



**UNIVERZITET U ZENICI**  
**Mašinski fakultet**



**TRANSFORMACIJA AUSTENITA**

Seminarski rad iz predmeta  
Termička obrada i površinske prevlake

Student:  
Telalović Fuad

Mentor:  
doc.dr. Nađija Haračić

Zenica, Septembar 2005.

## SADRŽAJ:

1. Uvod .....	1
2. Dijagram stanja Fe-Fe <sub>3</sub> C .....	1
2.1. Značaj tačaka i linija dijagrama Fe-Fe <sub>3</sub> C .....	1
3. nastajanje austenita.....	2
4. Transformacija austenita .....	8
4.1. Perlitna transformacija .....	13
4.2. Beinitna transformacija .....	15
4.3. Martenzitna transformacija .....	16
5. Osnove TTT dijagrama .....	19
5.1. TTT dijagram izotermalnog tipa .....	19
5.2. Snimanje i konstrukcija izotermalnog dijagrama .....	19
5.3. Snimanje i konstrukcija kontinuiranih TTT dijagrama .....	20
6. Promjene veličine austenitnog zrna.....	21
7. Uređaj za praćenje promjene veličine zrna .....	26
8. Literatura.....	27

**Ključne riječi:** Austenit, fazna transformacija, visokotemperaturna mikroskopija.

## 1. UVOD

Željezo ima nekoliko alotropskih modifikacija i to  $\alpha$ Fe sa jako izraženim magnetnim osobinama koje gubi na  $769\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Iznad ove temperature željezo je nemagnetično i označava se sa  $\beta$ Fe. Na temperaturi  $911\text{ }^{\circ}\text{C}$  dolazi do prvog alotropskog preobražaja i željezo se označava kao  $\gamma$ Fe. Na temperaturi  $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$  dolazi do drugog alotropskog preobražaja i željezo se označava kao  $\delta$ Fe koje je nemagnetno kao i  $\gamma$ Fe.

Temperature alotropskog i magnetnog preobražaja nazivaju se kritičnim tačkama i označavaju se velikim slovom A sa odgovarajućim indeksima, 2(na  $769\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 3(na  $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), i 4(na  $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Da bi se razlikovali preobražaji koji se odvijaju kod željeza i legura željezo-ugljik prilikom zagrijavanja dodaje se još jedan indeks: pri zagrijavanju "c", a pri hlađenju "r" (npr.  $A_{C2}$  na  $769\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $A_{r2}$  pri hlađenju).

**AUSTENIT** -  $\gamma$  je intersticijski čvrsti rastvor ugljika u  $\gamma$  željezu sa površinski centriranom kubnom rešetkom.

**FERIT** -  $\alpha$  je intersticijski čvrsti rastvor ugljika u  $\alpha$  željezu sa prostorno centriranom kubnom rešetkom.

## 2. DIJAGRAM STANJA Fe-Fe<sub>3</sub>C

Dijagram stanja željezo-ugljik (slika 1) obuhvata legure koje sadrže ugljik od 0% do 6,67% (čelik i gvožđe). Pri sadržaju od 6,67% C obrazuje se hemijsko jedinjenje Fe<sub>3</sub>C (cementit). Dio dijagrama predstavljen punim linijama (do 6,67% C) naziva se *metastabilnim* dijagramom željezo-ugljik. Dijagram predstavljen isprekidanim linijama naziva se *stabilnim* dijagramom željezo-ugljik. Legure željeza sa ugljikom do približno 2,0% nazivaju se čelicima, a preko 2,0% C gvožđe.

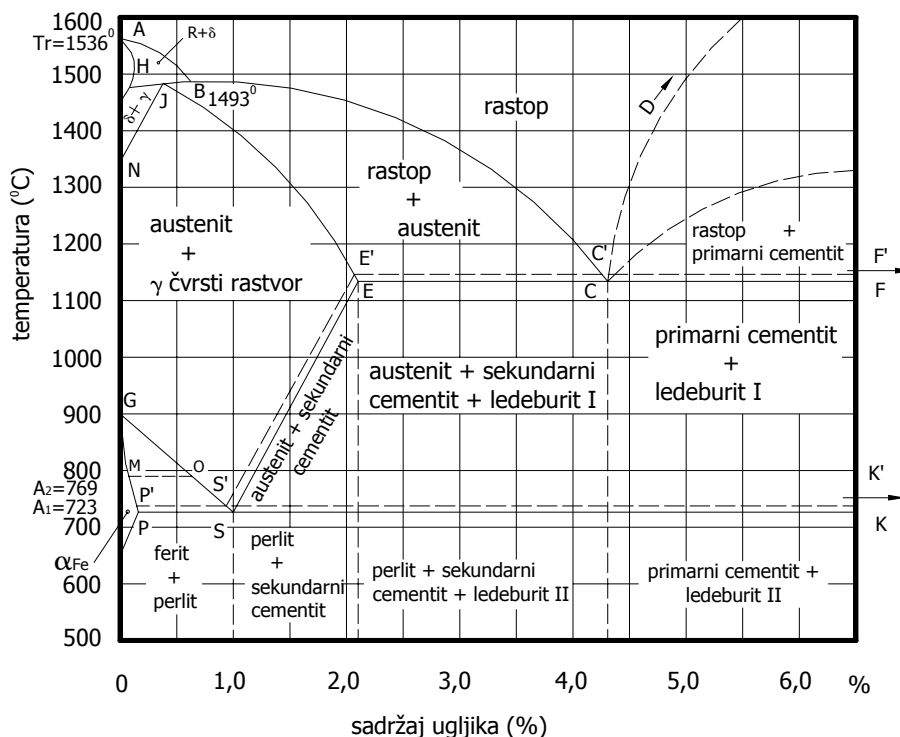
### 2.1. Značaj tačaka i linija dijagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C

Svaka tačka na dijagramu stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C karakteristiše strogo određen hemijski sastav legure na datoj temperaturi.

Linija ABCD je likvidus linija i iznad nje su sve legure u tečnom stanju.

Linija AHJECF je solidus linija i ispod nje su sve legure u tvrdom stanju.

Linija AB pokazuje početak izdvajanja čvrstog rastvora iz rastopa. Linija HJB je peritektička linija. Kao rezultat peritektičke reakcije formira se austenit. Ova reakcija je moguća samo kod legura koje sadrže ugljik od 0,1-0,5%.



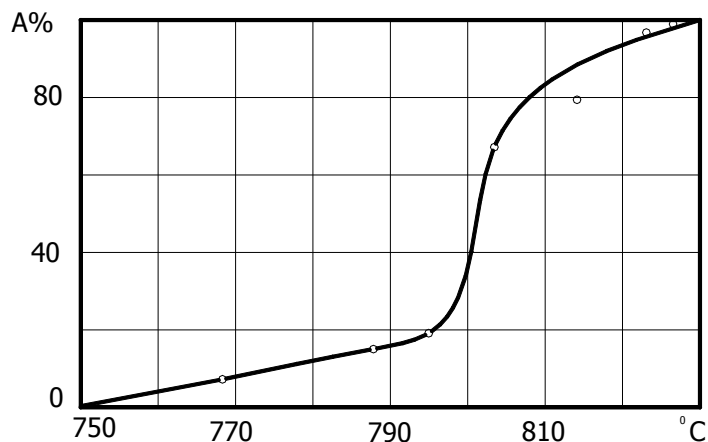
Slika 1. Dvokomponentni dijagram stanja Fe-C (Fe-Fe<sub>3</sub>C) [2]

### 3. NASTAJANJE AUSTENITA

Pri zagrijavanju podeutektoidnog čelika, čija se struktura sastoji iz ferita i perlita (ili ferita i cementita), dostizanjem perlitne temperature (727 °C), počinje izmjena kristalne rešetke gvožđa  $\alpha$  u  $\gamma$  i do temperature završetka transformacije obe komponentne strukture biće transformisane u austenit. Strukture koje očekujemo po dijagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C nastaju samo onda kada legurama prilikom hlađenja dajemo dovoljno vremena da se uspostavi ravnoteža. U praksi se za postizanje željenih osobina čelika primjenjuju postupci koji pri termičkoj obradi obuhvataju i takva stanja koja su jako udaljena od ravnoteže, pa se ravnotežni dijagrami mogu koristiti samo u ograničenoj mjeri.

Rastvoreni atom ugljika zauzima u kristalnoj rešetki austenita ravnotežni položaj u presjeku prostornih dijagonala kocke, zbog čega dolazi do deformisanja one ćelije u čijoj je rešetki atom rastvoren. Ako se eutektoidni čelik zagrije do temperature 727 °C, doći će do tolikog uvećanja energetske sadržaja, da će pored dvije postojeće faze (ferita i cementita), početi da se stvara treća faza – **austenit**. Za nastajanje austenita se obrazuju jezgra transformacije na graničnim površinama dviju polaznih faza (ferita i cementita). Temperatura 727 °C je temperatura ravnotežnog stanja na kojoj mogu postojati jedne pored druge sve tri faze. Ako se čelik zagrije do neke više temperature, pridoda se višak energije i nastat će uslovi za intenzivnije obrazovanje jezgra transformacije, kao i za brži tok transformacije.

Pri kontinualnom zagrijavanju na određenoj temperaturi dolazi do početka transformacije od koje ona teče nadalje relativno sporo do jedne određene temperature, kada se tok transformacije naglo ubrzava, a iza ove opet dolazi do usporenja transformacije (slika 2).



Slika 2. Tok transformacije perlita u austenit prikazan zavisnošću količine austenita od temperature u toku kontinualnog zagrijavanja [1]

Prikazani tok transformacije odnosi se na brzinu kontinualnog zagrijavanja 160 °C/sec. Iz ove slike se vidi da najveći dio austenita, oko 40%, nastaje na temperaturi oko 800 °C. Početak transformacije je spor, pa tako za 50 °C porasta temperature nastaje svega oko 20% austenita, a kraj transformacije je nešto brži, za 30 °C nastaje oko 40% austenita.

Brzina kontinualnog zagrijavanja ima uticaj i na tok transformacije perlita u austenit, što pokazuje primjer u tabeli 1.

Tabela 1. Uticaj brzine kontinualnog zagrijavanja na tok transformacije [1]

Brzina zagrijavanja °C/sec	Temperatura početka transformacije °C	Temperatura najveće brzine transformacije °C	Temperatura završetka °C
10	740 do 760	770	790
60	740 do 760	790	820
160	740 do 760	800	840
350	740 do 760	815	860

Iz prethodne tabele se vidi da brzina zagrijavanja ne utiče na temperaturu početka transformacije, dok su temperatura najveće brzine transformacije i temperatura završetka u porastu sa rastućom brzinom zagrijavanja. Temperatura na kojoj nastaje najveća brzina transformacije zavisi od brzine zagrijavanja i uvijek je veća od  $A_1$ .

$$\Delta T = a + b \cdot \log v \quad (1)$$

gdje je:

$\Delta T$  – razlika do temperature  $A_1$ ,

$v$  – brzina zagrijavanja °C/s,

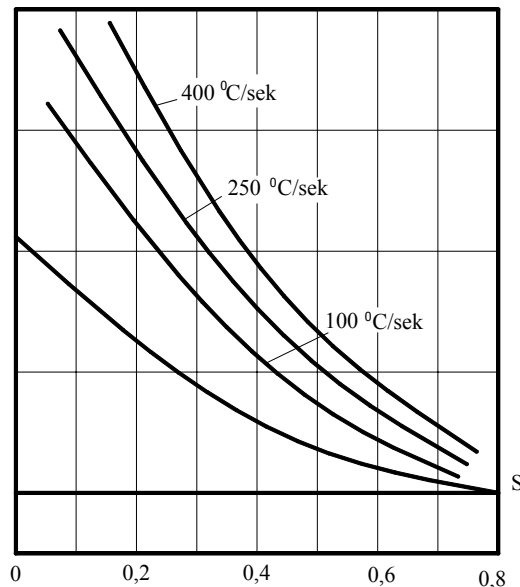
$b$  – koeficijent koji zavisi od čelika,

$a$  – koeficijent zavisian od polazne strukture.

Rezultati utvrđivanja kinetike transformacije za slučaj izotermnog procesa su nesigurni zbog nemogućnosti dovoljno brzog zagrijavanja od temperature  $A_1$ , do temperature transformacije. Mogu se navesti rezultati ispitivanja pri kojima je perlitni čelik zadržan na konstantnoj temperaturi 0,5 sec.

To su:

- Temperatura izotermne transformacije  $^{\circ}\text{C}$  ..... 745 755 770,
- Količina nastalog austenita % ..... 2 5 23.



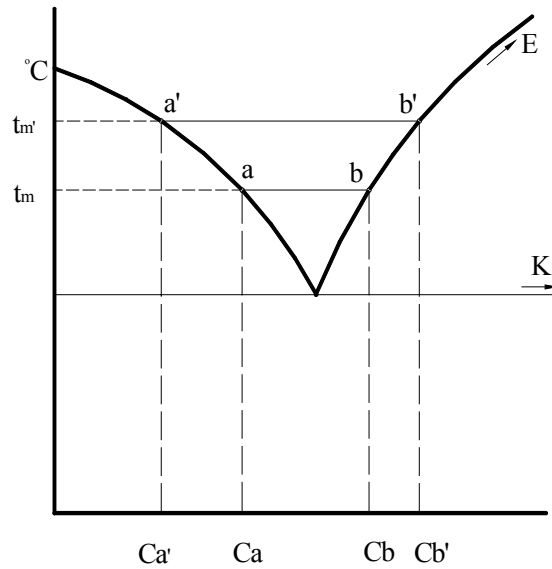
Slika: 3 Pomjeranje linije GS pri kontinualnom zagrijavanju raznim brzinama [1]

Posebno je interesantan slučaj kontinualnog zagrijavanja velikom brzinom kakva se primjenjuje kod površinskih kaljenja. Kod vrlo velikih brzina zagrijavanja mijenja se i mehanizam nastajanja austenita. Kod malih brzina zagrijavanja osnovni mehanizam transformacije je difuzija. Kod velikih brzina zagrijavanja dolazi, osim difuzije i do nastajanja jezgra transformacije u austenit na mjestima segregacije ugljika i azota po graničnim površinama, a pri još većim brzinama i do čiste polimorfne transformacije  $\alpha$  u  $\gamma$ . Ova zbivanja imaju uticaj na temperaturu završetka transformacije, što dovodi do pomjeranja linije GS u dijagramu Fe-C ka višim temperaturama (slika 3).

U toku transformacije perlita u austenit mogu se razlikovati tri odvojene etape:

- Prelaz  $\alpha$  u  $\gamma$  gvožđa (ferita u austenit),
- Rastvaranje ugljika u gvožđu  $\gamma$  poslije raspadanja cementita i
- Homogenizacija austenita.

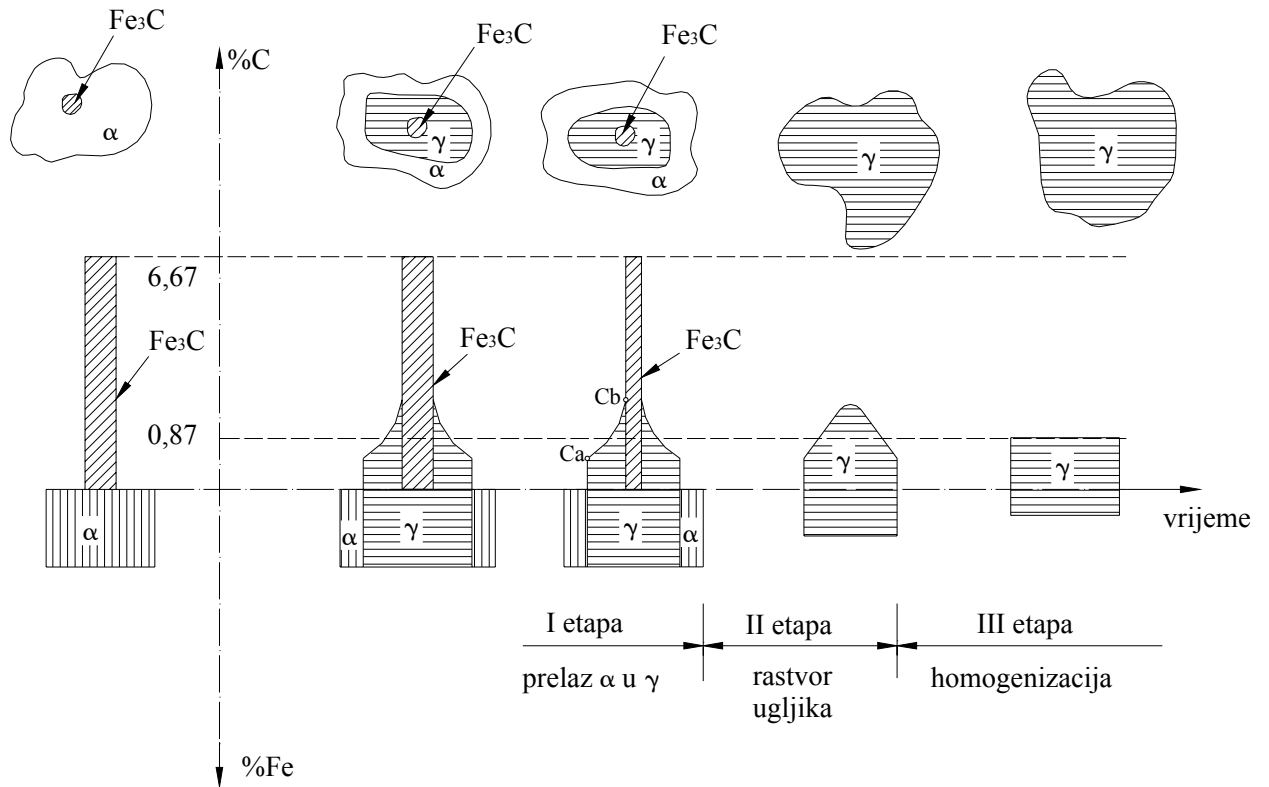
Ako posmatramo izotermnu transformaciju perlitnog čelika u austenit (slika 4) na konstantnoj temperaturi  $t_m$ , možemo preko tačaka **a** i **b** vidjeti da je u momentu nastajanja austenita najmanja moguća koncentracija ugljika  $C_a$  a najveća  $C_b$ .



Slika 4. Oblast mogućnosti koncentracije ugljika u austenitu [1]

Iz ovoga proizilazi da nastali austenit nema homogenu raspodjelu ugljika i da će ta nehomogenost biti utoliko veća ukoliko je temperatura transformacije veća. Homogen austenit po sadržaju ugljika nastaje tek ako se omogući difuzija atoma ugljika. Da bi se ovo obavilo potrebno je još određeno vrijeme na posmatranoj temperaturi, pa da pod uslovima tog energetskog nivoa dođe do homogenizacije austenita.

Cijeli proces se, prema Štajnbergu, šematski može prikazati kao na slici 5.



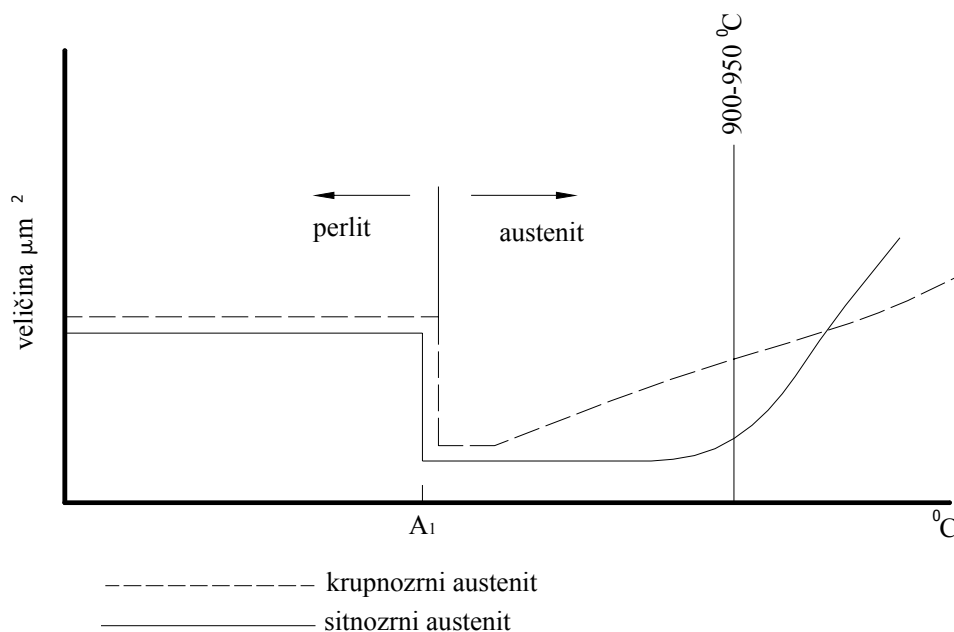
Slika 5. Šema toka perlitno-austenitne transformacije [1]

Pošto jezgro transformacije nastaje na graničnoj površini dviju faza (cementita i austenita), to će proces brže teći ukoliko je graničnih površina više, a to znači ukoliko su finije lamele prugastog perlita. Zrnasti perlit ima manje ovih površina, te će kod njega, zbog manjeg broja jezgri transformacije, doći do sporijeg toka procesa.

Tok transformacije se usporava i kada su prisutni elementi u legiranim čelicima koji obrazuju karbide (Cr, W, Mo, i dr.) a na to takođe utiče raspodjeljenost i oblik ovih karbida.

Kako jedno zrno perlita sadrži veći broj zrna ferita i cementita, to će, nastajanjem većeg broja jezgara transformacije na graničnim površinama cementita i ferita u okviru istog zrna perlita nastati austenit sitnijih zrnaca nego što je bila polazna perlitna struktura. Daljim zagrijavanjem ovako nastale sitno zrnate strukture austenita doći će do porasta zrna austenita zbog prirodne težnje ka nižem energetsom nivou uslijed smanjenja površinskih napona smanjenjem ukupne površine zrna. Ova sklonost ka porastu zrna austenita je različita kod raznih vrsta čelika, ali i kod iste vrste čelika proizvedenog drugim postupkom.

Na slici 6 šematski su prikazana dva granično različita ponašanja u pogledu porasta zrna austenita.



Slika 6. Šema promjene krupnoće zrna austenita kod dva različita čelika [1]

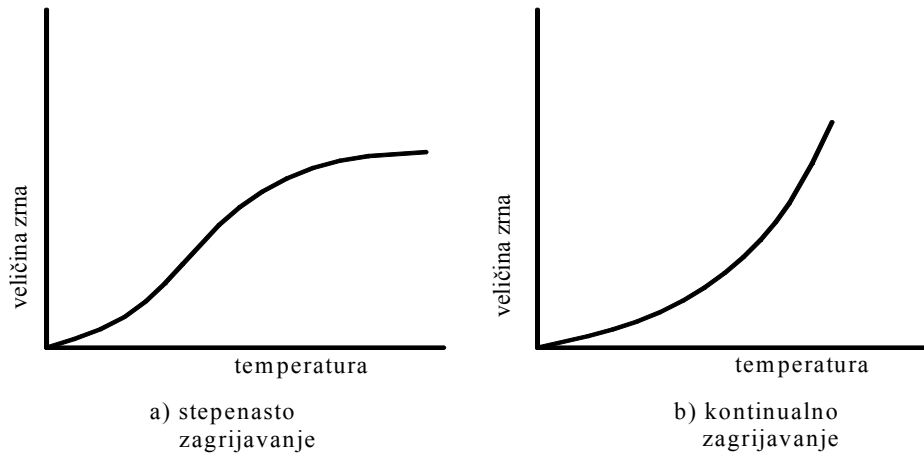
Polazeći od početne krupnoće zrna tek obrazovanog austenita, njihov dalji porast zavisit će od energetskog stanja granične materije i uslova samo difuzije. Porast veličine zrna poklapa se sa težnjom sistema da umanjim površinsku energiju dok, pored energetskih uslova, kinetiku porasta zrna diktira brzina difuzije atoma koji sačinjavaju graničnu materiju. Primjese ili legirajući elementi u graničnoj materiji mogu uticati na ovaj proces ubrzavajući difuziju ili smanjujući brzine difuzije. Do ovoga dolazi zbog smanjenja ili povećanja površinske energije u graničnoj materiji zbog prisustva stranih atoma.

Težnja ka porastu austenita javlja se, prije svega, kod svih čistih metala jer nema kočućeg dejstva granične materije. Takođe, ova težnja se javlja i kod čistog gvožđa, dok kod legura gvožđa najveću sklonost ka obrazovanju krupnih zrna imaju legure čiju strukturu obrazuje samo

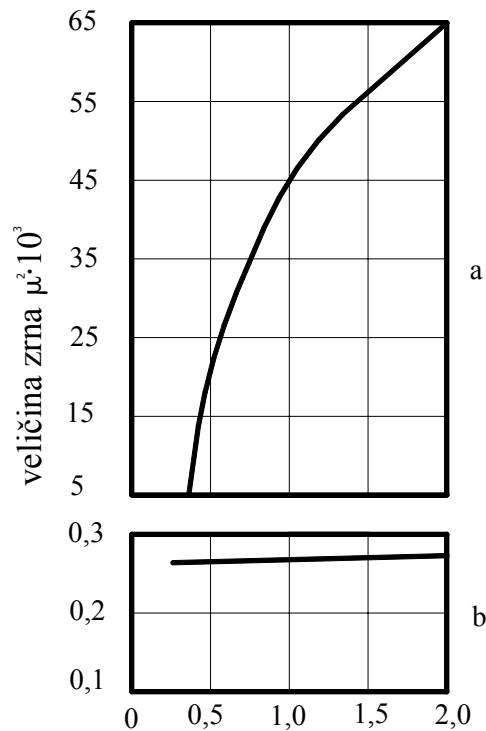


jedna faza, faza  $\alpha$  ima veću sklonost nego faza  $\gamma$ . Ukoliko je veći sadržaj ugljika u čeliku faza  $\alpha$  će imati veću sklonost obrazovanja krupnog zrna.

Osnovni faktori koji utiču na porast krupnoće zrna su visina temperature, vrijeme zadržavanja na njoj i brzina zagrijavanja. Krupnoća zrna zavisi od temperature, pri čemu postoji razlika u karakteru linije zavisno dali je zagrijavanje kontinualno ili stepenasto.



Slika 7. Zavisnost krupnoće zrna od temperature pri kontinualnom i stepenastom zagrijavanju [1]



Slika 8. Uticaj azota na porast zrna kod čelika sa 0,4% C [1]  
 a) prodivavanje azotom poslije dezoksidacije aluminijumom,  
 b) prodivavanje azotom prije dezoksidacije aluminijumom.

Hemijski sastav čelika ima veliki uticaj stvaranja krupnih zrna. Al, Ti, V, smanjuju sklonost obrazovanja krupnog zrna pri zagrijavanju na višim temperaturama kada su dodati čeliku u malim količinama (0,03% do 0,1%). Čelici sa vanadijumom koji se zagrijavaju sporo oko 300<sup>0</sup>C/čas na višim temperaturama dobijaju veoma krupno zrno. Međutim, neki elementi kao što su: ugljik, azot, bor, mangan, silicijum i aluminijum (ako ga ima u većoj količini), ubrzavaju porast zrna. Uticaj azota na porast zrna prikazan je na slici 8. Razmatrajući uticaj legirajućih elemenata na porast zrna **MESKIN** je istakao značaj legirajućih elemenata povezne sile u kristalu.

Energija aktiviranja samodifuzije je veća kod  $\gamma$  gvožđa nego kod  $\alpha$  gvožđa. Zbog ovoga je porast zrna na povišenim temperaturama veći kod feritnih nego kod austenitnih čelika. Zbog toga legirajući elementi koji sužavaju  $\gamma$  oblast u dijagramu Fe-C utiču na porast zrna na povišenim temperaturama. Na porast zrna austenita najveći uticaj ima sadržaj ugljika. Uticaj ugljika se može objasniti velikim smanjenjem poveznih sila kristalne rešetke, što dovodi do smanjenja energije aktiviranja difuzije. Sličan uticaj ima i azot.

Legirajući elementi koji obrazuju karbide a ostaju stabilni i na temperaturama austenita zadržavaju ugljik van rastvora te na taj način umanjiti sklonost ka poratu zrna kočenjem negativnog dejstva ugljika. Legirajući elementi koji ulaze u rastvor sa gvoždem, bez obzira dali obrazuju ili ne obrazuju karbide, mogu uticati na povećanje energije aktiviranja difuzije.

Za čelik čija je krupnoća zrna povećana u austenitnom stanju kaže se da je pregrijan. Njegov prelom je karakterističnog izgleda i liči na kamen (**kamenasti prelom**). Ovaj problem je posljedica interkristalnog loma koji je istovremeno i krti lom. Osim krupnoznaste strukture, posljedica kamenastog preloma su i neki dopunski procesi koji u graničnoj materiji stvaraju nedovoljno čvrste faze, zavisne od prisustva stranih atoma. Osnovni element koji povoljno utiče ne stvaranje kamenastog preloma je ugljik, a od legirajućih elemenata mangan, nikl, hrom.

Druga posljedica pregrijavanja je takozvani **naftalinski prelom** koji nastaje kao transkristalni lom preko poremaćenih mjesta u kristalnoj rešetci za vrijeme pogrešne austenitizacije. Uticaj ugljika, nečistoća i legirajući elementi i ovdje imaju uticaj na stvaranje deformacionih mjesta unutar zrna kristala. Zagrijavanjem na temperaturu koja je znatno viša od  $A_3$ , moguće je otkloniti ove greške.

Sklonost čelika ka obrazovanju krupnog zrna pri austenitizacij moguće je kontrolisati kod konstrukcionih čelika probom Mac Quaid-Ehna. Uzorak se podvrgava cementacij sve dotle dok površinski sloj ne dobije znatno veći sadržaj ugljika nego eutektoidni, pa se metalografskim metodama određuje krupnoća zrna. Kod alatnih čelika za ovu probu dovoljna je termička obrada.

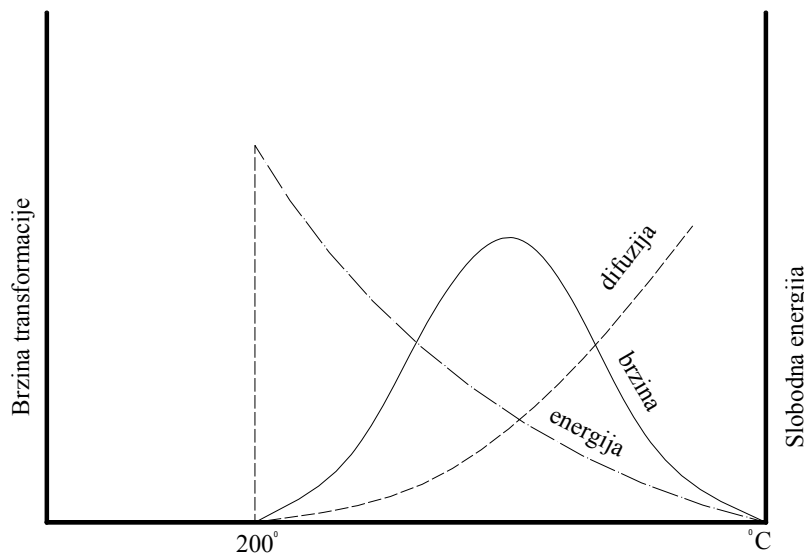
#### 4. TRANSFORMACIJA AUSTENITA

Ako posmatramo eutektoidni čelik zgrijan iznad temperature perlitne transformacije  $A_1$  tako da mu se struktura sastoji iz homogenog austenita sa 0,8% ugljika u rastvoru, može se izvršiti analiza zbivanja pri raznim uslovima hlađenja. Dostizanjem ravnotežne temperature  $A_1$  omogućuje se, da se pored austenita pojave i dvije nove faze:

- ferit i
- cementit.

Na temperaturi  $A_1$  feritna i cementitna faza, zajedno sa austenitnom, mogu biti u ravnoteži. Ovakva transformacija je omogućena stvaranjem povoljnih energetskih uslova, pri čemu najprije nastaju jezgra transformacije na onim mjestima u austenitu gdje je utrošak energije za njihovo stvaranje najmanji. Takva mjesta su granične površine zrna austenita, površine raznih

uključaka, kao i one vrste grešaka kristalne rešetke austenita koje imaju veći energetska sadržaj. Energetski uslov za tok nastajanja jezgra transformacije je određeno podhlađenje ispod ravnotežne temperature  $A_1$ . Ukoliko je ovo podhlađenje veće, utoliko će brže nastati jezgro transformacije, a time će biti i brži tok transformacije. Pri malim podhlađenjima, odnosno na visokim temperaturama transformacije, difuzioni proces će biti vrlo intenzivan i za atome Fe i za atome C. Sa porastom podhlađenja, intenzitet difuzije će opadati, pa se ispod temperature transformacije od  $200^{\circ}\text{C}$  praktično gubi. Ovo ima uticaja na karakterističan tok transformacije jer će brzina transformacije sa povećanjem podhlađenja najprije rasti do jednog maksimuma kod još većih podhlađenja ponovo opadati. Tok promjene brzine transformacije u zavisnosti od temperature na kojoj se obavlja šematski je prikazan na slici 9.



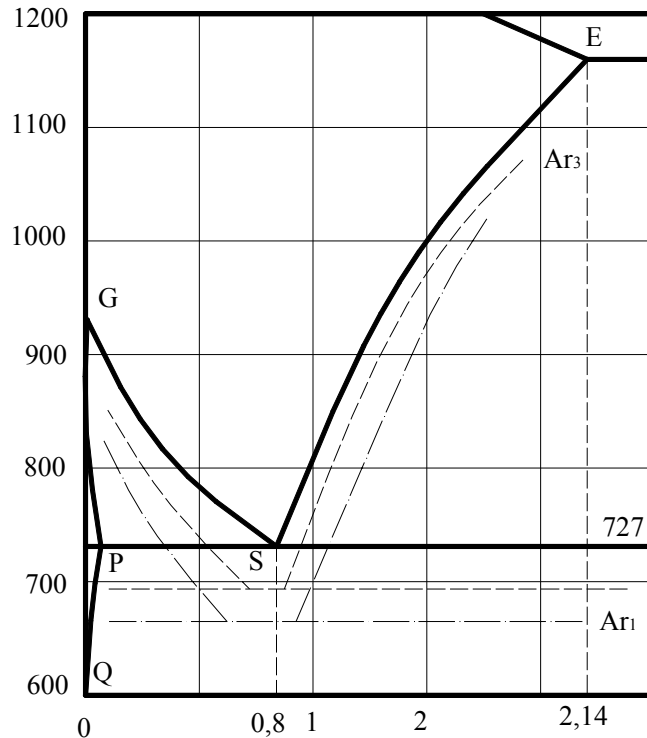
Slika 9. Promjena brzine transformacije u zavisnosti od temperature [1]

Pokretljivost atoma gvožđa ispod  $450^{\circ}\text{C}$  nije dovoljna da bi omogućila dovoljno brzu transformaciju, a pokretljivost atoma ugljika ispod  $200^{\circ}\text{C}$  takođe je nedovoljna za proces difuzije. Prema ovim osobinama transformacije austenita, moguća je podjela na sljedeće vrste transformacija: perlitna transformacija, beinitna transformacija, martenzitna transformacija,

- PERLITNA TRANSFORMACIJA se obavlja na temperaturama iznad  $450^{\circ}\text{C}$ , kada je moguća lahka difuzija i atoma ugljika i atoma Fe.
- BEINITNA TRANSFORMACIJA se obavlja na temperaturama između  $200^{\circ}$  i  $450^{\circ}\text{C}$  tj. kada više nije moguća difuzija atoma Fe već samo atoma C.
- MARTENZITNA TRANSFORMACIJA je na temperaturama ispod  $200^{\circ}\text{C}$  kada više nije moguća nikakva difuzija.

Uslov za stabilan tok raspadanja austenita je dovoljno veliko podhlađenje i struktura koja će ovom transformacijom nastati je u najvećoj mjeri zavisna od temperature u kojoj se proces transformacije obavlja. Postupak transformacije austenita se u tehnici termičke obrade može postići na dva načina:

- kontinualnim hlađenjem
- izotermnom transformacijom.



Slika 10. Uticaj brzine hlađenja na karakteristične tačke [1]

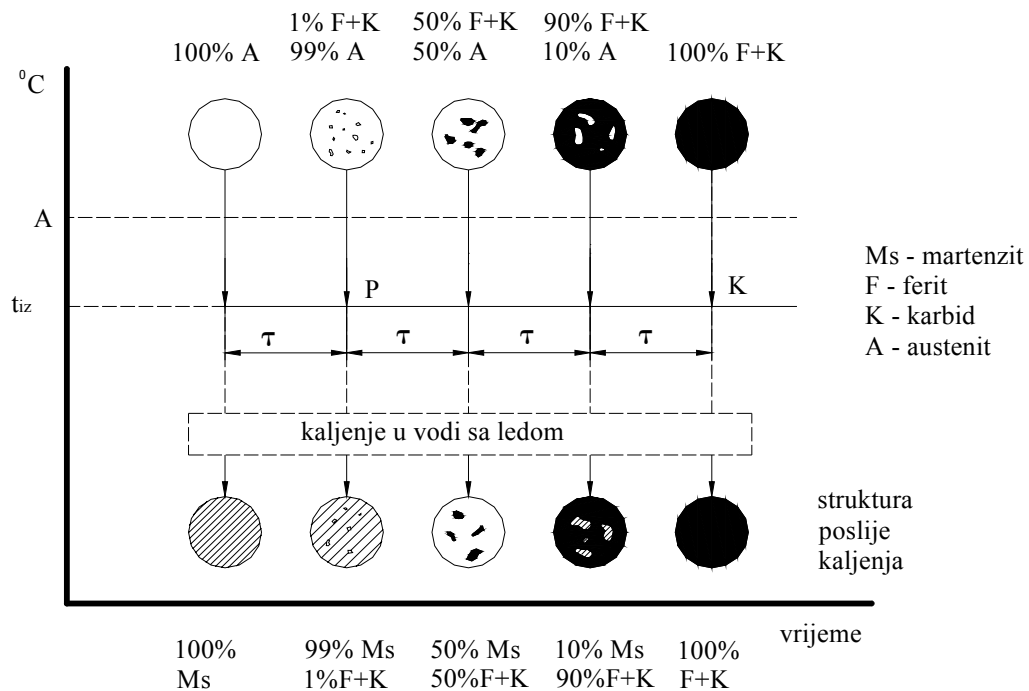
Uticaj brzine hlađenja na karakteristične tačke prikazan je na slici 10.

Punom linijom je izvučen ravnotežni dijagram, s normalnom brzinom hlađenja, isprekidanom za brzinu hlađenja  $27^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ , i tačka crta za brzinu  $216^{\circ}\text{C}$ .

Pri većim brzinama hlađenja uspostaviti će se veće podhlađenje, a početak transformacije biće na utoliko nižoj temperaturi ukoliko je brzina hlađenja veća. Tako je moguće kontinualnim hlađenjem austenita ostvariti perlitne, beinitne pa i martenzitne transformacije, ali pod uslovom da je brzina hlađenja dovoljno velika. Isti rezultati se mogu postići i izotermnom transformacijom na taj način što će se austenit dovoljno brzo rashladiti do temperature transformacije. Visina temperature na kojoj se obavlja transformacija određuje strukturu koja će nastati poslije transformacije.

Tok procesa raspadanja austenita se može posmatrati na TTT dijagramu (Time-Temperature-Transformation, što znači: vrijeme-temperatura-transformacija). Ovi dijagrami se zbog svog karakterističnog oblika nazivaju još i S-krive.

Istraživanje zavisnosti brzine strukturnih preobražaja od temperature, predstavlja u osnovi razvoj TTT-dijagrama. Davenport i Bain su prvi razvili dijagrame za izotermnu transformaciju. Oni su vrlo male komade eutektoidnog čelika zagrijavali na temperaturu kaljenja, i poslije obavljene potpune austenitizacije, potapali u rastopljeno olovo koje je imalo potrebnu temperaturu na kojoj je obavljena izotermna transformacija. Od više čeličnih pločica koje su bile pod istim uslovima i potopljene u rastvoreno olovo, vađena je, nakon određenog vremenskog perioda, po jedna i brzo rashlađivana u vodi sa ledom. Na taj je način fiksirano stanje transformacije do posmatranog trenutka jer će pri ovom rashlađivanju sav austenit koji se još nije transformisao preći u martenzit, što se utvrđuje metalografskim ispitivanjem. Rezultate ispitivanja prikazali su dijagramom vremena i temperature.



Slika 11. Nastajanje termokinetičkog dijagrama [1]

Na ovaj način se za posmatranu temperaturu transformacije može utvrditi trenutak početka i kraja transformacije. Ako se sličan eksperiment ponovi za razne temperature transformacije, dobit će se uvid u tok transformacije austenita, što se obično prikazuje na dijagramu vrijeme-temperatura, pri čemu se osa vremena prikazuje u logaritamskoj podjeli zbog boljeg uočavanja zbivanja na početku transformacije, kada su vremenski razmaci vrlo mali.

Na termokinetičkom dijagramu je geometrijsko mjesto tačaka početka transformacije označeno linijom **P**, a završetka linijom **K** (kraj transformacije) između linija **P** i **K** često se isprekidanim linijama ucrtavaju geometrijska mjesta tačaka sa istim procentom transformisanog austenita, na primjer sa 25%...50%...70%. Na dijagramu za kontinualno hlađenje mogu se ucrtati linije hlađenja i veoma pregledno pratiti tok transformacije i njen rezultat.

Ako je hlađenje obavljeno nekom drugom linijom tako da u svom toku nigdje iznad linije  $M_p$  ne dodiruje liniju početka transformacije **P**, pa se zatim čelik zadrži na temperaturi  $t_1$  dovoljno dugo, transformacija će se obaviti u martenzit. To je slučaj ako je izotermni postupak na temperaturi koja je niža od  $M_p$ . Zbog toga se u oblasti temperatura do  $M_p$ , pri izotermnoj transformaciji, dobija uvijek martenzitna struktura sa toliko većom tvrdoćom koliko je niža temperatura transformacije. Tvrdoće martenzita se mogu kretati u granicama od 65 do 68 HRC.

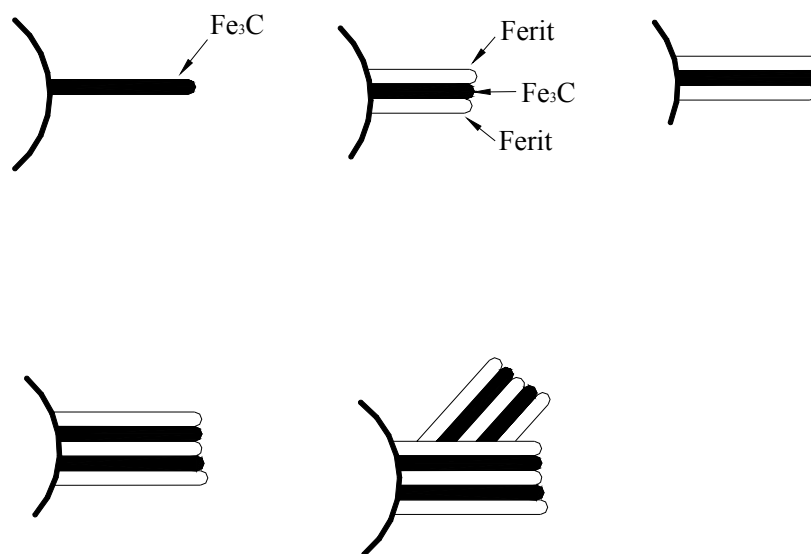
Ako je linija hlađenja produžena izotermom na temperaturi  $t_2$  između  $200^\circ$  i  $450^\circ\text{C}$ , poslije transformacije nastat će beinitna struktura. Na nižim temperaturama donji beinit će imati tvrdoću od 50 do 60 HRC, a na višim temperaturama gornji beinit tvrdoće 40 do 45 HRC. Pri temperaturama transformacije iznad  $450^\circ\text{C}$  raspadanjem austemita nastat će perlit. Na višim temperaturama transformacije nastaje grubi perlit manjih tvrdoća (5 do 30 HRC), a na nižim sitnozrnasti perlit sa boljim mehaničkim osobinama (30 do 40 HRC). Iz dijagrama se mogu, za svaki konkretan slučaj, odrediti dva najvažnija tehnološka parametra termičke obrade, a to su:

- temperatura izotermne transformacije
- neophodna brzina hlađenja.



## 4.1. Perlitna transformacija

Ako posmatramo izotermnu transformaciju austenita jednog perlitnog čelika na temperaturi iznad  $450^{\circ}\text{C}$ , kada je rezultat transformacije austenita perlit i kada izotermna transformacija dostigne liniju početka transformacije, počinje proces raspadanja austenita. Na kritičnim mjestima u austenitu nastat će prva jezgra transformacije. Kako u ovom slučaju nastaju dvije nove faze koje su međusobno različite, postavlja se pitanje koja od njih prvo nastaje: cementit ili ferit. Ranije se vjerovalo da prvo nastaje ferit, dok se danas više smatra da prvo nastaje cementit. Na slici 13 šematski je prikazan nastanak perlita pod pretpostavkom da prvo nastaje cementit.



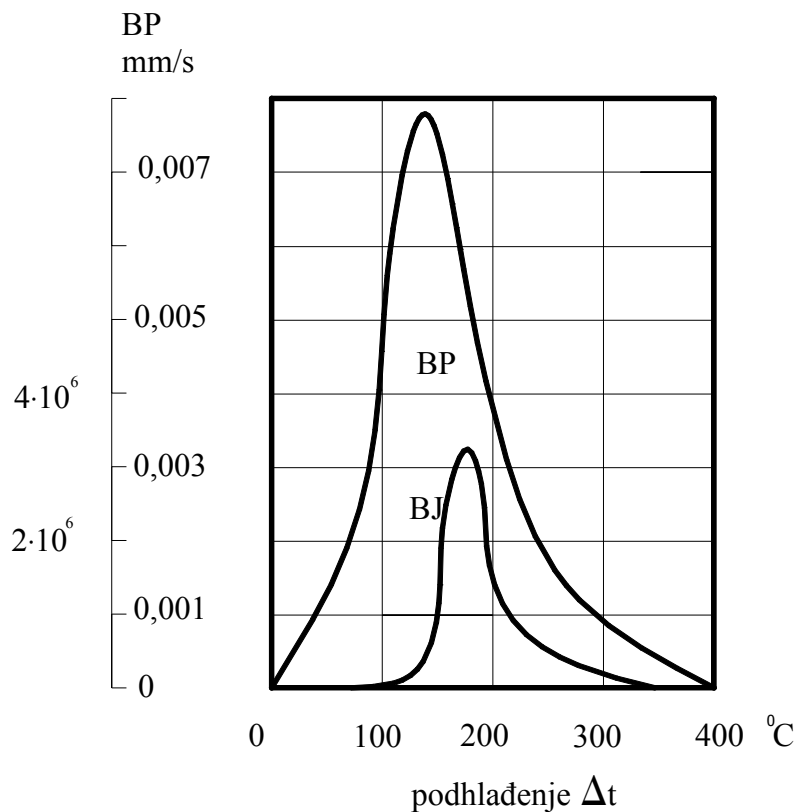
Slika 13. Šema nastajanja perlita [1]

Nastajanje prve male pločice cementita je uslovljeno difuzijom ugljika iz neposredne okoline pločice, jer se koncentracija ugljika u pločici mora uvećati od 0,8% na 6,67% koliko je potrebno za obrazovanje cementita.

Iz neposredne blizine pločice bit će oduzet sav ugljik iz austenita, što omogućuje da nastane lamelarni kristal ferita. Tako nastaju dvije tanke pločice ferita. Brzina ove transformacije je zavisna od brzine nastajanja jezgra transformacije i brzine porasta kristala novih faza.

Na slici 14 prikazana je promjena brzine porasta zrna i porast broja jezgra transformacije u zavisnosti od brzine podhlađenja kod perlitnog čelika.

Krupnoća zrna nastalog perlita zavisi od odnosa brzine nastajanja jezgra transformacije i brzine porasta zrna. Brzina porasta zrna je stalna veličina i nezavisna je od osobina austenita (dimenzije zrna, homogenosti), niti od uslova nastajanja legure (čistoća metala, način dezoksidacije itd.)



Slika 14. Zavisnost broja jezgara (BJ) i brzine porasta zrna (BP) od podhlađenja kod jednog perlitnog čelika [1]

Brzina kojom nastaju jezgra transformacije u velikoj mjeri zavisi od stanja austenita. Broj jezgra uvećavaju razni uticaji:

- povećana količina stranih uključaka,
- nehomogenost austenita,
- način dezoksidacije čelika itd.

Poseban uticaj ima krupnoća zrna austenita, pošto jezgra nastaju samo na graničnim površinama. Svi ovi uticaji na broj jezgra su utoliko veći ukoliko je podhlađenje manje, a slabiji su sa porastom podhlađenja.

Oblik cementita u perlitu zavisi od homogenosti austenita. Ako je ugljik raspoređen ravnomjerno, u austenitu nastaju uslovi za obrazovanje lamelnog cementita. Ako je temperatura nastajanja austenita dovoljno visoko iznad  $A_1$  nastat će homogeni austenit, dok nehomogeni austenit nastaje na temperaturama neposredno iznad temperature ravnotežnog stanja.

Znači, oblik nastalog perlita iz austenita zavisi od temperature austenitizacije, veličine podhlađenja, krupnoće zrna austenita i od sadržaja ugljika u čeliku. Vrijeme potpunog raspada austenita se može približno iskazati kao funkcija brzine porasta zrna ( $W$ ) i brzine nastajanja jezgra kristalizacije ( $N$ ):

$$\tau = \frac{A}{\sqrt[4]{N \cdot W^3}}$$

gdje je A- faktor proporcionalnosti.

Veličine N i W kod perlitnog čelika sa 0,70%C, 0,30%Si, 0,80%Mn, i 1%Cr iznose:



- $N=539 \text{ zrnca/mm}^3 \text{ min}$  i
- $W=0,00075 \text{ mm/min}$

Ako se čeliku doda 0,25% Mn veličine N i W iznose:

- $N=365 \text{ zrnca/mm}^3 \text{ min}$  i
- $W=0,000725 \text{ mm/min}$ .

## 4.2. Beinitna transformacija

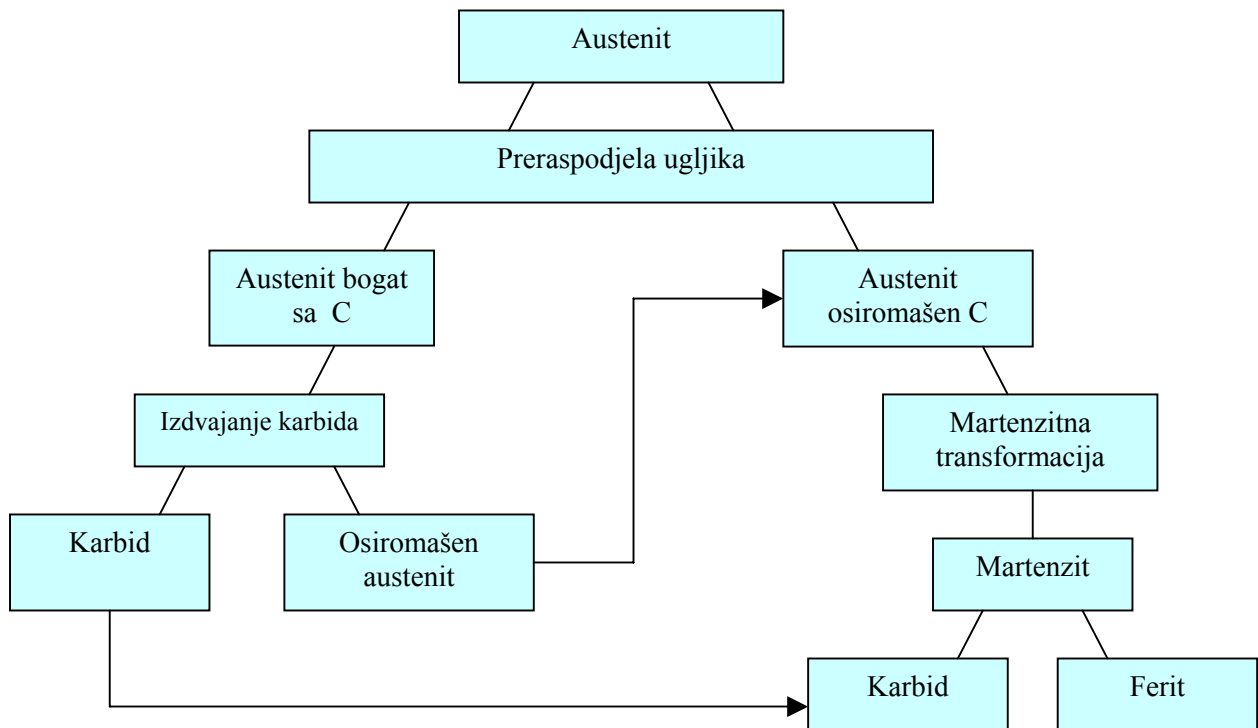
Ako je brzina hlađenja pri kontinualnom hlađenju tako podešena da se transformacija obavlja u intervalu temperatura između  $200 - 450^\circ\text{C}$  ili ako je za izotermnu transformaciju izabrana neka od temperatura iz istog intervala, proces transformacije austenita razlikovat će se kako od perlitne tako i od martenzitne transformacije.

U ovom slučaju raspadanjem austenita nastat će, isto kao i kod perlitne transformacije, ferit i cementit. Zbog bržeg hlađenja i niže temperature transformacije ferit sadrži viši procent ugljika. Isto tako ima razlike i u karbidnoj fazi.

Beinitna struktura se razlikuje od perlitne koja je nastala na višim temperaturama transformacije. Razlika je veća ukoliko je niža temperatura beinitne transformacije. Najveću sličnost sa perlitnom ima struktura koja je nastala na oko  $400^\circ\text{C}$ .

Ako se poslije završene beinitne transformacije obavi hlađenje do sobne temperature od preostalog austenita će nastati martenzit. Na ovu naknadnu martenzitnu transformaciju ima veliki uticaj hemijski sastav čelika. Kod uljičnih i nisko legiranih čelika koji su poslije beinitne transformacije hlađeni na sobnu temperaturu, dolazi skoro do potpune transformacije austenita u martenzit.

Šematski tok beinitne transformacije prikazao je A. Guljajev.

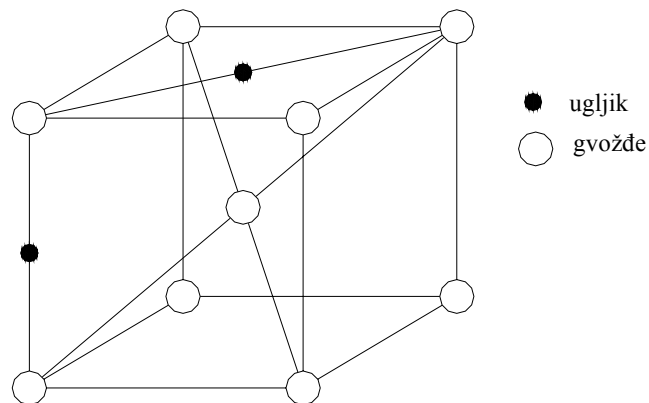


Slika 15. Šema toka procesa kod beinitne transformacije [1]

### 4.3. Martenzitna transformacija

Ako se hlađenje austenita obavi dovoljno velikom brzinom, ili na dovoljno niskoj temperaturi, procesom transformacije austenita nastat će martenzit. Proces nastajanja martenzita nije još do danas potpuno objašnjen, sigurno je samo to da je to proces transformacije bez difuzije.

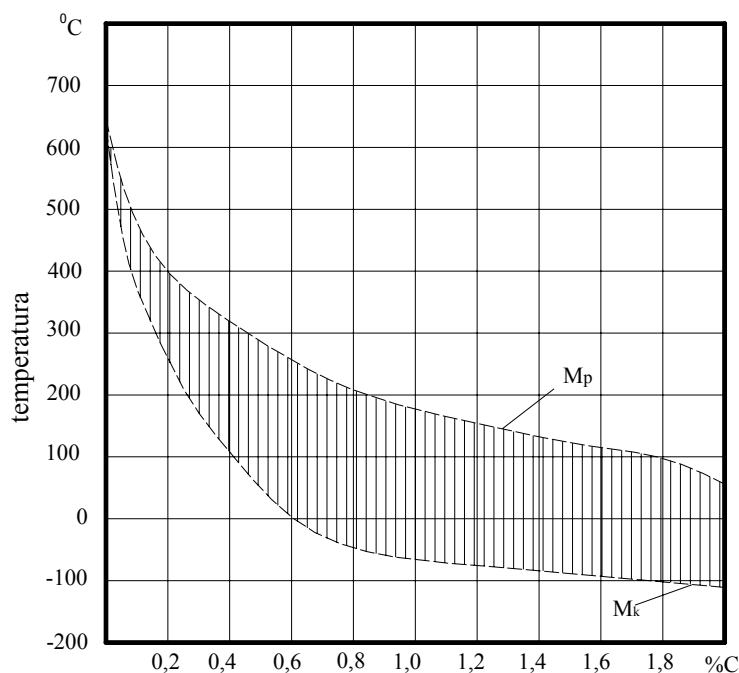
Prinudni rastvor ugljika u  $\alpha$  gvožđu na sobnoj temperaturi izaziva deformisanje rešetke martenzita tako da je ova prostorno centrirana tetragonalna rešetka umjesto kubne koja je karakteristična za  $\alpha$  gvožđe. Mogući ravnotežni položaji atoma ugljika u ovoj rešetci prikazani su na slici 16.



Slika 16. Mogući položaji ugljika u tetragonalnoj rešetci martenzita [1]

Obrazovanje martenzita je stepenast proces koji u jednom trenutku počinje, odvija se vrlo kratko vrijeme velikom brzinom, pa se zaustavlja da bi, nakon nekog vremena, ponovo počeo. Prirodu procesa transformacije u martenzit objašnjava i činjenica neodređenosti temperatura početka ( $M_p$ ) i kraja ( $M_k$ ) martenzitne transformacije. Temperatura početka transformacije je temperatura na kojoj je nastalo samo 1% martenzita, a temperatura kraja transformacije je temperatura na kojoj je nastalo 99% martenzita.

Utjecaj sadržaja ugljika na početnu i krajnju temperaturu transformacije prikazan je na slici 17.



Slika 17. Zavisnost temperature početka i kraja martenzitne transformacije od sadržaja ugljika u ugljičnom čeliku [1]

Temperatura početka transformacije ima veći značaj nego temperatura završetka. Za određivanje temperature početka transformacije, kao i temperature završetka transformacije koriste se empirijske formule.

Za čelike sa:

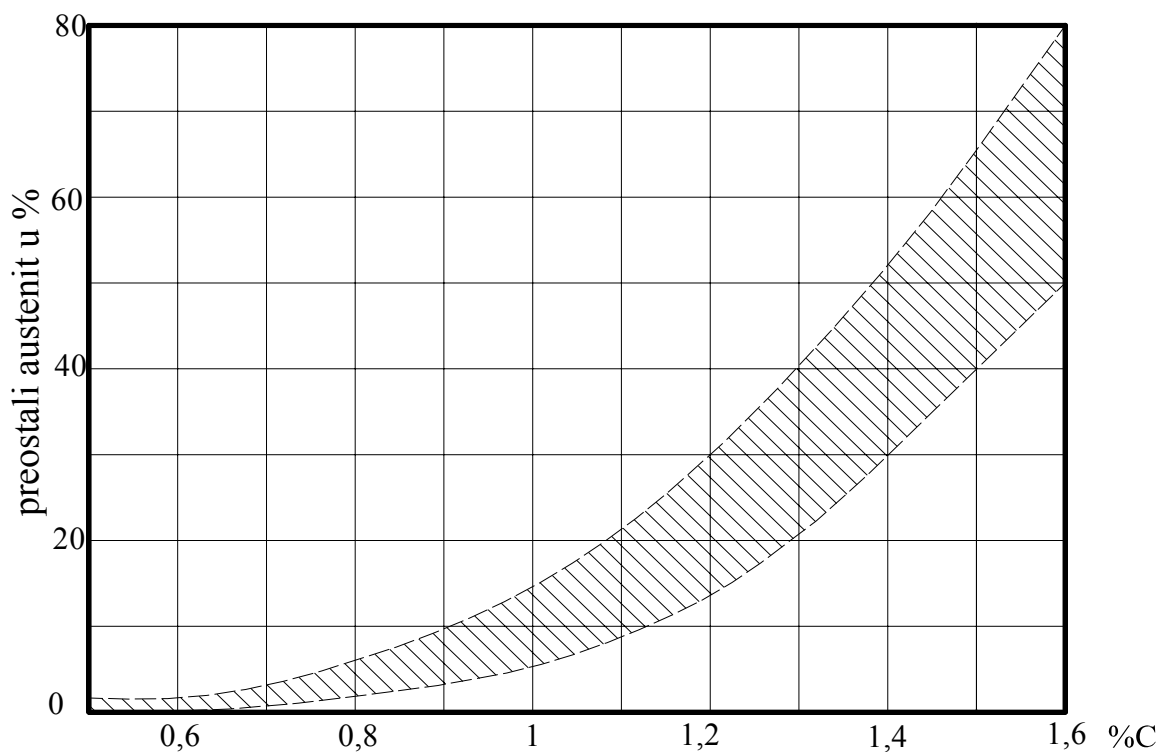
- 0,32% do 0,44% C,
- 0,44% do 1,33% Mn,
- 0,74% do 4,23% Ni,
- 0,28% do 1,44%Cr i
- 0,10% do 0,51% Mo

formula glasi:

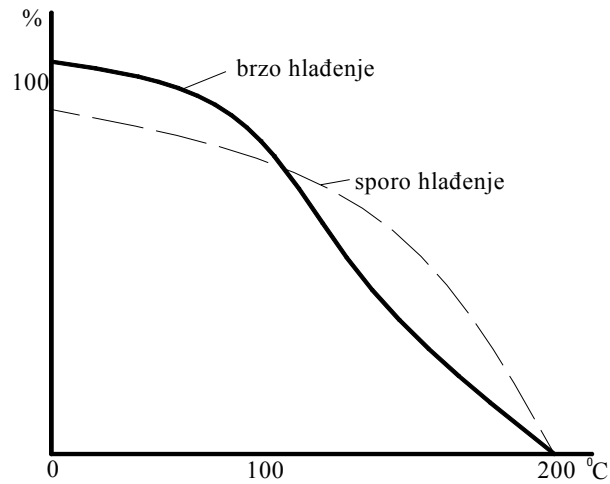
$$M_x = K - 474 \cdot C - 33 \cdot Mn - 17 \cdot Ni - 17 \cdot Cr - 21 \cdot Mo$$

gdje je x -stepen transformacije

Ukoliko je brzina hlađenja veća od kritične, nema uticaja na temperature početka i završetka procesa. Međutim, način hlađenja ispod temperature  $M_p$  ima veliki uticaj na tok transformacije. Stabilizacija austenita, pri izotermnoj transformaciji na temperaturama ispod  $M_p$  onemogućuje praktično sprovođenje procesa izotermne martenzitne transformacije. Zbog stepenastog toka procesa, transformacija se nikada neće obaviti u potpunosti već će, pored martenzita u kaljenoj strukturi, uvijek biti i preostalog austenita čija je količina kod ugljičnih čelika veća ukoliko je sadržaj ugljika veći.



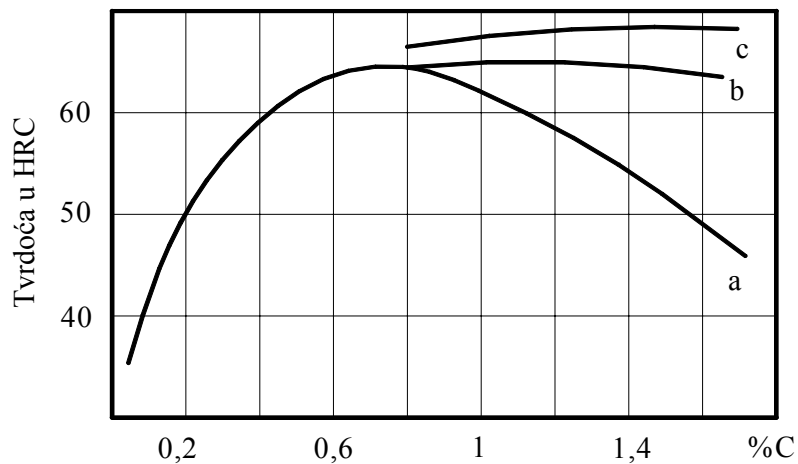
Slika 18. Uticaj sadržaja ugljika na količinu preostalog austenita u ugljičnom čeliku [1]



Slika 19. Uticaj brzine hlađenja ispod  $M_P$  na količinu preostalog austenita [1]

Na količinu preostalog austenita imaju uticaja i legirajući elementi i to tako što elementi koji snižuju temperaturu početka transformacije istovremeno uvećavaju količinu preostalog austenita, a oni koji povišuju temperaturu umanjuju količinu preostalog austenita. Na količinu preostalog austenita ima uticaj i brzina hlađenja.

Karakteristična osobina kaljenog čelika sa martenzitnom strukturom je visoka tvrdoća koja je posljedica napona nastalih deformisanjem tetragonalne kristalne rešetke. Najveća tvrdoća kaljenja pored sadržaja ugljika zavisi i od temperature kaljenja. Kod konstrukcionih čelika najveća tvrdoća se postiže kaljenjem sa temperature za oko  $30^{\circ}\text{C}$  iznad  $A_3$ . Sa slike 20 se vidi da kod ovih čelika tvrdoća raste i sa sadržajem ugljika.



Slika 20. Uticaj sadržaja ugljika i temperature kaljenja na tvrdoću kaljenog čelika [1]

- a) kaljenje sa temperature iznad  $A_3$ ,
- b) konstrukcioni čelici kaljeni iznad  $A_3$ , a alatni iznad  $A_1$ ,
- c) tvrdoća martenzita.

Ostale mehaničke osobine austenita su nepogodne. Čvrstoća je mala ali je krutost velika, što je posljedica velikih unutrašnjih napona koji mogu dovesti do mikropukotina.

## 5. OSNOVE TTT DIJAGRAMA

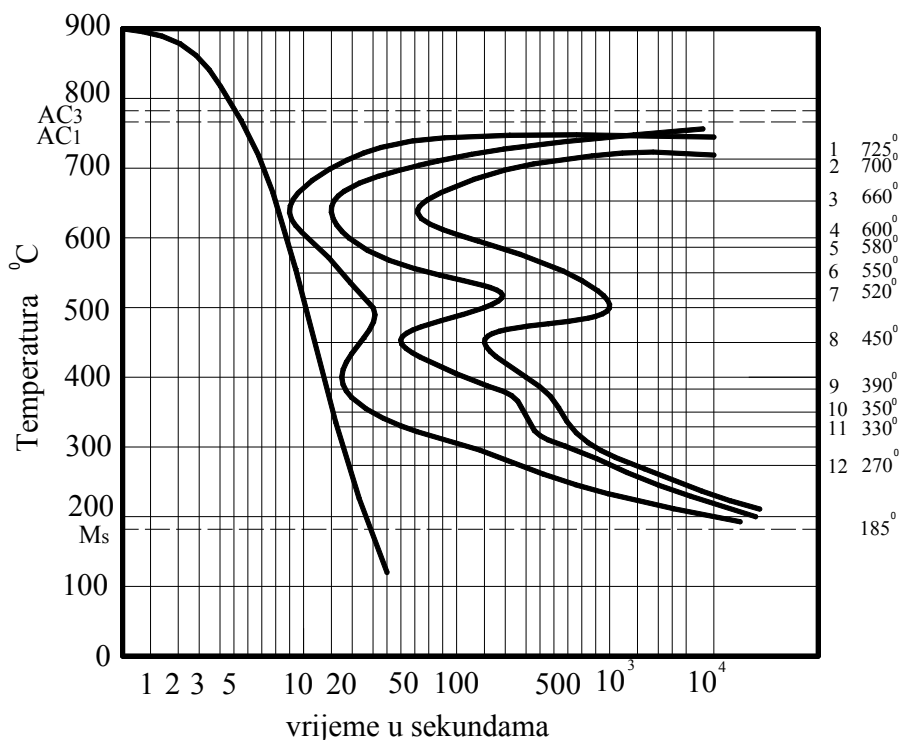
Istraživanje zavisnosti brzine strukturnih preobražaja od temperature, predstavlja u osnovi razvoj TTT-dijagrama. Kao što je već rečeno Davenport i Bain su prvi razvili dijagrame za izotermnu transformaciju. Na TTT dijagramima su na ordinatu nanešene temperature a na apscisu vrijeme u logaritamskom mjerilu. Lijeva krivulja u dijagramu pokazuje početak, a desna završetak preobražaja na određenoj temperaturi nakon određenog vremena. U gornjem dijelu dijagrama preovladava perlitni preobražaj. Ukoliko linija početka transformacije leži više u desno, time je moguće koristiti blaže sredstvo za hlađenje tj. umjesto vode uzima se ulje ili zrak.

### 5.1. TTT dijagram izotermalnog tipa

Izotermalni TTT dijagrami predstavljaju pregled međusobnih odnosa preobražaja temperature, vremena i nastale strukture pri konstantnoj temperaturi. Uslovi izotermalnog preobražaja se postižu brzim hlađenjem čelika iz austenitnog područja do određene temperature i održavanjem na toj temperaturi do završetka preobražaja.

### 5.2. Snimanje i konstrukcija izotermalnog TTT dijagrama

Izrada izotermalnih dijagrama zasniva se na eksperimentalnom određivanju toka transformacije u podhlađenom austenitu kod konstantne temperature. Za konstrukciju jednog izotermalnog dijagrama potrebno je približno 10 dilatometarskih uzoraka. Uzorci koji se koriste za dilatometar su cjevasti  $\phi 4 \times 30$  mm sa unutrašnjim promjerom  $\phi 2,6$  mm. Glavna operacija je određivanje kritične brzine hlađenja i  $M_s$  temperature. Kritična brzina hlađenja je najmanja brzina hlađenja čelika koja omogućava prvu pojavu martenzita u strukturi. Na svakom uzorku se, nakon izotermalnog držanja, ispituje struktura i tvrdoća. Vrijednosti tvrdoće unose se za konkretnu temperaturu iza linije koja označava kraj transformacije, a struktura se obično prikaže na posebnom listu. Na slici 21 prikazan je izotermalni dijagram za čelik Č.4146. Temperatura austenitizacije iznosi  $900^\circ\text{C}$ .



Slika 21. Izotermalni dijagram za čelik Č.4146 [3]

Na slici su data samo četiri karakteristična primjera krivulja izotermske transformacije.

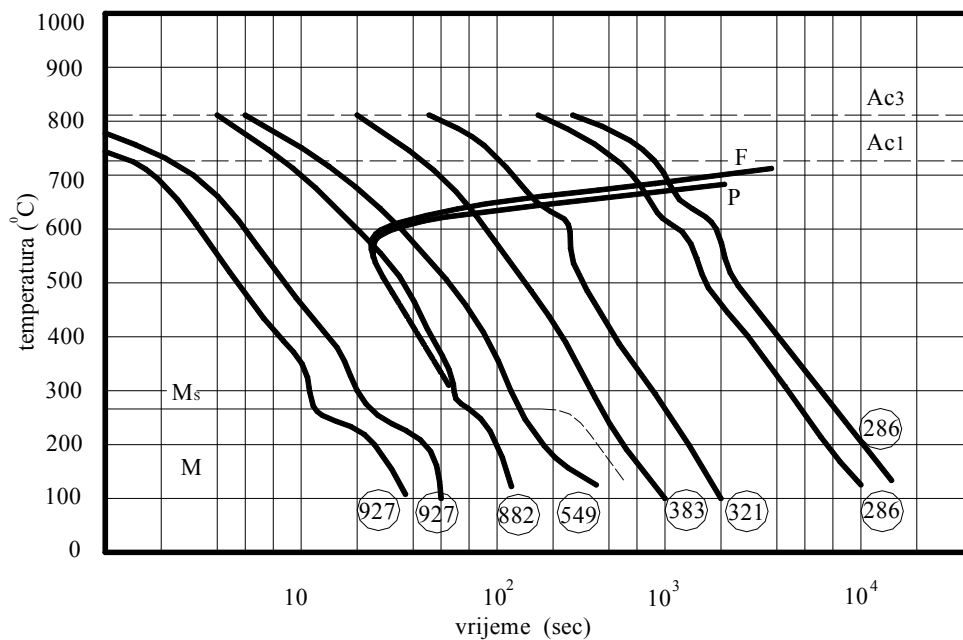
### 5.3. Snimanje i konstrukcija kontinuiranih TTT dijagrama

Za proučavanje promjena austenita pri uslovima kontinuiranog hlađenja primjenjuju se kontinuirani TTT dijagrami. Za konstruisanje ovakvog dijagrama kontinuiranog tipa potrebno je 10 do 20 uzoraka, u zavisnosti od vrste čelika. Uzorci su isti kao i kod snimanja izotermalnog dijagrama,  $\phi$  4x30 mm unutrašnjeg promjera  $\phi$  2,6 mm. Svaki uzorak se ispituje pri različitim brzinama hlađenja koje se postižu hlađenjem u vodi, na vazduhu, različitim solnim kupatilima, u ulju ili u peći za najsporije hlađenje,  $1^{\circ}/\text{min}$ .

U dijagramu je koordinata vremena apscisa u logaritamskoj podjeli, a koordinata temperature je ordinata koja je u linearnoj podjeli. U dijagramu se ucrtavaju pojedine krive hlađenja dilatometarskih uzoraka. Na svaku krivu hlađenja unose se preobražajne tačke koje se povezuju međusobno. Na taj način dobije se dijagram koji predstavlja transformaciju pothlađenog austenita pri kontinuiranom hlađenju sa temperature austenitizacije.

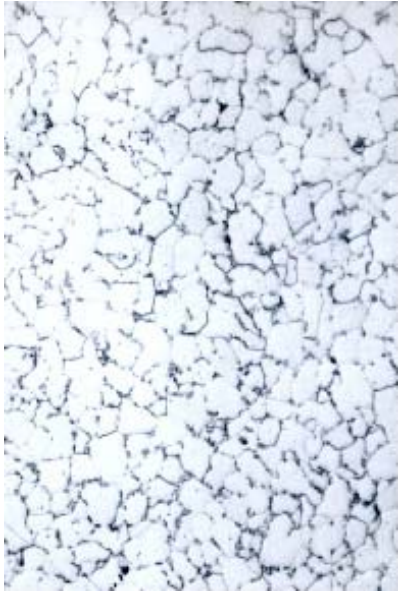
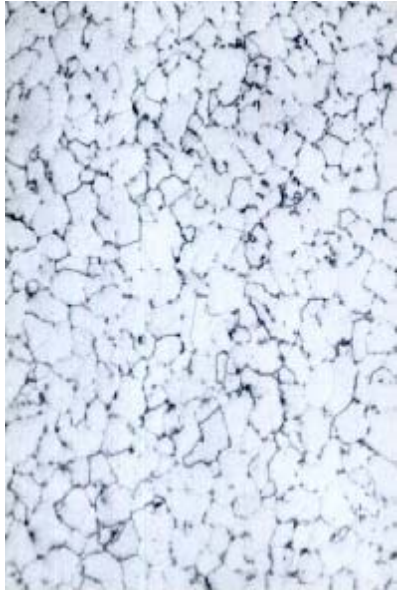

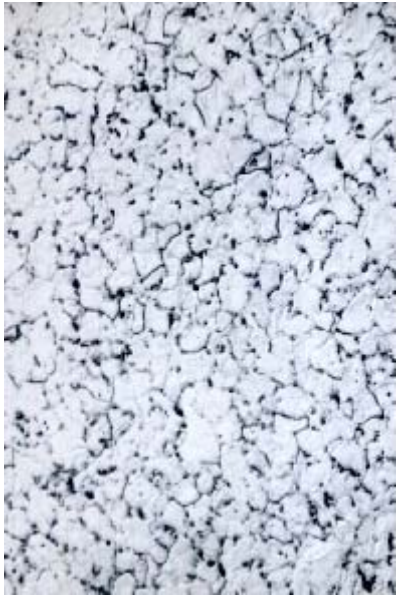


Ovakav dijagram se čita duž ucrtanih kriva hlađenja, a ne s lijeva u desno kao što je uobičajeno. Na slici 21 je prikazan primjer kontinuiranog TTT dijagrama i njemu pripadajuće krive hlađenja za mangansku šinu sastava:

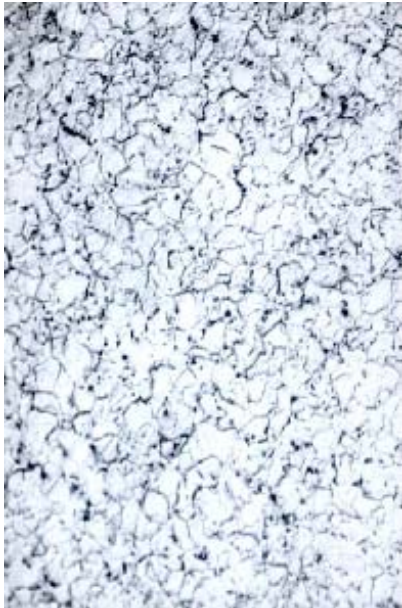
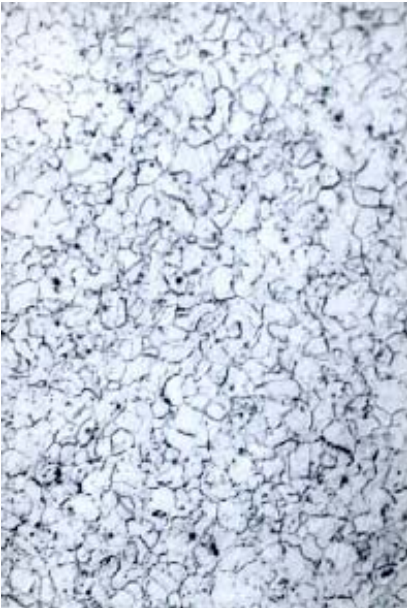
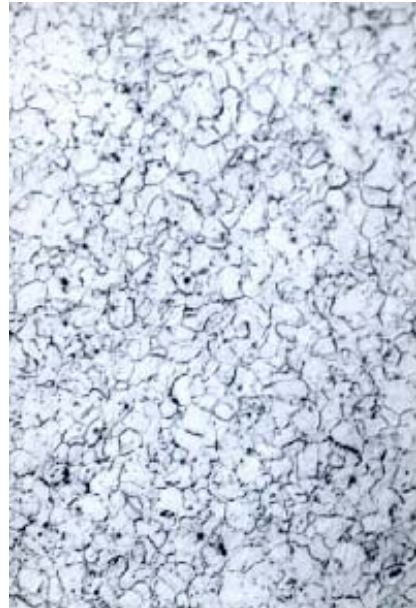



- 0,65 % C,
- 0,27 % Si,
- 1,49 % Mn,
- 0,015 % S,
- 0,021 % P.



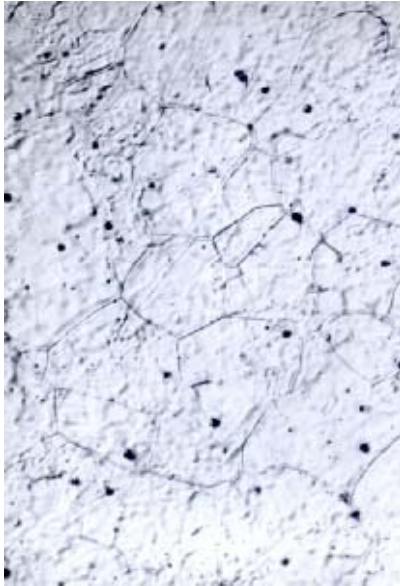
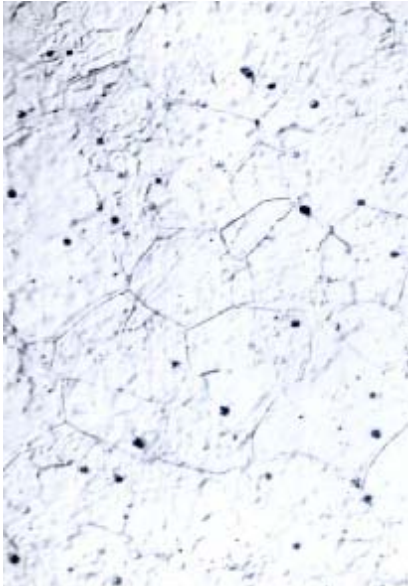
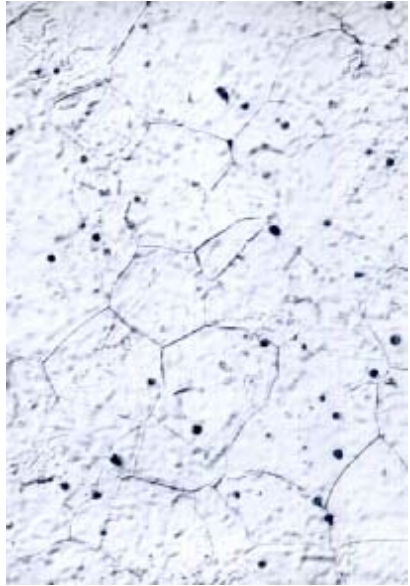
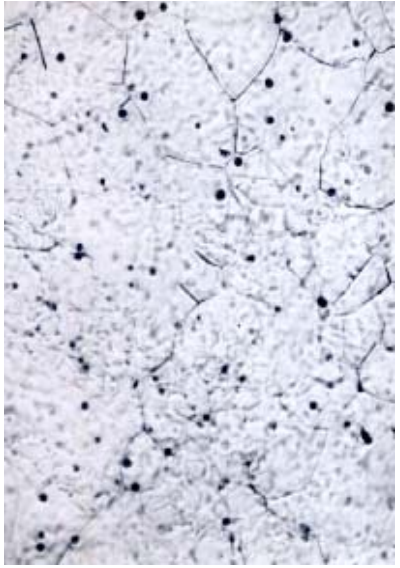


Slika 22. Kontinualni TTT dijagram [3]

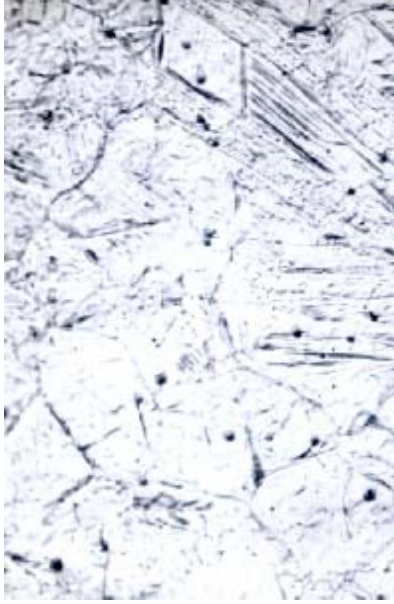
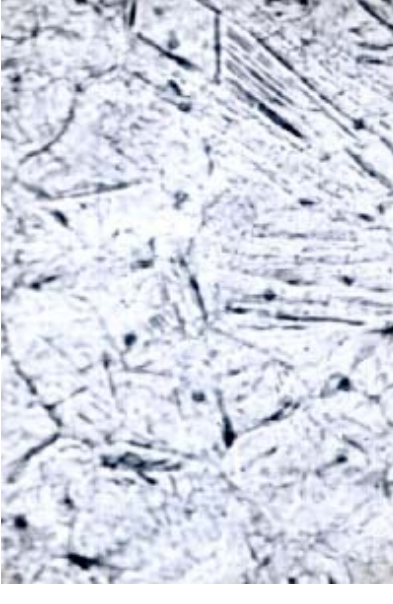
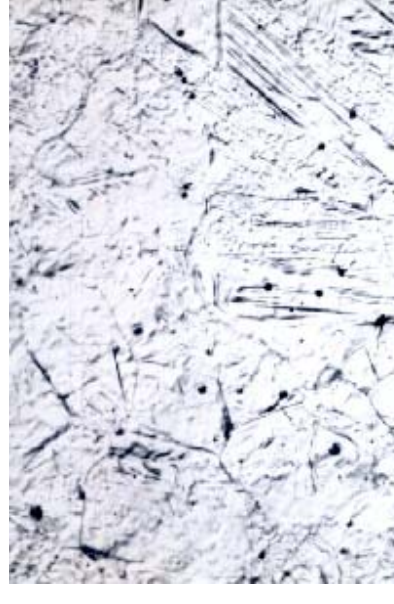
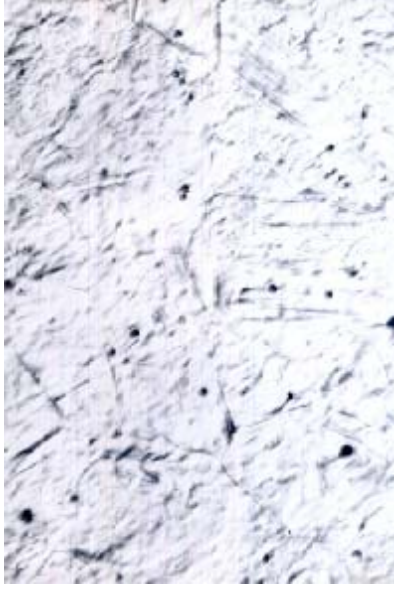

## 6. PROMJENE VELIČINE AUSTENITNOG ZRNA

		
<i>Slika: 23</i>	<i>Slika: 24</i>	<i>Slika: 25</i>
		
<i>Slika: 26</i>	<i>Slika: 27</i>	<i>Slika: 28</i>

		
<p><i>Slika: 29</i></p>	<p><i>Slika: 30</i></p>	<p><i>Slika: 31</i></p>
		
<p><i>Slika: 32</i></p>	<p><i>Slika: 33</i></p>	<p><i>Slika: 34</i></p>



		
<p><i>Slika: 35</i></p>	<p><i>Slika: 36</i></p>	<p><i>Slika: 37</i></p>
		
<p><i>Slika: 38</i></p>	<p><i>Slika: 39</i></p>	<p><i>Slika: 40</i></p>

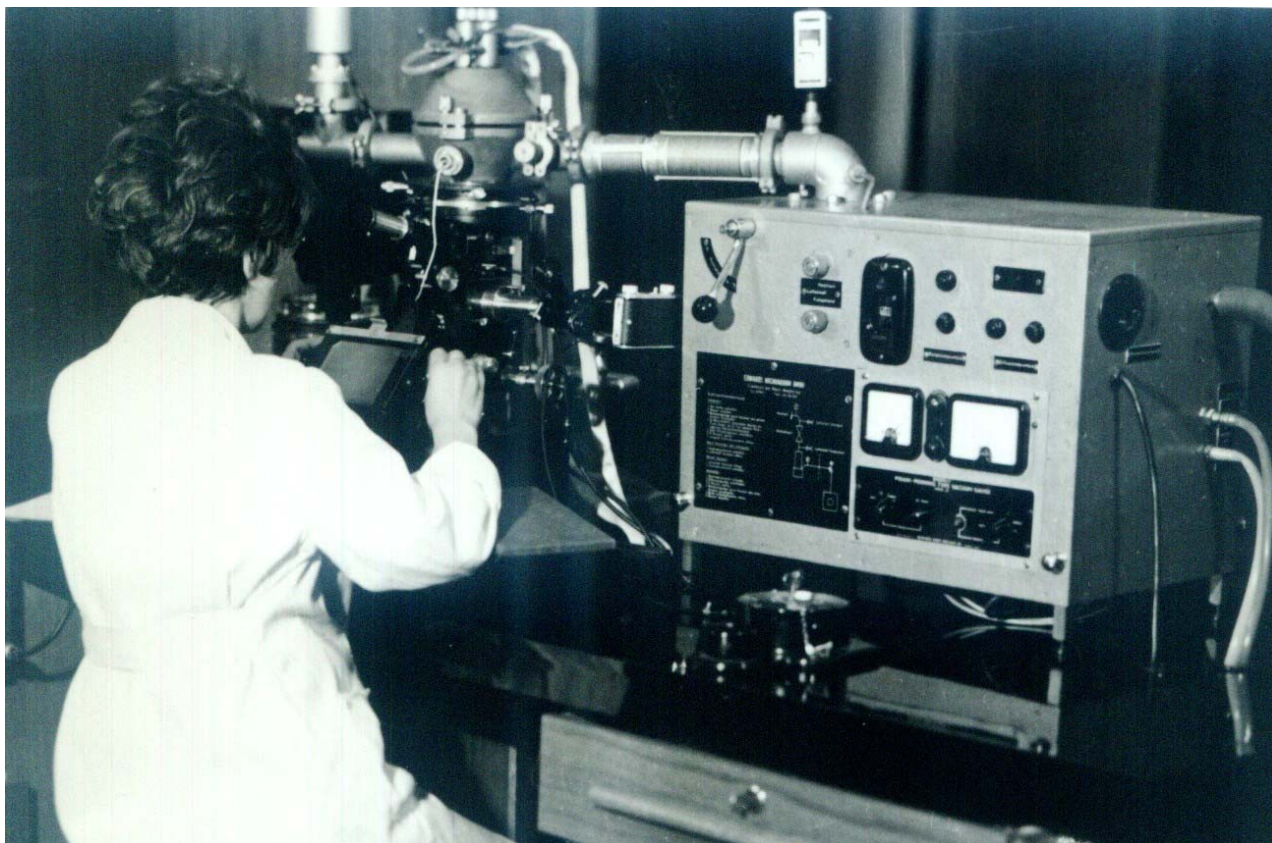
		
<p><i>Slika: 41</i></p>	<p><i>Slika: 42</i></p>	<p><i>Slika: 43</i></p>
		
<p><i>Slika: 44</i></p>	<p><i>Slika: 45</i></p>	

Na slikama od 23 do 45 prikazano je kontinuirano praćenje promjene veličine zrna pri faznoj transformaciji niskougledjeničnog čelika za cijevi. Početna temperatura je  $300^{\circ}\text{C}$ , zatim se zagrijava do  $1110^{\circ}\text{C}$  i na toj se temperaturi drži 10 min. a zatim se vrši hlađenje do temperature  $300^{\circ}\text{C}$ .

Tabela 2. Temperature zagrijavanja i veličine zrna pri faznoj transformaciji [3]

Slika br.	Temperatura zagrijavanja	Veličina zrna (po ASTM skali)
1	Struktura u dostavljenom stanju (na sobnoj temperaturi 20 <sup>0</sup> C)	6,7,8
2	300 <sup>0</sup> C zagrijavanje	6,7,8
3	400 <sup>0</sup> C	6,7,8
4	500 <sup>0</sup> C	6,7,8
5	600 <sup>0</sup> C	7,6
6	700 <sup>0</sup> C	6,7,8
7	750 <sup>0</sup> C	6,7,8
8	800 <sup>0</sup> C	6,7,8
9	850 <sup>0</sup> C	5,6,7 (sitniji)
10	900 <sup>0</sup> C	7,8,6
11	950 <sup>0</sup> C	4-8
12	1000 <sup>0</sup> C	4-8
13	1000 <sup>0</sup> C 10 min. držanje na toj temperaturi	2-5
14	1050 <sup>0</sup> C	2-5
15	1100 <sup>0</sup> C	2-5
16	1110 <sup>0</sup> C 10 min. držanje na toj temperaturi	1-5
17	900 <sup>0</sup> C hlađen	1-5
18	700 <sup>0</sup> C	1-5
19	550 <sup>0</sup> C	1-5
20	500 <sup>0</sup> C	Nisu jasno izražene granice zrna. Ne vide se zbog ubrzanog hlađenja
21	450 <sup>0</sup> C	Nisu jasno izražene granice zrna
22	400 <sup>0</sup> C	Nisu jasno izražene granice zrna
23	300 <sup>0</sup> C	Nisu jasno izražene granice zrna

## 7. UREĐAJ ZA PRAĆENJE PROMJENE VELIČINE ZRNA



*Slika 46. Mikroskop za visokotemperaturna ispitivanja "VACUTERM" [3]*

Ovaj uređaj omogućava kontinuirano praćenje promjene veličine zrna na raznim temperaturama kao i mogućnost određivanja temperature na kojoj zрно počinje naglo rasti. Na ovom mikroskopu ne može se dobiti izgled strukture osim u nekim iznimnim slučajevima (martenzitna, beinitna, Widmanstatenova).

## **8. Literatura:**

- [1] Pantelić I. Tehnologija termičke obrade čelika 1., Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1974.
- [2] Hađipašić A. Termička obrada metala i legura, Mašinski fakultet u Zenici, Zenica, 1993.
- [3] Haračić N. Predavanja, Mašinski fakultet u Zenici, Zenica 2005.