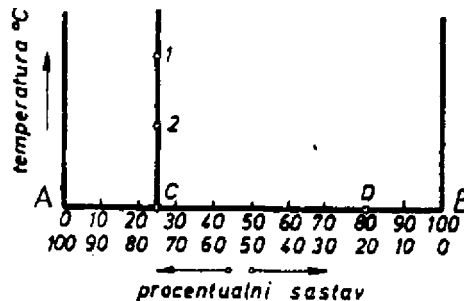
Pri ispitivanju građe legura, pri izboru režima termičke obrade, režima obrade plastičnim deformacijama u toplom stanju, pri livenju legura koriste se dijagramima stanja.

Sve preobražaje koji nastaju u leguri, zavisno od temperature i procentualnog odnosa komponenata koje grade leguru, možemo predstaviti grafički pomoću dijagrama stanja. Dijagrami stanja se dobijaju u laboratorijama na osnovu termijske analize. U ovakvim dijagramima na ordinatu se nanose vrijednosti temperature, a na apscisu procentualni sastav legure.

Ako sa A i B označimo komponente koje ulaze u sastav legure, tada se na apscisu nanosi procentualni sastav, kao što je prikazano na slici 1.22. Krajnja lijeva tačka A predstavlja 100% komponente A i 0% komponente B. Krajnja tačka (desna na apscisi) B predstavlja 100% komponente B i 0% komponente A. To znači da krajnje tačke predstavljaju čiste elemente A i B. Svaka tačka u intervalu od A do B predstavlja dvojni leguru. Tako, npr., tačka C predstavlja dvojni leguru sa 25% B i 75% A, a tačka D ima sastav 80% B i 20% A. Obično se na apscisu nanosi procentualni sastav jedne komponente, a druga komponenta predstavlja dopunu do 100% legure.

Svaka vertikalna linija, povučena kroz bilo koju tačku na apscisi, predstavlja promjenu temperature za odabranu leguru. Na nju se nanose temperature pri kojima dolazi do promjene građe kristalnih zrna ili promjene agregatnog stanja. Legure se mogu pojaviti u tri agregatna stanja: čvrstom, tečnom i gasovitom. Osim toga, kod izvjesnog broja legura dolazi i do promjena u čvrstom stanju. Ako se sve tačke koje odgovaraju jednoj vrsti promjene, npr., početku kristalizacije, spoje međusobno, dobićemo krivu liniju, tzv. likvidus — liniju koja razgraničava tečnu fazu od mješavine kristala i tečne faze. Druga linija bi bila granica završetka kristalizacije, i naziva se solidus—linija.

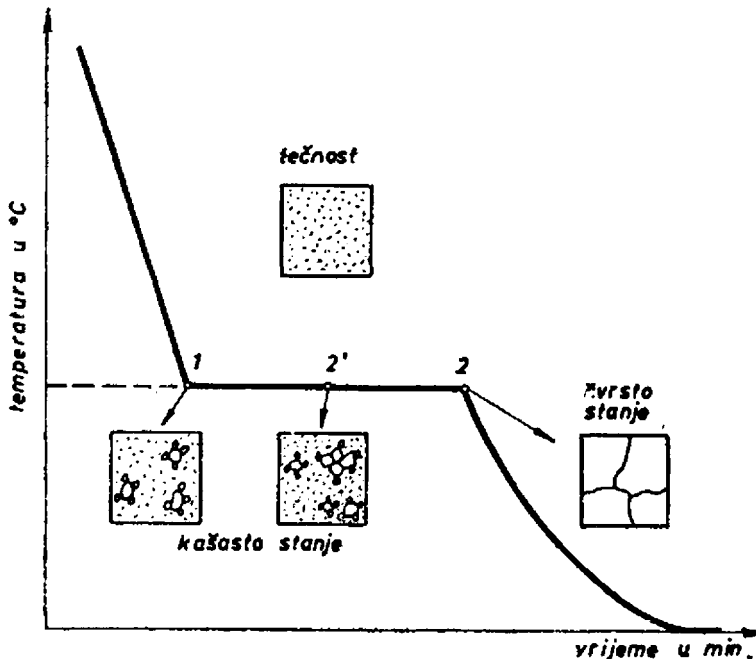
Da bi se konstruisao jedan dijagram, potrebno je u laboratoriji izvršiti seriju ispitivanja legura sastavljenih od komponenata A i B različitog sastava. Za te legure, koristeći se termijskom analizom, određuju se dijagrami hladenja u koordinatnom sistemu, vrijeme i temperatura (slika 1.23). Tačka 1. predstavlja početak kristalizacije, a tačka 2. završetak kristalizacije.



Slika 1.22. Koordinate za konstrukciju dijagrama stanja

Osim termijske analize za konstrukciju dijagrama stanja koriste se različita ispitivanja, kao što su: metalografska ispitivanja, rendgenski snimci, krive promjene fizičkih svojstava itd.

Dijagrami stanja daju u sažetoj i preglednoj formi sliku promjene građe i svojstava legure pri promjeni koncentracije komponenata i temperature.



Slika. 1.23. Dijagram hlađenja za čisti metal

Glavnim nedostatkom dijagrama stanja možemo smatrati to što on ne uzima u obzir brzinu hlađenja ili zagrijavanja. Svi dijagrami stanja su konstruisani za slučaj veoma laganog hlađenja i zagrijavanja i odgovaraju uslovima ravnoteže. Međutim, u stvarnosti dopušta se znatno brže hlađenje ili zagrijavanje, pa je faktor vremena veoma značajan.

Prema karakteru međusobnog djelovanja metala koji ulaze u sastav legure, iste možemo podijeliti na:

- legure potpune rastvorljivosti u tečnom i čvrstom stanju
- legure u obliku mehaničke mješavine (smjese)
- legure djelimične rastvorljivosti u tečnom i čvrstom stanju
- legure oblika hemijskog jedinjenja i
- legure koje predstavljaju kombinacije prethodnih.

1.7. DIJAGRAM STANJA POTPUNE RASTVORLJIVOSTI U TEČNOM I ČVRSTOM STANJU

Pojedini metali imaju osobinu da primaju u svoju kristalnu rešetku atome drugih elemenata. Ulaskom stranih atoma u kristalnu rešetku stvaraju se čvrsti rastvori koji imaju građu kristalne rešetke kao i osnovni metali. Ovi čvrsti rastvori se obilježavaju grčkim slovima α , β , γ , δ itd.

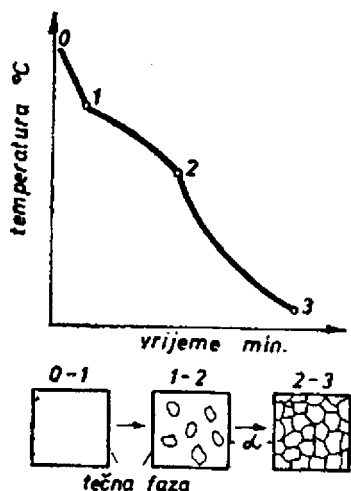
Pri metalografskim ispitivanjima, zbog ulaska atoma u kristalnu rešetku drugog metala, ne možemo u principu razlikovati čvrsti rastvor od čistog metala. Struktura se sastoji od jedne mikroskopski homogene strukturne komponente.

Da bi nastao čvrsti rastvor, potrebni su određeni uslovi, i to:

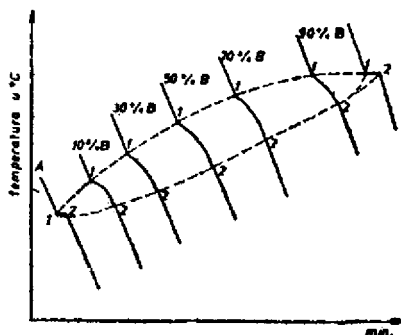
- oba metala moraju se u tečnom stanju potpuno rastvarati
- oba metala moraju imati isti tip kristalne rešetke
- konstante rešetke oba metala mogu se razlikovati najviše za 14% i
- oba metala moraju imati izvjesnu hemijsku sličnost.

Takvi parovi metala su bakar — nikal, zlato — bakar i dr.

Pri hlađenju legure ovoga tipa bilo koga sastava pojavljuju se dvije prevojne tačke na krivoj hlađenja (slika 1.24). Hlađenjem do temperature koja odgovara prvoj prevojnoj tački 1. na krivoj hlađenja imamo homogeni rastop metala. U intervalu temperatura koje odgovaraju prevojnim tačkama 1 i 2 rastop prelazi u kristale čvrstog rastvora (α).



Slika 1.24. Kriva hlađenja dvojne legure sa neograničenom rastvorljivošću



Slika 1.25. Kriva hlađenja

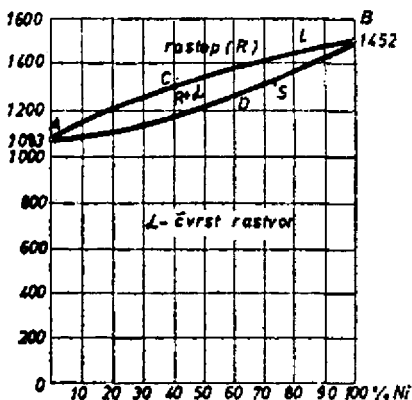
Prelaz iz tečnog stanja u čvrsto praćen je oslobodenjem određene količine toplote, zbog čega očvršćavanje traje duže vrijeme, a kriva hlađenja u tom intervalu ima manji nagib. Ako je hlađenje dovoljno sporo, tada je dostizanjem temperature, koja odgovara prevojnoj tački 2, rastop potpuno preobražen u čvrsti rastvor α . Daljim hlađenjem nema promjene faza, pa je hlađenje znatno brže i kriva hlađenja u intervalu od 2 do 3 je strmija. Na taj način prva tačka prevoja 1 odgovara početku kristalizacije, a druga tačka prevoja 2 završetku kristalizacije. U intervalu kristalizacije od 1 do 2 imamo kašastu masu, izdvojeni kristali čvrstog rastvora plivaju u rastopu.

Za konstrukciju dijagrama potrebno je izvršiti ispitivanja za čiste metale A i B i seriju ispitivanja za njihove legure različitog sastava i konstruisati njihove krive hlađenja (slika 1.25). Interval između koncentracija elemenata u leguri možemo birati (veći ili manji). Što je interval manji — to je dijagram

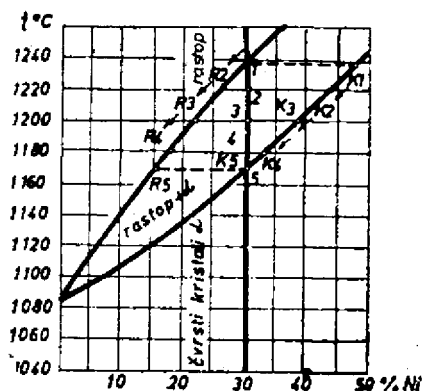
tačniji i bolji za upotrebu. Da bi se izbjegao ogroman broj cifara koje odgovaraju procentualnim sastavima legura, temperaturama početka i završetka kristalizacije, crta se daleko pregledniji dijagram, a to je dijagram stanja legure.

Za primjer ćemo uzeti dijagram stanja za leguru bakar — nikl. Bakar se topi, a ujedno i očvršćava na temperaturi 1083°C (komponenta A) dok nikl na temperaturi 1452°C (komponenta B). Na osnovu podataka dobijenih termijskom analizom konstruisan je dijagram stanja na slici 1.26.

Gornja linija dijagrama A C B odgovara početku izdvajanja kristala i zove se likvidus (od latinske riječi liquidus, što znači tečan) i iznad nje nalazi se rastop (R) (sve legure su u tečnom stanju). Donja linija A D B zove se solidus-linija (od latinske riječi solidus, što znači čvrst) i ispod nje sve legure se nalaze u čvrstom stanju (čvrsti rastvor). U oblasti između solidus i likvidus-linije imamo mješavinu rastopa i čvrstih kristala. Iz dijagrama se vidi da se ova legura pojavljuje u dvije faze, i to: čvrsti rastvor (α kristali) i rastop (R).



Slika 1.26. Dijagram stanja bakar-nikl



Slika 1.27. Dio dijagrama stanja bakar-nikl

U intervalu očvršćavanja sastav kristala i rastopa nije isti. Prvi izdvojeni kristali su bogatiji elementom koji ima višu temperaturu topljenja (Ni), dok rastop postaje bogatiji elementom koji ima nižu temperaturu topljenja (Cu). Sastav rastopa i sastav izdvojenih kristala u intervalu između likvidus i solidus-linije zavisi od temperature.

Način kristalisanja čvrstog rastvora biće objašnjen na leguri koja sadrži 70% Cu i 30% Ni (slika 1.27). Ako pregrijani rastop sa temperature od 1260°C lagano hladimo do tačke 1. na likvidus-liniji, tada će se izdvojiti prvi kristali čvrstog rastvora čiji sastav možemo pročitati u tački K_1 (47,5% Ni i 52,5% Cu). Pošto se izdvajaju kristali sa većim sadržajem nikla, to će rastop postati siromašniji niklom, a bogatiji bakrom.

Na temperaturi od 1220°C (tačka 2) izdvojeni kristali imaju sastav koji odgovara tački K_2 na solidus-liniji (43% Ni i 57% Cu), a sastav rastopa očitavamo na likvidus-liniji u tački R_2 (26,5% Ni i 73,5 Cu). U tački 3, koja odgovara temperaturi od 1200°C, sastav kristala K_3 je 38% Ni i 62% Cu, a sastav rastopa R_3 je 21,5% Ni i 78,5 Cu. Daljim snižavanjem tempe-

rature rastop sve više postaje bogatiji sa Cu, a kristali siromašniji sa Ni: u tački 4 sastav kristala K_4 je 32,5% Ni i 67,5% Cu, a sastav rastopa je R_4 17,5% Ni i 82,5% Cu. Hlađenjem do tačke 5 na solidus-liniji količina rastopa je gotovo svedena na nulu i posljednji sastav rastopa odgovarao bi sastavu R_5 15% Ni i 85% Cu. Kada se potpuno izvrši očvršćavanje, kristali imaju sastav 30% Ni i 70% Cu.

Na osnovu ovoga možemo izvući zaključak da se opadanjem temperature mijenja sastav kristala i rastopa, pri čemu rastop slijedi likvidus-liniju, a kristali solidus-liniju.

Osim toga, opadanjem temperature smanjuje se količina rastopa Q_R , a količina kristala Q_K raste. U svakom trenutku možemo odrediti količinu kristala i količinu rastopa koristeći se zakonom poluge (slika 1.28). Ako kroz tačku a, za koju tražimo količinu kristala i količinu rastopa, povučemo liniju paralelnu sa apscisom, dobićemo duž ab , ac i bc koje se zovu linije povezivanja. Koristeći se zakonom poluge možemo napisati:

$$Q_R \cdot ab = Q_K \cdot ac \text{ ili}$$

$$Q_R \cdot bc = Q_{R+K} \cdot ac \text{ ili}$$

$$Q_K \cdot bc = Q_{R+K} \cdot ab,$$

gdje je Q_{R+K} ukupna količina legure. Na osnovu ovoga mogu se odrediti količine kristala i rastopa ako je poznata Q_{R+K} :

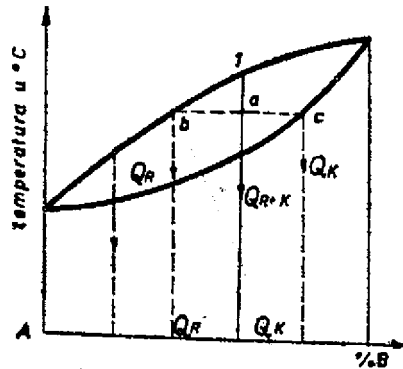
$$Q_K = Q_{R+K} \cdot \frac{ab}{bc} \quad \text{i} \quad Q_R = Q_{R+K} \cdot \frac{ac}{bc}.$$

Stanje koje odgovara tački (a) zove se ravnotežno stanje i, ma koliko dugo držali leguru na toj temperaturi, nema nikakvih promjena. Zbog toga se ovaj dijagram zove stabilni ili ravnotežni.

Ako posmatramo promjenu sastava kristala prilikom hlađenja, dolazimo do zaključka da prvi izlučeni kristali sadrže veći procenat nikla, a manji sadržaj bakra. Na kraju očvršćavanja kristal po cijelom presjeku ima isti sastav. Različite koncentracije između jezgra i ivica kristala izjednačavaju se difuzijom.

Ako bismo hlađenje legure izveli velikom brzinom, tada bi prvi izlučeni kristali imali velik sadržaj Ni, a posljednji očvršli kristali velik sadržaj bakra.

U praksi, hlađenje se izvodi konačnom brzinom i zato sastav kristala nije po presjeku homogen. Jezgro kristala sadrži veći procenat metala čija je temperatura topljenja viša, a spoljni omotač veći sadržaj metala čija je temperatura topljenja niža. Difuzija se i u tim slučajevima obavlja, ali, pošto je vrijeme očvršćavanja kratko, nema vremena da se obavi do kraja. Intenzitet difuzije na sobnoj temperaturi je veoma mali i, da bi se sastav kristala izjednačio, potreban je duži vremenski interval od nekoliko mjeseci pa i godina.



Slika 1.28. Zakon poluge

1.8. DIJAGRAM STANJA LEGURA KOJE GRADE MEHANIČKE MJEŠAVINE

Legure ovog tipa nastaju kada komponente koje ulaze u sastav legure imaju ove osobine:

- da se u tečnom stanju potpuno rastvaraju,
- u čvrstom stanju atomi jedne komponente ne ulaze u kristalnu rešetku druge komponente,
- ne obrazuju hemijska jedinjenja,
- nemaju alotropskih modifikacija.

U ovu grupu legura spadaju legure olovo – antimon, kalaj – cink, olovo – srebro, bizmut – kadmijum i druge.

Ponašanje ovih legura pratićemo na dijagramu stanja olovo (Pb) i antimon (Sb). Uzajamna rastvorljivost ovih elemenata u čvrstom stanju je neznatna, i smatraćemo ih kao potpuno nerastvorljive.

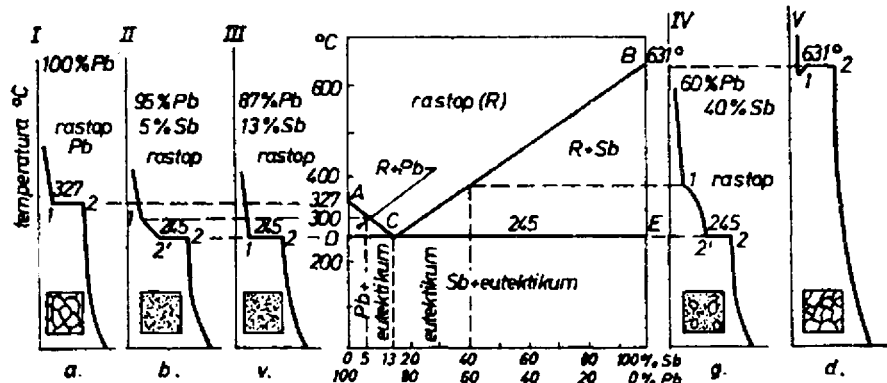
Dijagram stanja se konstruiše na osnovu krivulja hlađenja za čiste metale i serije ispitivanja legura različite koncentracije. Termijskom analizom dolazi se do prevojnih tačaka na krivama hlađenja, tj. početka i završetka kristalizacije. U tabeli 1.5 dato je nekoliko podataka početka i završetka kristalizacije za izvjesne procenete ove legure dovoljne za konstrukciju dijagrama.

Tabela 1.5

Temperature početka i završetka kristalizacije

Legura	Sastav %		Temperat. kristalizac. u °C	
	Olovo Pb	Antimon Sb	početak	završetak
I	100	0	327	327
II	95	5	300	245
III	90	10	260	245
IV	87	13	245	245
V	60	40	395	245
VI	25	75	565	245
VII	0	100	631	631

Na osnovu ovih podataka nacrtan je dijagram stanja legure olovo – antimon, slika 1.29.



Slika 1.29. Dijagram stanja olovo-antimon

Prilikom ispitivanja olova i antimona vidi se da ovi metali imaju samo jednu tačku zastoja, a po završetku kristalizacije struktura posmatrana pod mikroskopom sastoji se od jednorodnih (homogenih) zrna. Iz tabele 1.5, a takođe iz dijagrama vidi se da legura koja se sastoji od 87% Pb i 13% Sb ima samo jednu zastoju tačku. Ova tačka je označena sa C u dijagramu stanja i zove se eutektička tačka. Ova legura ima najnižu tačku topljenja od svih mogućih legura. Tačka je zajednička za likvidus i solidus-liniju, što znači da eutektička legura ili eutektikum ima samo jednu tačku topljenja i nema intervala topljenja, odnosno očvršćavanja.

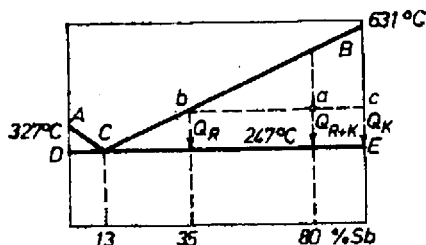
Na eutektičkoj temperaturi razlaže se homogeni rastop u heterogenu smjesu kristala olova i antimona. Kao rezultat razlaganja dobija se sitnozrnasta smjesa koja često ima pravilnu građu i zove se eutektički mikrokonstituent, zbog čega je i dobio ime (eutektikum — dobra građa).

Legure koje imaju sastav koji odgovara eutektičkoj tački zovu se eutektičke legure. Legure koje se u dijagramu stanja nalaze lijevo od eutektičke tačke zovu se podeutektičke legure, a koje leže desno — nadeutektičke legure.

Očvršćavanje podeutektičke legure pratićemo na krivoj hlađenja II (95% Pb i 5% Sb). Na krivoj hlađenja se vide tri karakteristične tačke 1, 2' i 2. Hlađenjem do temperature koja odgovara prevojnoj tački 1 (300°C) počinje izdvajanje iz tečnog rastopa čistih kristala olova. Izdvajanjem čistog olova, rastop se obogaćuje većim procentom antimona i kada hlađenjem dostignemo temperaturu od 245°C, iz rastopa se izdvojilo toliko olova da je sastav rastopa dostigao koncentraciju eutektičke legure (tačka 2' na krivoj hlađenja). Ostatak legure (eutektikuma) očvršćava na temperaturi od 245°C. Po završetku očvršćavanja legura se sastoji od mješavine kristala olova i eutektikuma.

Očvršćavanje nadeutektičke legure pratićemo na krivoj hlađenja IV (60% Pb i 40% Sb). I na ovoj krivoj hlađenja primjećuju se tri karakteristične tačke: 1, 2' i 2. Hlađenjem do temperature koja odgovara prevojnoj tački 1 na krivoj hlađenja (temperatura 395°C) počinje izdvajanje iz rastopa čistih kristala antimona. Izdvajanjem kristala antimona u rastopu se povećava procenat olova. Postepenim hlađenjem do temperature od 245°C izdvojilo se toliko čistog antimona da je koncentracija rastopa dostigla sastav eutektičke legure koja očvršćava na konstantnoj temperaturi. Po završetku očvršćavanja legura se sastoji od kristala čistog antimona u eutektikumu (nadeutektičke legure).

Sastav rastopa i izlučenih kristala kao i njihove težinske odnose možemo odrediti po zakonu poluge (slika 1.30). Ako kroz tačku (a) koja odgovara zadanoj temperaturi povučemo liniju konstantne temperature, dobićemo na likvidus-liniji tačku (b) koja nam pokazuje sastav rastopa (65% Pb i 35% Sb). Izdvojeni kristali su čisti antimon (tačka C).



Slika 1.30. Primjena zakona poluge na dijagram stanja olovo-antimon

Odnos između težine izdvojenih kristala Q_K i težine rastopa Q_R može se (koristeći se zakonom poluge), napisati:

$$\frac{Q_K}{Q_R} = \frac{ab}{ac}$$

Pri procesu kristalisanja može da dođe do razdvajanja eutektikuma i izdvojenih kristala. Kod podeutektičkih legura izdvojeni kristali olova su teži i padaju na dno, a eutektička legura je lakša i pliva na površini. Obrnuto je kod nadeutektičkih legura.

1.9. DIJAGRAM STANJA LEGURA SA DJELIMIČNOM RASTVORLJIVOŠĆU U ČVRSTOM STANJU

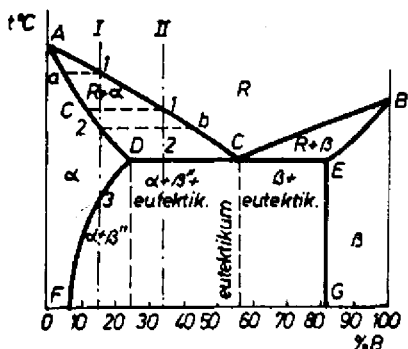
U ovu grupu spadaju legure čije komponente imaju sljedeće osobine:

- u tečnom stanju se potpuno rastvaraju u neograničenom odnosu
- prilikom očvršćavanja postoji ograničena međusobna rastvorljivost komponenata.

Ove legure možemo podijeliti u dvije grupe, i to:

- legure sa djelimičnom rastvorljivošću i sa eutektikumom i
- legure sa djelimičnom rastvorljivošću i sa peritektikumom.

Legure sa djelimičnom rastvorljivošću i sa eutektikumom pojavljuju se u kombinaciji elemenata Al-Cu, Al-Si, Cu-Ag i druge. Na slici 1.31, dat je dijagram stanja u opštem slučaju sa komponentama A i B. Linija A C B zove se likvidus-linija i iznad nje se nalaze komponente potpuno rastvorene (R). Linija A D C E B naziva se solidus-linija i ispod nje imamo čvrsto stanje legure. Na likvidus-liniji počinje očvršćavanje i završava se na solidus-liniji. Linija D C E naziva se linija eutektičkog preobražaja, a tačka C eutektička tačka.



Slika 1.31. Dijagram stanja legura sa djelimičnom rastvorljivošću i eutektičkom tačkom

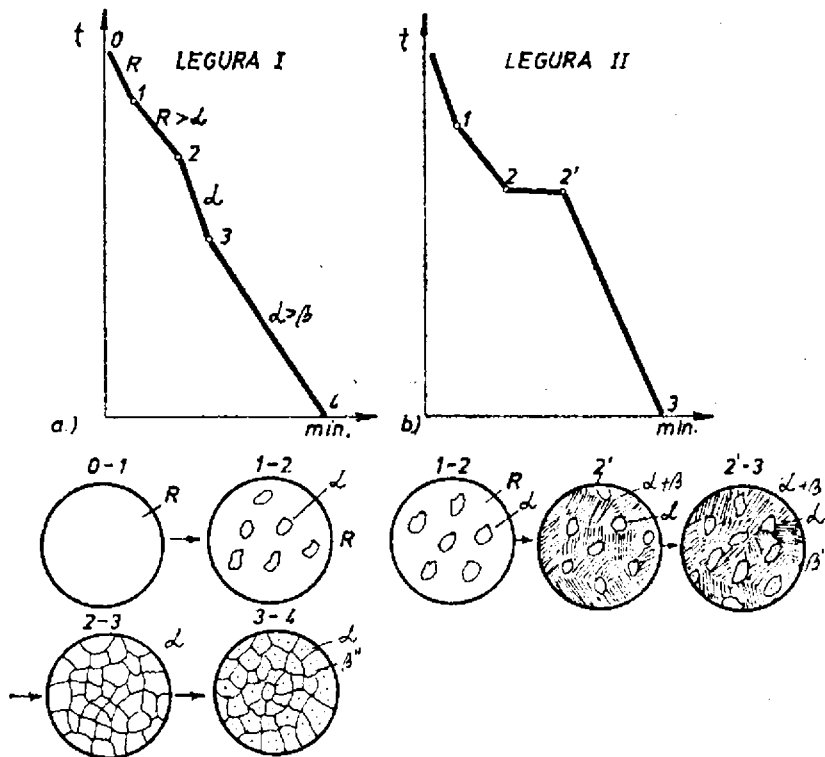
komponente B, koji su djelimično rastvorili komponentu A. Ovi kristali se zovu β mješoviti kristali. Maksimalna rastvorljivost komponente B u komponenti A ograničena je linijom D F, a maksimalna rastvorljivost komponente A u komponenti B linijom E G.

Legure koje se u čvrstom stanju nalaze između linije D F i E G su sastavljene od dvije faze, i to: eutektikuma $\alpha + \beta$ i čvrstih kristala α ili β .

Iz rastopa se izlučuju samo kristali α kod podeutektičkih legura i kristali β kod nadeutektičkih legura.

Kristali α su kristali komponente A koji su djelimično rastvorili komponentu B. Ovi kristali se zovu α mješoviti kristali. Kristali β su kristali komponente B, koji su djelimično rastvorili komponentu A.

Da bismo bolje upoznali proces kristalizacije, posmatraćemo tok hlađenja legure (I) i nacrtati njenu krivu hlađenja (slika 1.31). Hlađenjem do 1 na likvidus-liniji legura se nalazi u tečnoj fazi i dostizanjem temperature likvidus-linije počinju se izlučivati prvi kristali čiji sastav određujemo



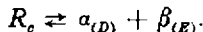
Slika 1.32. Krive hlađenja i sheme struktura

na solidus-liniji u tački (a). Prvi izlučeni kristali su α mješoviti kristali. Daljim hlađenjem povećava se rastvorljivost komponente B u komponenti A. Sastav rastvora određujemo na likvidus-liniji — tačka (b). Kada smo dostigli temperaturu solidus-linije, rastop (R) je pretvoren u čvrsto stanje, a miješane kristale.

Po završetku očvršćavanja u tački 2 daljim hlađenjem temperatura brže opada sve do tačke 3, kada počinje laganije da pada i dobijamo novu prevojnju tačku na krivoj hlađenja. U tački 3 dostiže se zasićenje komponente A komponentom B i počinje izlučivanje kristala β'' . Sastav β'' miješanih kristala mijenja se po liniji DF. Kristali β koji se izlučuju iz tečne faze zovu se primarni kristali. Međutim, kristali koji su dobijeni izlučivanjem iz čvrstog rastvora zovu se sekundarni kristali β'' . Razlike u sastavu ovih kristala nema. Ukoliko je linija EG vertikalna, tj. rastvorljivost komponente A u komponenti B ne zavisi od temperature, neće doći do izlučivanja sekundarnih miješanih kristala.

Ako posmatramo leguru II i pratimo njen tok kristalizacije, dobićemo krivu hlađenja iz koje vidimo tri karakteristične tačke: 1, 2' i 2. Hlađenjem do tačke 1 na likvidus-liniji počinje izlučivanje kristala α čiji sastav odre-

đujemo na solidus-liniji AD. Snižavanjem temperature sve je više izlučenih α miješanih kristala čiji se sastav mijenja po solidus-liniji, a sve je manje rastopa (R) čiji se sastav mijenja po likvidus-liniji. Kada se legura ohladi do temperature koja odgovara tački 2, tj. DCE linije eutektičkog preobražaja, dolazi do ravnotežnog stanja. U ravnoteži se nalaze tri faze: tečna faza, čiji sastav odgovara tački C (eutektikum), α miješani kristali, čiji sastav odgovara tački D, i β miješani kristali, čiji sastav odgovara tački E. Pri temperaturi koja odgovara liniji eutektičkog p.eobražaja — dolazi do tzv. eutektičke reakcije:

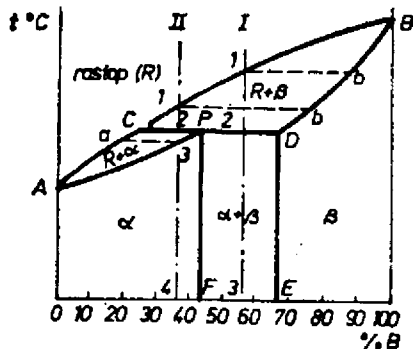


Ove tri faze imaju stalan sastav, određen tačkama D, C i E, zbog čega je i temperatura preobražaja konstantna.

Po završetku kristalizacije u tački 2' dobijamo α miješane kristale raspoređene u eutektikumumu $\alpha + \beta$.

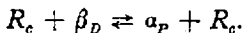
Pri daljem hlađenju, pošto rastvorljivost komponente B u komponenti A opada sa snižavanjem temperature linija FD, dolazi do izlučivanja sekundarnih kristala β'' . Hlađenjem do sobne temperature dobićemo mješavinu kristala α , eutektikuma $\alpha + \beta$ i sekundarnih kristala β'' .

Legura sa djelimičnom rastvorljivošću i peritektikumom pojavljuje se kod očvršćavanja legure Cd — Hg ili u kombinaciji sa ostalim tipovima legura kod Sb — Sn, mesinga i čelika. Opšti izgled ovog dijagrama stanja dat je na slici 1.33. Likvidus-linija ACB ograničava područje rastopa (R) od početka izdvajanja prvih kristala. Solidus-linija APDB predstavlja završetak kristalizacije. Ispod linije AC izlučuju se mješoviti kristali na isti način kao kod legura potpune rastvorljivosti. Pri temperaturama koje odgovaraju dijelu likvidus-linije CB počinje izdvajanje iz rastopa β mješovitih kristala (čvrsti rastvor komponente A u komponenti B). Ispod linije DB imamo čvrste β miješane kristale, a ispod linije AP čvrste α miješane kristale. Peritektički preobražaj nastaje pri temperaturi koja odgovara horizontalnoj liniji CPD, koja se zove linija peritektičkog preobražaja, iznad koje se nalazi mješavina tečne faze rastopa (R) i β miješanih kristala. Na dijelu linije CP dešava se



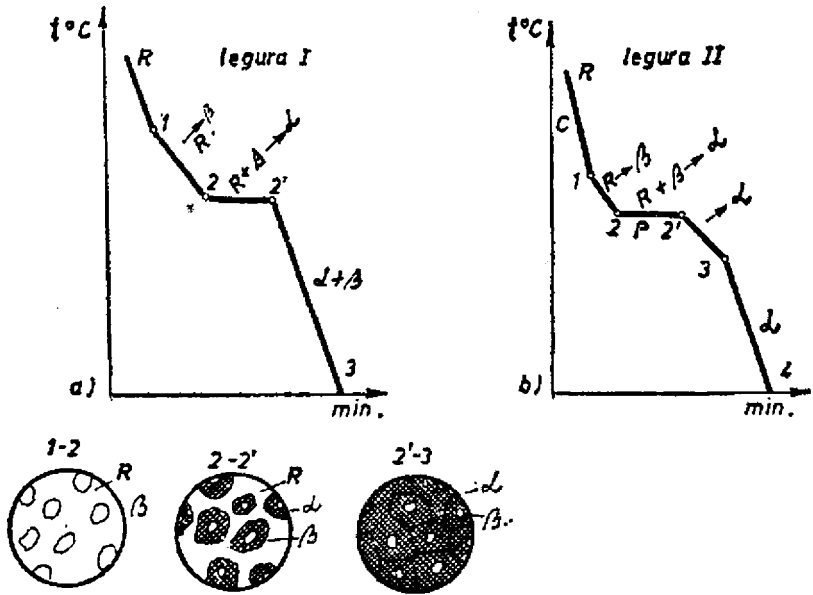
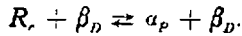
Slika 1.33. Dijagram stanja legura sa djelimičnom rastvorljivošću i peritektikumom

peritektički preobražaj na ovaj način: rastop (R) sastava koji odgovara tački C reaguje sa zasićenim β_D miješanim kristalima sastava koji odgovara tački D. Kao rezultat ove reakcije nastaju α_P miješani kristali, čiji sastav odgovara tački P. Proces se može izraziti:



Vidi se da dio rastvora R_c ostaje kao višak i da taj dio rastvora očvršćava daljim hlađenjem kao i svaka legura oblika čvrstog rastvora. Proces kristalizacije možemo pratiti na krivoj hlađenja I (slika 1.34).

Na dijelu linije PD obavlja se peritektička reakcija u kojoj se pojavljuju α miješani kristali, a prema reakciji:



Slika 1.34. Krive hlađenja i sheme struktura

Po završetku očvršćavanja ispod linije PD dobijamo čvrsto stanje, koje se sastoji od proste mješavine α i β kristala. Kristalna građa je takva da su kristali β izolovani jedan od drugog, a oko njih se nalaze α kristali.

Peritektički preobražaj obavlja se veoma sporo i pri stvarnim postupcima livenja ne teče do kraja. Zbog toga legure koje leže lijevo od tačke D treba žariti duže vrijeme kako bi se difuzijom zaostali kristali β preveli u α miješane kristale.

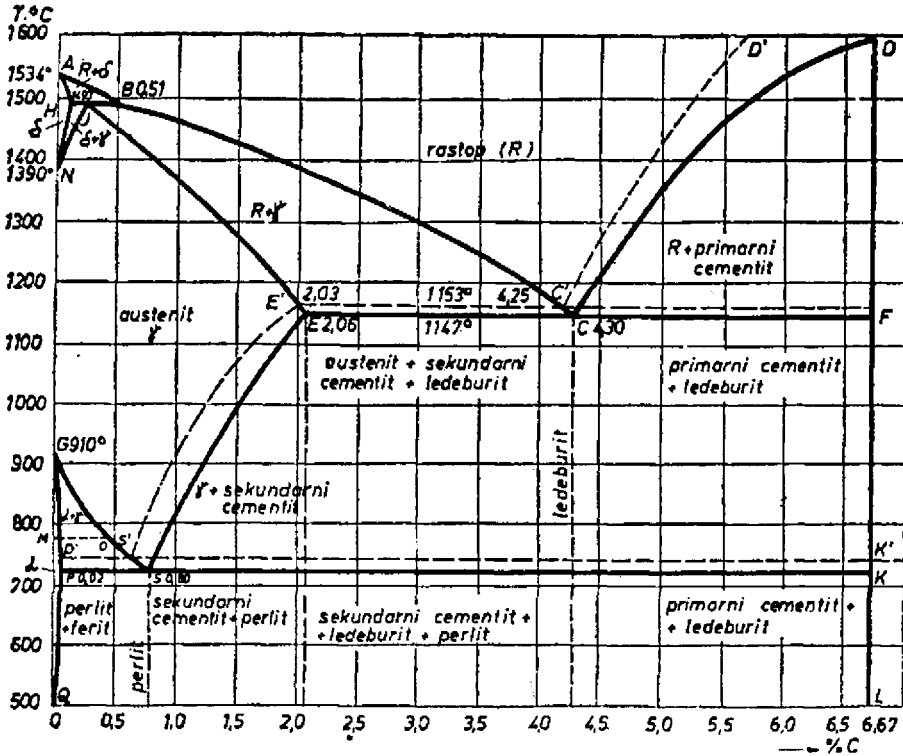
1.10. DIJAGRAM STANJA Fe — Fe₃C

Jedan od najvažnijih metala koji ima široku primjenu u tehnici je željezo. Čisto željezo nema neku naročitu primjenu zbog slabe kombinacije mehaničkih osobina. Najširu primjenu željezo je dobilo u legurama. Najvažnija legura je legura željeza i ugljenika. Već i male količine ugljenika mijenjaju znatno osobine željeza.

Ugljenik se može nalaziti u željezu u dva oblika: u obliku elementarnog ugljenika (grafita) i u obliku hemijskog jedinjenja Fe₃C (cementita, karbida željeza). Prema tome, u kakvom se obliku ugljenik pojavljuje prilikom hlađenja, razlikovaćemo dva dijagrama stanja. Najčešći oblik dijagrama je Fe — Fe₃C. Pri dugom žarenju legure teže termodinamičkoj ravnoteži, pa se legura

koja se odnosi na Fe — Fe₃C zove metastabilna, a dijagram stanja, metastabilni dijagram. Vrlo laganim hlađenjem, dugim žarenjem na povišenim temperaturama uz prisustvo silicijuma dolazi do izdvajanja ugljenika iz hemijskog jedinjenja Fe₃C i nastaje legura Fe-C, a dijagram stanja koji se dobije u ovom sistemu naziva se stabilni dijagram.

Na slici 1.35. dat je dijagram stanja željezo — ugljenik. Pune izvučene linije odnose se na metastabilni dijagram Fe — Fe₃C, a isprekidane linije na stabilni dijagram Fe — C. Ovaj dijagram ne obuhvata sve legure od 0 do 100% C, nego samo dio od 0 do 6,67% C, zbog toga što legure sa većim sadržajem ugljenika nemaju praktične primjene.



Slika 1.35. Dijagram stanja željezo-ugljenik

Lijeva granica dijagrama predstavlja čisto željezo, a desna granica čisto hemijsko jedinjenje ugljenika i željeza Fe₃C, koje se zove cementit. Cementit kristališe po veoma složenoj kristalnoj rešetki. On je veoma tvrd ($HV = 800 \frac{kN}{cm^2}$), ali takođe i krt, a na sobnoj temperaturi je magnetičan. Magnetne osobine potpuno gubi na temperaturi 210°C. Temperatura topljenja cementita nije tačno određena zbog toga što se cementit na visokim temperaturama razlaže na sastavne dijelove (Fe i C) i kreće se u intervalu od 1550° do 1840°C. Na dijagramu je usvojena temperatura topljenja cementita 1600°C.

Sa slike 1.35. vidi se da je ovaj dijagram jako složen i ima dosta linija koje razgraničavaju različita područja. Složenost dijagrama potiče od alotropskih modifikacija željeza, koje imaju različitu sposobnost rastvaranja ugljenika, što zavisi od temperature. Željezo i ugljenik grade tri različita čvrsta rastvora, čije nazive, maksimalnu rastvorljivost i temperaturu možemo vidjeti u tabeli 1.6. δ i α čvrsti rastvor ima prostorno centriranu kubnu rešetku, koja ima veoma malu mogućnost rastvaranja ugljenika. Ugljenik se nalazi u prazninama rešetke između atoma željeza. γ čvrsti rastvor ima površinski centriranu kubnu rešetku koja ima slobodan prostor na presjeku prostornih dijagonala, gdje se smještaju atomi ugljenika, zbog čega je maksimalna rastvorljivost u ovoj rešetki jako velika (2,06% C). Snižavanjem temperature rastvorljivost ugljenika opada; međutim, brzim hlađenjem (kaljenje) mogu se djelimično zadržati atomi ugljenika u rastvoru i na sobnim temperaturama, o čemu će biti govora u termičkoj obradi.

Tabela 1.6

Čvrsti rastvori

Oznaka	Temperatura i max. sadržaj C %	Metalografska oznaka
δ — čvrsti rastvor	1493°C; 0,10% C	ferit
γ — čvrsti rastvor	1147°C; 2,06% C	austenit
α — čvrsti rastvor	723°C; 0,02% C	ferit

Osim čvrstih rastvora u leguri željezo — ugljenik pojavljuju se dvije vrste kristala (faza) koje imaju složenu heterogenu prirodu. Oznaka sastava i oblast postojanosti dati su u tabeli 1.7.

Tabela 1.7

Homogeni kristali

Oznaka	Sastav	Oblast postojanosti
Perlit	86,5% ferita + 13,5% Fe_3C	723°C 0,02 — 6,67% C
Ledeburit	48% austenita + 52% Fe_3C	1147°C 2,06 — 6,67% C

Perlit je eutektična smjesa ferita i cementita i nastaje razlaganjem austenita sa sadržajem 0,8% C na temperaturi od 723°C.

Ledeburit je eutektička smjesa austenita i cementita i nastaje očvršćavanjem legure željeza i ugljenika sa sadržajem 4,3% C na temperaturi od 1147°C.

Osim čvrstih rastvora, heterogenih smjesa pojavljuje se i hemijsko jedinjenje Fe_3C (cementit), koje se pojavljuje u tri različita oblika istog sastava, tabela 1.8.

Oznaka	Nastaje putem
Primarni cementit	Primarne kristalizacije iz rastopa na liniji CD
Sekundarni cementit	Izdvajanjem iz austenita (linija ES)
Tercijarni cementit	Izdvajanjem iz ferita (linija PQ)

Primarni cementit se pojavljuje kod legura sa sadržajem ugljenika od 4,3 do 6,67% i izlučuje se direktno iz rastopa duž linije CD — do temperature 1147°C. On se izlučuje iz rastopa u obliku dugih iglica.

Sekundarni cementit se izlučuje iz čvrstih kristala austenita duž linije ES. Rastvorljivost ugljenika u γ čvrstom rastvoru opada sa temperaturom sve do 723°C, kada se preostali austenit sa sadržajem 0,8% preobražava u perlit.

Tercijalni cementit se izlučuje iz čvrstih kristala ferita duž linije PQ. Rastvorljivost ugljenika u feritu sa 0,02 pri temperaturi od 723°C uz izdvajanje tercijalnog cementita, pada na oko 10⁻⁶% C pri sobnoj temperaturi, tačka Q.

Osnovne linije likvidus i solidus u dijagramu stanja željezo — ugljenik su višestruko izlomljene. Likvidus-linija ABCD razgraničava rastop od početka izdvajanja prvih kristala. Na dijelu likvidus-linije AB izdvajaju se kristali δ -ferita, a na dijelu likvidus-linije BC kristali austenita, dok se na dijelu likvidus-linije CD izdvajaju kristali primarnog cementita.

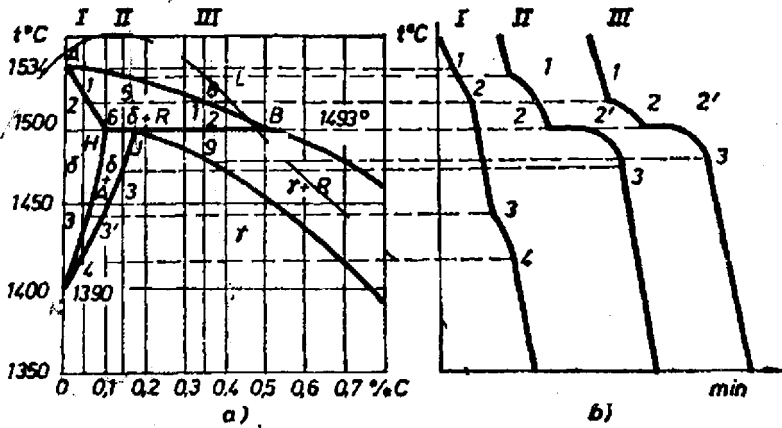
Solidus-linija AHJECF predstavlja završetak kristalizacije i ispod nje sve legure su u čvrstom stanju. Između solidus i likvidus-linije imamo mješavinu dviju faza: tečnog rastopa i čvrstih kristala.

Iz dijagrama stanja za željezo-ugljenik može se vidjeti da se prilikom hlađenja odigravaju tri izotermske transformacije: peritektička, eutektička i eutektoidna.

Za objašnjenje peritektičke reakcije i kristalnih struktura koje se dobijaju pri hlađenju legura sa malim sadržajem ugljenika poslužit ćemo se uveličanim dijelom dijagrama (slika 1.36.). Pri kristalizaciji legura sa manje od 0,1% C kriva hlađenja I prikazuje zastoje tačke, pri kojima dolazi do preobražaja. U tački 1. na likvidus-liniji AB izdvajaju se prvi kristali δ -ferita. U tački 2 završava se kristalizacija i dalje se vrši ravnomjerno hlađenje do tačke 3, kada počinje razlaganje δ -ferita u austenit (γ mješovite kristale). Sastav izlučenih kristala γ određujemo po liniji NJ i u tački 4 potpuno je završen preobražaj δ kristala u γ kristale. Kristalizacija legura sa sadržajem ugljenika (0,1 < C < 0,16%) prikazan je krivom hlađenja II. Tečni rastop ohlađen do tačke 1 na likvidus-liniji izlučuje kristale δ -ferita. Ovaj proces traje do tačke 2, kada nastupa peritektička reakcija na temperaturi od 1493°C između ferita sa sadržajem od 0,1% C (tačka H) i tečnog rastopa R_B koji ima sadržaj ugljenika 0,51% (tačka B) — prema jednačini za peritektičku reakciju:

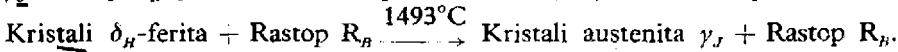
Kristali δ_H — ferita + preostali rastop R_B $\xrightarrow{1493^\circ\text{C}}$ kristali δ_H + kristali γ_J .

Po završetku peritektičke reakcije temperatura opada uz raspadanje kristala δ_H do tačke 3, kada dobijamo potpuno čiste kristale austenita.



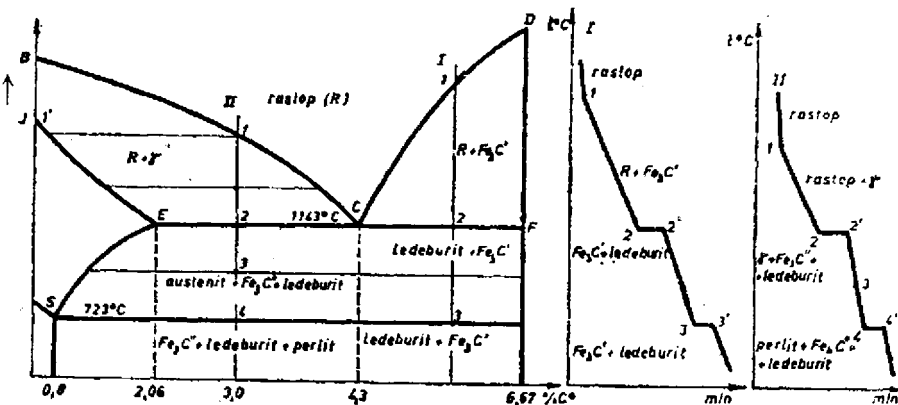
Slika 1.36. Lijevi dio dijagrama Fe/C sa peritektičkom tačkom

Proces kristalizacije legura sa sadržajem ugljenika $0,16\% < C < 0,51\%$ prikazan je krivom hlađenja III. Hlađenjem rastopa do tačke 1 na likvidus-liniji AB izdvajaju se prvi kristali δ -ferita. Izlučivanje ide sve do temperature od 1493°C , kada nastupa peritektička reakcija. Ova reakcija nastupa između kristala δ_H -ferita i rastopa R_B , a kao rezultat te reakcije dobijaju se kristali γ_L i rastop R_B . Jednačina za ovu peritektičku reakciju se može napisati ovako:



Po završetku peritektičke reakcije nastupa dalje hlađenje uz istovremeno izlučivanje γ kristala i u tački 3. završava se proces kristalizacije. Rezultat cijelog postupka je čvrsti rastvor ugljenika u γ željezu koji se zove austenit.

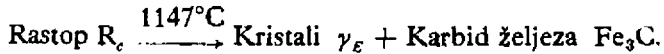
Za objašnjenje eutektičke reakcije i struktura dobijenih hlađenjem legura sa sadržajem ugljenika od 2,06 do 6,67% C korist ćemo se dijelom dijagrama i krivama hlađenja (slika 1.37).



Slika 1.37. Dijagram stanja Fe-Fe₃C za liveno gvožđe i krive hlađenja

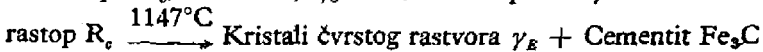
Legure željeza sa više od 2,06% C zovu se liveno gvožđe. Linija ECF zove se linija eutektičkog preobražaja, a tačka C eutektička tačka. Legura koja odgovara toj tački (4,3% C i 1147° C) zove se eutektička legura ili ledeburit. Liveno gvožđe sa sadržajem od 2,06 do 4,3% C zove se podeutektičko liveno gvožđe, a sa sadržajem od 4,3 do 6,67% C nadeutektičko liveno gvožđe.

Krivu hlađenja i preobražaj koji se javljaju kod nadeutektičkog livenog gvožđa posmatračemo za liveno gvožđe sa 5,5% C, kriva hlađenja I. Rastop ohlađen do temperature koja odgovara tački 1 na likvidus-liniji CD počinje izlučivati kristale primarnog cementita. Sastav rastopa postaje siromašniji ugljenikom i mijenja se po liniji CD sve do tačke 2, kada rastop R_c ima sastav eutektičke tačke. Dalji preobražaj teče prema jednačini za eutektičku reakciju:



Po završetku eutektičke reakcije hlađenje traje sve do tačke 3, kada se pojavljuje zastoj na krivoj hlađenja. Dostizanjem temperature od 723° C, austenit koji se nalazi u sastavu ledeburita (48%) vrši preobražaj u perlit, poslije čega imamo lagano hlađenje do sobnih temperatura.

Krivu hlađenja i preobražaja kod podeutektičkog livenog gvožđa posmatramo kod legure II sa sadržajem ugljenika 3,0%. Hlađenjem ove legure do temperature likvidus-linije BC izlučuju se prvi kristali γ čvrstog rastvora (1') čiji sastav određujemo na dijelu solidus-linije JE. Snižavanjem temperature količina rastopa sve je manja, a količina izlučenih kristala veća. U tački 2 na temperaturi od 1147° C dolazi do eutektičke reakcije, pri čemu ostatak rastopa R_c , sastava 4,3% C očvršćava prema jednačini:



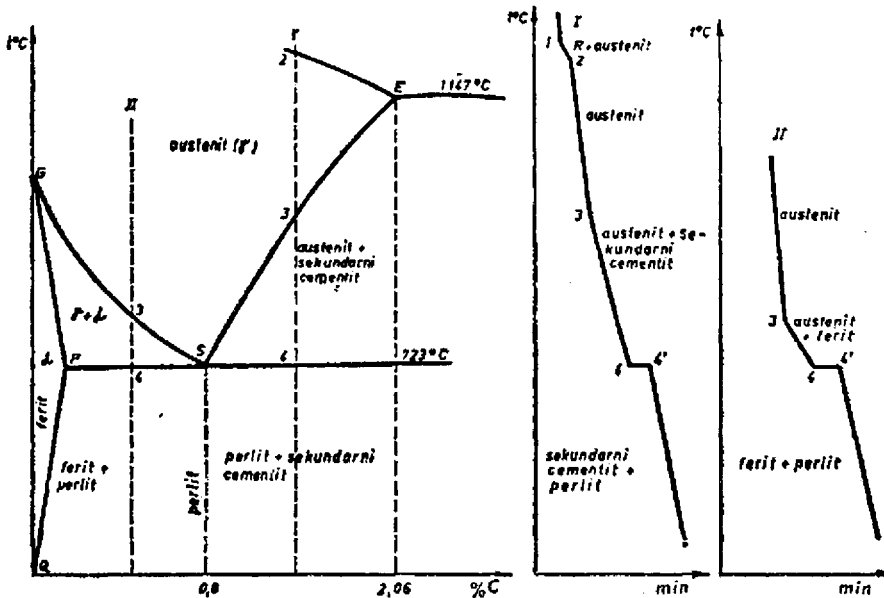
Pri daljem hlađenju ispod linije eutektičkog preobražaja EC dolazi do raspadanja austenita, jer snižavanjem temperature opada rastvorljivost ugljenika u austenitu po liniji ES. Duž linije ES dolazi do izlučivanja sekundarnog cementita sve do temperature od 723° C, kada austenit dostiže koncentraciju od 0,8% C i dolazi do zastoja tako da se preostali austenit pretvara u perlit. Po završetku potpune pretvorbe dolazi do ravnomyernog hlađenja, pa se ispod temperature od 723° C nalazi sekundarni cementit, perlit i ledeburit.

Eutektoidna transformacija dešava se kod čelika na temperaturi od 723° C. Da bismo objasnili eutektoidnu reakciju, a i preobražaje koji se dešavaju promjenom temperature za legure sa sadržajem ugljenika do 2,06%, koristićemo se lijevom stranom dijagrama.

Legure željeza koje sadrže do 2,06% C nazivaju se čelici. Čelik sa sadržajem od 0,8% ugljenika je eutektoidni čelik, a sa sadržajem ugljenika manjim od 0,8% podeutektoidni čelik, dok je čelik sa sadržajem ugljenika većim od 0,8% nadeutektoidni.

Preobražaje koji se dešavaju kod nadeutektoidnog čelika i strukture dobijene laganim hlađenjem pratićemo na krivoj hlađenja I. (slika 1.38). Rastop ohlađen do temperature koja odgovara likvidus-liniji počinje izlučivati kristale čvrstog rastvora γ (austenit), čiji sastav određujemo na solidus-liniji JE. Snižavanjem temperature do tačke 2 na solidus-liniji završava se kristalizacija i cjelokupni rastop je pretvoren u čvrsti rastvor ugljenika u γ željezu koji se zove austenit. Hlađenjem na dijelu krive od 2 do 3 nema ni-

kakvih promjena. U tački 3 pojavljuje se prevoj zbog toga što se na toj temperaturi dostiže maksimalna rastvorljivost ugljenika u željezu i počinje njegovo izlučivanje u obliku sekundarnog cementita. Izlučivanjem cementita sadržaj ugljenika u austenitu se smanjuje i mijenja po liniji ES. Hlađenjem na



Slika 1.38. Dijagram stanja Fe-Fe₃C za čelik i krive hlađenja

temperaturi od 723°C (tačka 4) na krivoj hlađenja pojavljuje se zastoje, tj. dešava se eutektoidni preobražaj. Preostali austenit γ_s sastava 0,8% C pretvara se u perlit — prema jednačini eutektoidnog preobražaja.

Kristali čvrstog rastvora $\gamma_s \xrightarrow{723^\circ\text{C}}$ Perlit (kristali ferita + kristali Fe₃C).

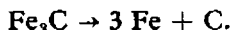
Po završetku hlađenja ispod temperature od 723°C čvrsto stanje čelika sadrži mješavinu kristala perlita i sekundarnog cementita.

Preobražaje koji se dešavaju kod podeutektoidnog čelika i strukture koje se dobiju laganim hlađenjem pratićemo na krivoj hlađenja II. Podeutektoidni čelik ohlađen do tačke 1 na likvidus-liniji počinje izlučivati kristale austenita, čiji sastav određujemo na solidus-liniji JE. U tački 2. završena je kristalizacija i dobijamo čvrsti rastvor austenit, koji se ne mijenja sve do temperature koja odgovara tački 3. U tački 3 počinje izlučivanje kristala ferita, a u ostatku austenita povećava se procenat ugljenika. Podeutektoidni čelik, ohlađen na temperaturu od 723°C, sastoji se od kristala ferita sastava koji odgovara tački P (0,02% C) i austenita (γ_s) sastava koji odgovara tački S (0,8% C). Na temperaturi od 723°C dolazi do eutektoidne reakcije koja teče prema jednačini:

austenit $\gamma_s \xrightarrow{723^\circ\text{C}}$ Perlit (kristali ferita + kristali Fe₃C).

Po završetku eutektoidne reakcije dobijamo strukturu čelika koja se sastoji od perlita i ferita. Hlađenjem podeutektoidnih čelika, s obzirom da rastvorljivost ugljenika u α željezu opada po liniji PQ, doći će do izdvajanja tercijarnog cementita.

Veoma laganim hlađenjem, uz prisustvo silicijuma, u leguri dolazi do izlučivanja ugljenika u obliku grafita iz cementita — prema jednačini:



Preobražaji koji se dešavaju u leguri Fe — C dati su u dijagramu isprekidanim linijama. Po ovom dijagramu se izučavaju strukture sivog livenog gvožđa.

Za termičku obradu su veoma značajne kritične tačke preobražaja. Kod analize krive hlađenja za čisto željezo date su kritične tačke preobražaja. Kritične tačke koje odgovaraju ravnotežnom stanju, tj. pri laganom hlađenju u leguri Fe — Fe_3C date su u tabeli 1.9.

Tabela 1.9

Kritične tačke preobražaja

Kritična tačka	Temperatura u °C	Karakter promjene
A ₀	210	Promjena magnetnih osobina cementita
A ₁	723	Perlitni (eutektoidni) preobražaj linija PS
A ₂	768	Promjena magnetnih osobina pri zagrijavanju i hlađenju
A ₃	723 — 910	Početak izlučivanja ferita iz austenita prilikom hlađenja, kraj rastvaranja ferita pri zagrijavanju, linija GS
A ₄	1493°	Prelaz δ željeza u γ željezo pri hlađenju ili γ željeza u δ željezo pri zagrijavanju
A _{cm}	723 — 1147	Početak izlučivanja sekundarnog cementita iz austenita pri hlađenju ili završetku pretvorbe sekundarnog cementita u austenit pri zagrijavanju, linija SE

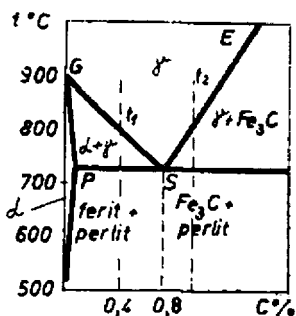
Ako se uz ove tačke dodaje indeks r, tada se tačke preobražaja odnose na hlađenja, npr., A_{r0}, A_{r1}, A_{r2} itd., a ako dodajemo indeks C, tačke preobražaja se odnose na zagrijavanje — npr., A_{c0}, A_{c1}, A_{c2} itd.

1.11. STRUKTURE DOBIJENE UBRZANIM HLAĐENJEM

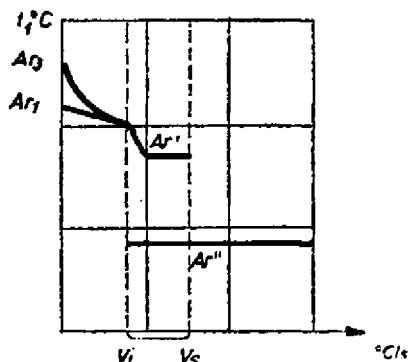
U opisanom dijagramu stanja Fe — Fe_3C date su strukture koje su dobijene laganim hlađenjem. Kod laganog hlađenja ima dosta vremena da se izvrše strukturne promjene i da se dobiju opisane stabilne strukture. Sa povećanjem brzine hlađenja dolazi do snižavanja temperature eutektoidne reakcije, tj. dolazi do pothlađivanja legura.

Promjene koje nastaju pri ubrzanom hlađenju pratićemo na podeutektoidnom čeliku sa 0,4% C. Pri laganom hlađenju dobijaju se strukture prikazane na dijelu dijagrama Fe — Fe₃C (slika 1.39). Ohlađen, ovaj čelik na sobnoj temperaturi ima feritno — perlitnu strukturu, pri čemu obje strukture zauzimaju gotovo jednake površine. Pri povećanju brzine hlađenja, površina koju zauzima perlit se povećava, a površina ferita se smanjuje. Izlučeni ferit se nalazi u obliku tanke mrežice. Što je veća brzina hlađenja, sve je manje ferita, a sve više perlita. Sa povećanjem brzine hlađenja snižavaju se temperature preobražaja Ar₁ i Ar₃. Pri tome tačka Ar₃ se brže smanjuje nego Ar₁, tako da interval Ar₃ — Ar₁ teži ka nuli i pri brzini hlađenja V₁ ove tačke preobražaja se poklapaju (slika 1.40). Na taj način dobijamo jedinstvenu tačku preobražaja. Pri toj brzini hlađenja, nema izdvajanja ferita, struktura je perlitna Ar'. Sa daljim povećanjem brzine pojavljuje se druga tačka preobražaja Ar'', koja nam ukazuje na obrazovanje nove strukture, koja se zove martenzit. Pojava izlučivanja martenzita javlja se pri kritičnoj brzini hlađenja V_k. Pri brzini hlađenja koja odgovara kritičnoj brzini V_s i većoj prestaje izlučivanje kristala perlita i dobijamo čestu martenzitnu strukturu.

Još davno je bilo poznato da se čelik može ojačati kada se zagrije do područja austenita, a zatim brzo ohladi, na primjer, u vodi (kaljenje). Struktura ovako dobijenog čelika je igličasta i zove se martenzit. Ispitivanjem je utvrđeno da, pored igličaste martenzitne strukture, najčešće postoji još izvjesna količina zaostalog austenita.



Slika 1.39. Strukture nastale pri laganom hlađenju



Slika 1.40. Hlađenjem na vazduhu dobija se čisti perlit

Pri smanjenju brzine hlađenja tvrdoća čelika se smanjuje. Izborom sredstava za hlađenje, koja imaju različitu moć odvođenja toplote, možemo dobiti nove strukture čelika.

Hlađenjem na vazduhu može se dobiti čisti perlit. Brzina hlađenja je takva da je spriječeno izdvajanje ferita (slika 1.40). Struktura se sastoji od perlita u kome se lamele ferita i cementita lako razlikuju već pri manjem uvećanju. Perlit ima dobru žilavost i plastičnost, ali malu tvrdoću.

Hlađenjem zagrijanog čelika, na primjer, u struji vazduha, dobija se struktura sorbit. On ima dobru kombinaciju mehaničkih osobina, dobru žilavost, veliko izduženje, dobre dinamičke osobine i sposobnost plastičnih deformacija.

Sa povećanjem brzine hlađenja, (hlađenjem u ulju) dobije se struktura u obliku sivomrke mase koja se zove trustit. Žilavost i plastičnost trustita u odnosu na sorbit je manja, ali je čvrstoća i tvrdoća veća.

Strukture perlit, sorbit i trustit imaju lamelarnu građu, ali sa različitim debljinom lamela, zbog toga su to različiti oblici perlita. Nazivi sorbit i trustit još uvijek se upotrebljavaju pretežno u starijoj literaturi.

Povećanim brzinama hlađenja često se pored perlita pojavljuje sasvim nova struktura koja se naziva bainit. Struktura bainit se sastoji od disperznog cementita u masi ferita.

Prema brzini hlađenja dobijamo nekoliko novih struktura koje se znatno razlikuju po mehaničkim osobinama. Strukture svrstane prema tvrdoći, idući od veće ka manjoj, izgledaju ovako: martenzit, bainit, trustit, sorbit i perlit.

1.12. DIJAGRAM STANJA LEGURA SASTAVLJENIH OD VIŠE ELEMENATA

Najveću primjenu u tehnici imaju legure sastavljene od više komponenta. Dvojne legure nisu uvijek u stanju dati pogodne kombinacije mehaničkih osobina, pa se legiranje vrši sa tri, četiri ili više komponenta. Međusobni uticaj nekoliko komponenta na svojstva legure znatno se razlikuje od uticaja svake komponente zasebno. Za analizu preobražaja višekomponentnih legura služimo se trojnim, četvornim ili složenijim dijagramima stanja. Što je broj komponenta veći, sve je teže dati grafički prikaz procesa preobražaja, a samo ispitivanje postaje složenije. Dvojne legure bilo je lako ispitivati, pošto dijagrame stanja možemo predstaviti u ravni. Za predstavljanje trojnih legura ili legura sastavljenih od više komponenta potreban nam je prostorni dijagram stanja.

Do sada je izučen i nacrtan veliki broj dijagrama stanja legura sastavljenih od tri komponente, ali imamo jako malo dijagrama stanja sa četiri ili više komponenta.

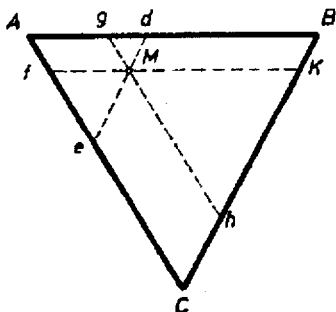
Dijagrami stanja sastavljeni od tri komponente su prostorni dijagrami. Njihova osnova — jednakostranični trougao, služi za određivanje koncentracije komponenta.

Na vertikalnim linijama nanese su kritične temperature preobražaja.

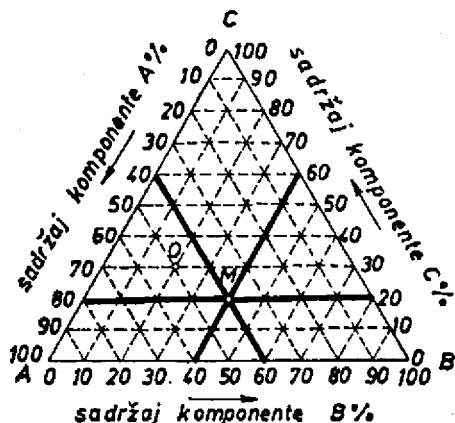
Vrhovi trougla odgovaraju čistim komponentama A, B i C, a njegove stranice dvojnim legurama. Tako stranica AB predstavlja dvojnju leguru sastavljenu od komponenta A i B; stranica AC dvojnju leguru sastavljenu od komponenta A i C i stranica BC dvojnju leguru sastavljenu od komponenta B i C. Stranice trougla su podijeljene na 100 jednakih podjela. Svaka tačka unutar trougla predstavlja trojnu leguru sastavljenu od komponenta A, B i C.

Određivanje sastava trojne legure pokazaćemo za proizvoljnu tačku M unutar trougla ABC (slika 1.41). Ako kroz tačku M povučemo prave paralelno sa stranicama AB, BC i AC, tada ćemo dobiti presječne tačke na stranicama trougla u kojima možemo pročitati sadržaj pojedinih komponenta.

Tako linija ed , povučena paralelno sa stranicom BC kroz tačku M , predstavlja konstantan sadržaj komponente A (jer na stranici BC nema komponente A). U tačkama e ili d možemo pročitati sadržaj komponente A . Linija gh predstavlja konstantan sadržaj komponente B i u tačkama h ili g možemo odrediti njen procentualni udio u trojnoj leguri. Linija fk predstavlja konstantan sadržaj komponente C i u tačkama f ili k određujemo sadržaj komponente C .



Slika 1.41. Određivanje sastava trojne legure



Slika 1.42. Ravnostrani trougao za određivanje sastava trojnih legura

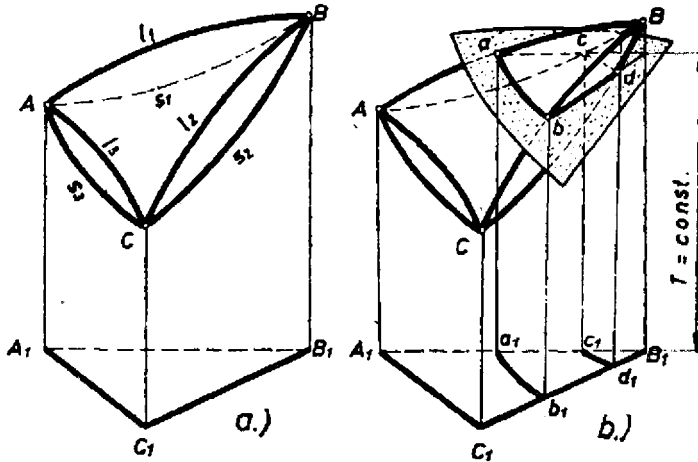
Na slici 1.42 nacrtana je mreža za određivanje procentualnog sastava za bilo koju tačku trojne legure unutar trougla. Tako, na primjer, za tačku M , povlačenjem paralelnih linija sa stranicama AB , BC i CB , dobijamo sadržaje komponentata C , A i B , tj. 20% C , 40% A i 40% B .

Na sličan način možemo odrediti sadržaj komponentata za bilo koju tačku. Suma odrezaka koji karakterišu sadržaj komponentata u leguri, dobijenih na stranicama AB , BC i CB uvijek je jednaka stranici trougla AB , BC i CB . Pošto u svakoj leguri, pa i u trojnoj, suma komponentata mora biti 100%, to je i zbir $A\% + B\% + C\% = 100$, a stranica trougla je takođe podijeljena na 100 jednakih dijelova, tako da jedna podjela predstavlja 1%.

Dijagrami stanja trojnih legura se dobijaju na osnovu dugih ispitivanja u laboratorijama. Za razne procentualne odnose komponentata dobijaju se krive hlađenja na kojima se vide tačke preobražaja i podaci unose u prostorni dijagram.

Razmotrićemo dijagram stanja trojne legure kod koje se komponente međusobno rastvaraju u neograničenom odnosu (slika 1.43), i grade čvrste rastvore. Na dijagramu stanja ispupčena površina Al_1 , Bl_2 , Cl_3 naziva se likvidus-površina i iznad nje sve trojne legure se nalaze u tečnom rastvoru. Udubljena površina As_1 , Bs_2 , Cs_3 naziva se solidus-površina i sve legure ispod ove površine su u čvrstom stanju. Između likvidus i solidus-površine imamo mješavinu rastopa i čvrstih kristala (kašasta masa).

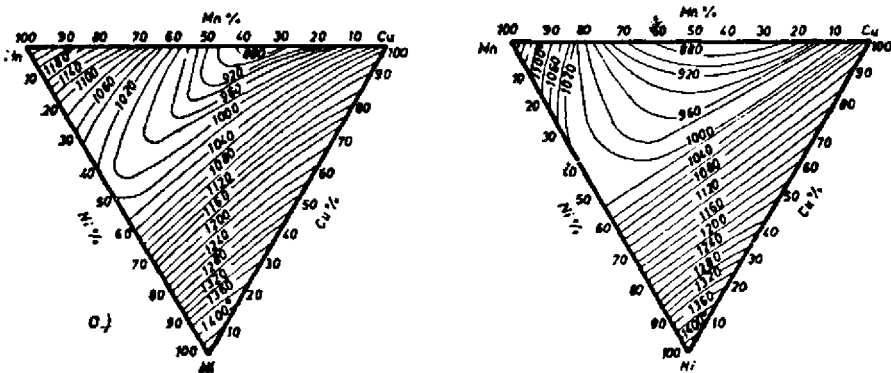
Veoma je teško koristiti se ovakvim dijagramima. Mnogo bolje i lakše je koristiti se dijagramima u ravni koji se crtaju posebno za likvidus, a posebno za solidus-liniju. Ako sa nekom ravni P, paralelnom sa osnovom, tj.



Slika 1.43. Dijagram stanja trojnih legura sa neograničenom rastvorljivošću

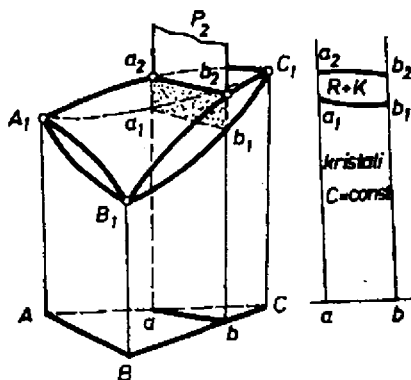
izotermalnom ravni presiječemo likvidus i solidus-liniju, dobićemo presječne linije ab za likvidus, a cd za solidus-liniju. Linija ab je početak očvršćavanja svih legura pri temperaturi $T = \text{const}$, a linija cd je završetak kristalizacije, ali legura drugog sastava. Ako linije ab i cd projektujemo u ravan trougla, dobićemo izoterme likvidus-linije a_1b_1 i izoterme solidus-linije c_1d_2 . Ako na sličan način izvršimo presijecanje likvidus i solidus-površine, dobićemo mrežu izotermi likvidus i solidus-površine, pomoću kojih možemo za svaki procentualni sastav trojne legure, odrediti početak i završetak topljenja pri zagrijavanju odnosno, početak i završetak kristalizacije pri hlađenju.

Na slici 1.44 data je mreža izotermi likvidus i solidus-površine za trojnu leguru mangan, bakar i niki.



Slika 1.44. Mreža izotermi likvidus i solidus površine za trojnu leguru Mn-Cu-Ni: a — izoterme likvidus površine, b — izoterme solidus površine

Osim sječenja likvidus i solidus-površine sa izotermalnim ravnima moguće je i sječenje ovih površina vertikalnim ravnima P_2 (slika 1.45). Obično se biraju ravni koje su paralelne sa jednom stranicom trougla, npr., P_2 je paralelna sa stranicom AB da bi procenat komponente C bio konstantan. Ove ravni sijeku solidus-površinu po solidus-liniji a_1b_1 , a likvidus-površinu po likvidus-liniji a_2b_2 . Naročito ove ravni su pogodne kod legura čije komponente imaju alotropske modifikacije. Bez ovakvih dijagrama ispitivanje trojnih legura je veoma teško, a ponekada i nemoguće.



Slika 1.45. Sječenje likvidus i solidus-površine vertikalnim ravnima