

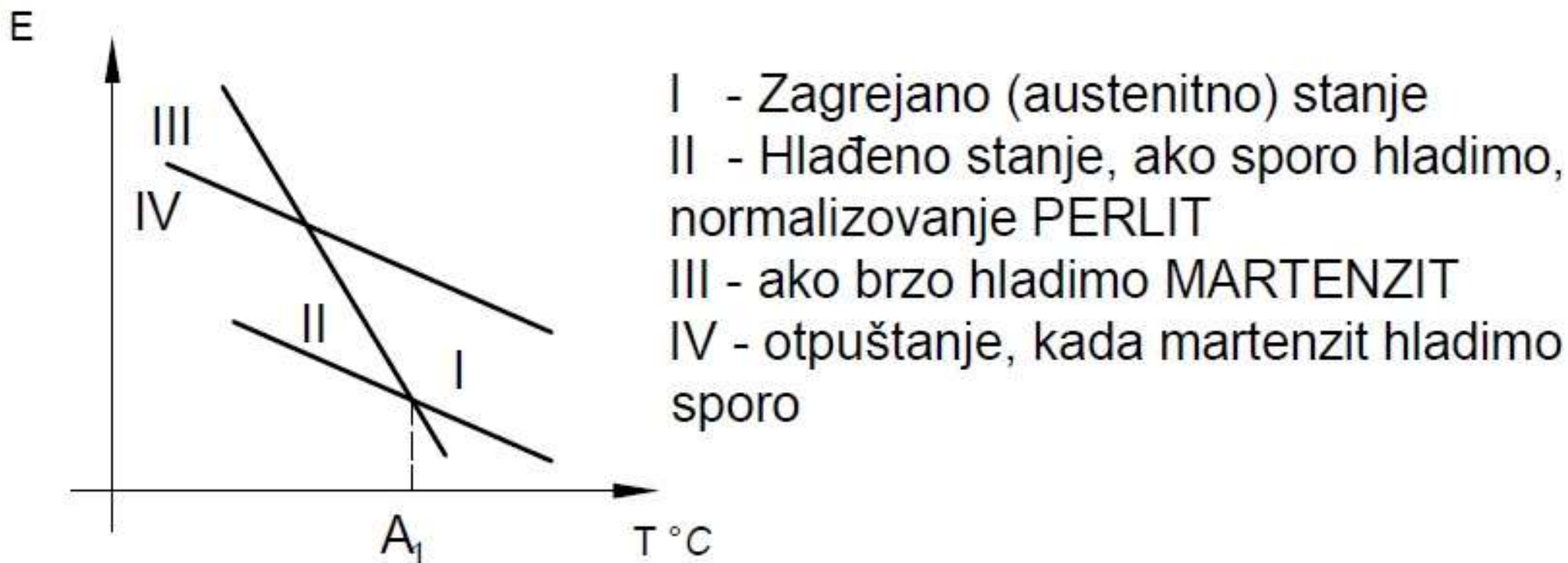
# PROJEKTOVANJE TEHNOLOGIJE TERMIČKE OBRADA

Prof. dr Branko Škorić

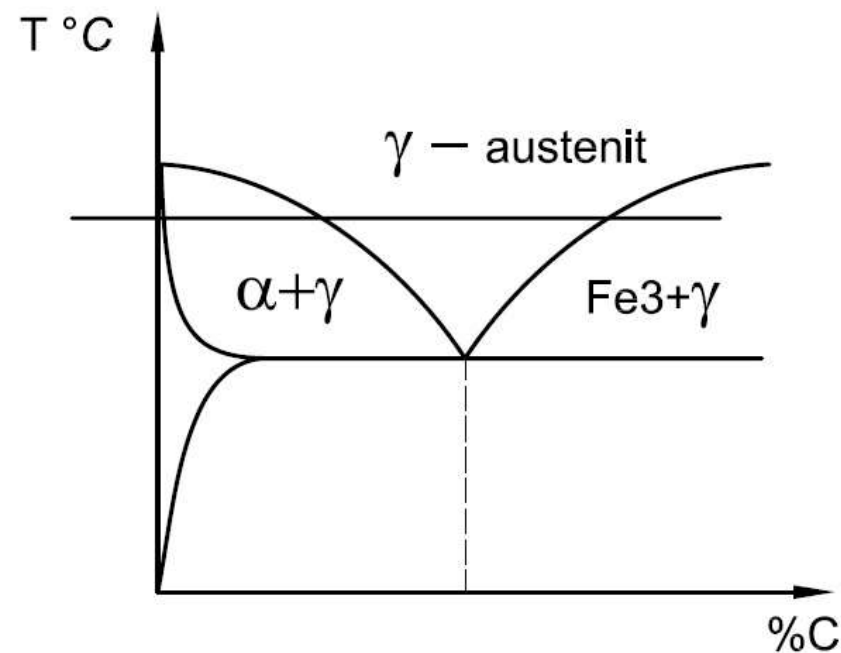
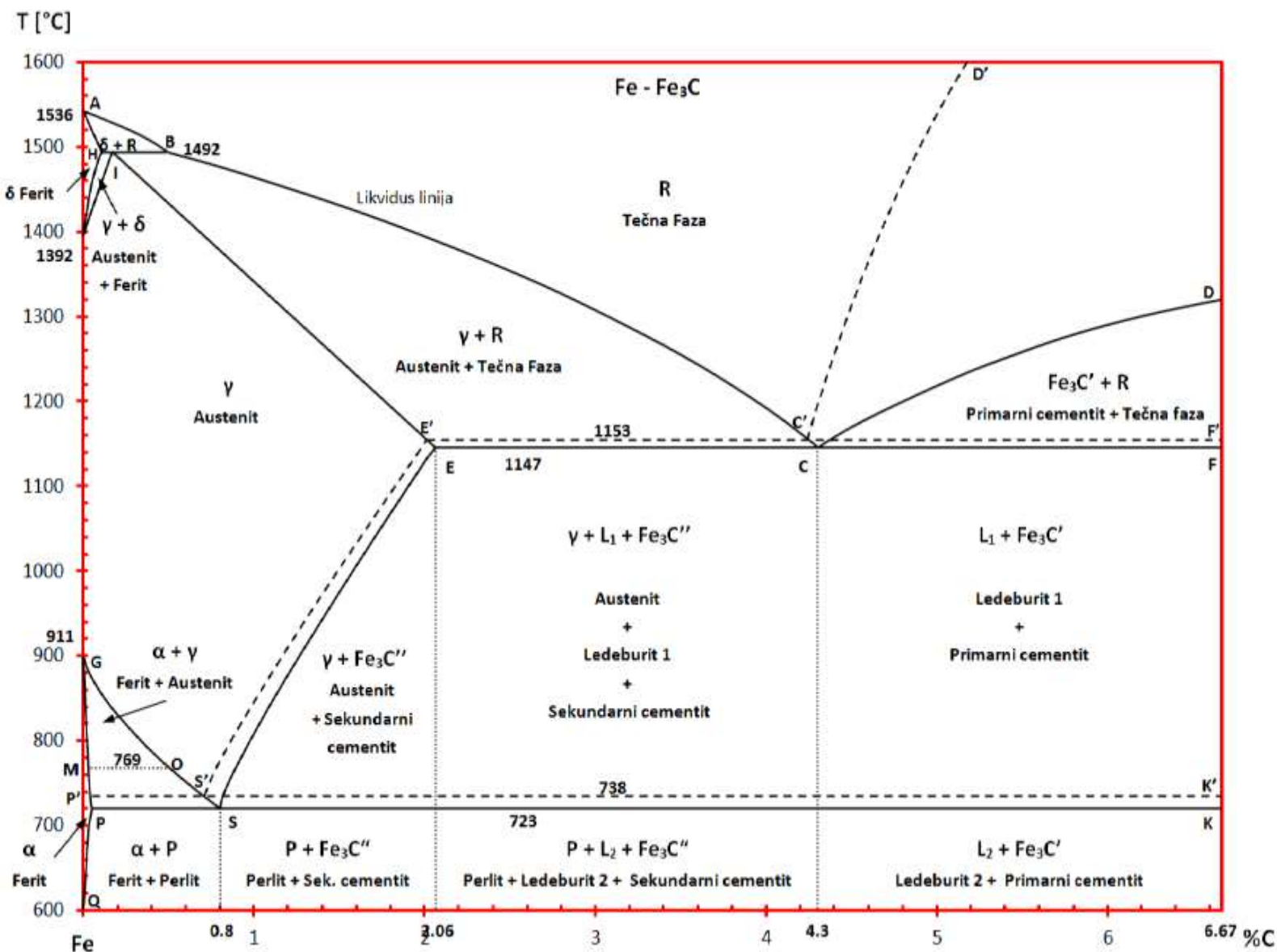
Doc. dr Lazar Kovačević

# OSNOVNI PROCESI TERMIČKE OBRADE

- Slobodna energija sistema (eutektoidni čelik-A1)



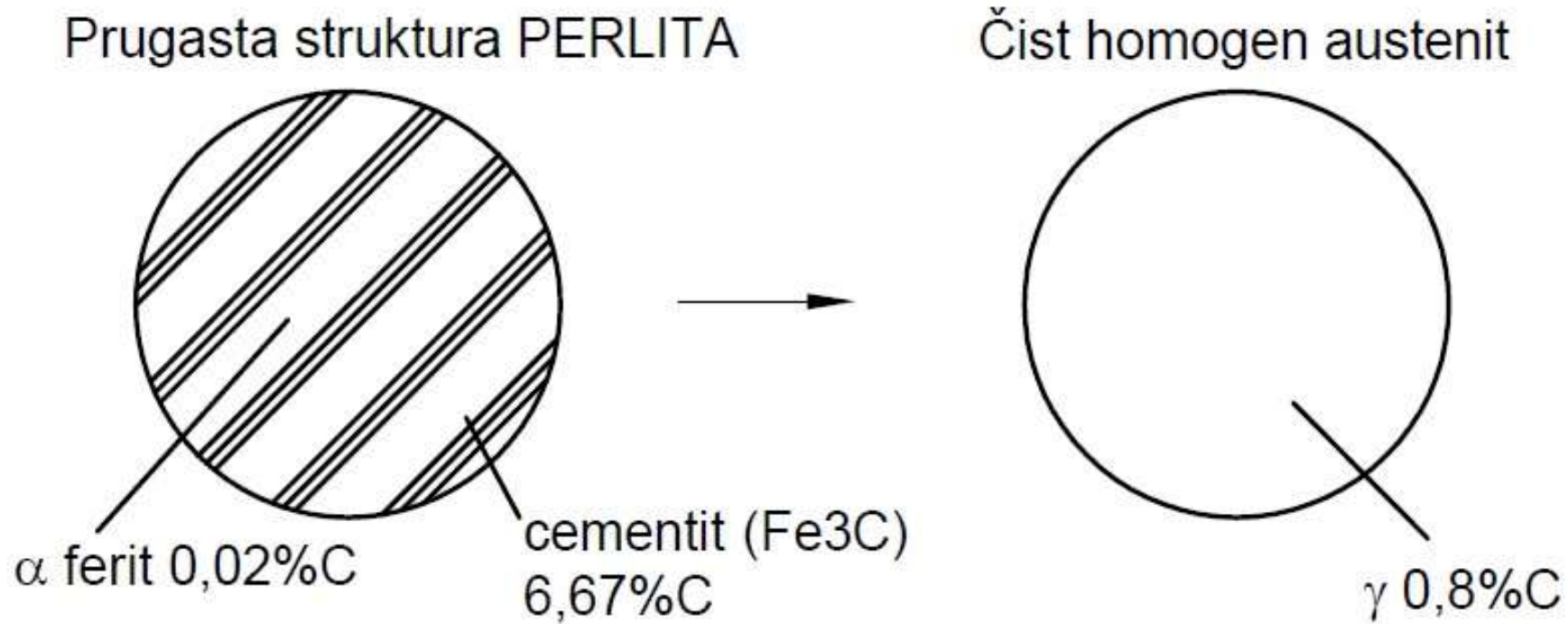
# FAZNE TRANSFORMACIJE U SISTEMU ŽELJEZO-UGLJENIK



# TRANSFORMACIJA U AUSTENIT

Transformacija perlita u austenit pojavljuje se u procesu zagrevanja čelika kod mnogih termičkih obrada. Prema dijagramu stanja Fe–C, eutektoidni čelik 0,8%C, ima perlitnu strukturu (lamelle ferita + cementit). U procesu zagrevanja do temperature  $A^C_1$  (linija PSK, 727°C) rastvara se manja količina cementita u feritu. Daljim zagrevanjem preko temperature  $A^C_1$  na granicama feritne i cementitne faze obrazuju se mala zrna austenita, u kojima je rastvoren ugljenik. Dalje, ova obrazovana zrna rastu uz stvaranje novih zrna austenita, a proces razlaganja cementita se nastavlja.

# Obrazovanje austenita



- Prema tome, transformacija perlita u austenit nastaje usled alotropskih promena rešetke železa  $\alpha \rightarrow \gamma$ , razlaganja  $\text{Fe}_3\text{C}$  i difuzije atoma ugljenika.

# Faze procesa

1. Stvaranje centara kristalizacije (trenutno)
2. Rast centara kristalizacije u zrna (sporije)
3. Rastvaranje karbida
4. Rast austenitnog zrna (nepoželjno)

# Stvaranje centara kristalizacije

- Odvija se tamo gde su energetske uslovi najpovoljniji, gde je mali potsticaj za aktivaciju procesa. To su po pravilu granice zrna ili granice između dve faze.

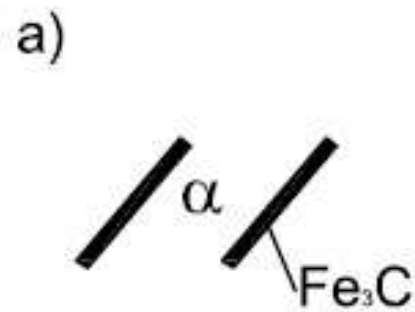
Dve teorije kako dolazi do stvaranja klica:

- Stvaranju klica prethodi pomeranje C
- U kristalu ferita dolazi do fluktuacije energije

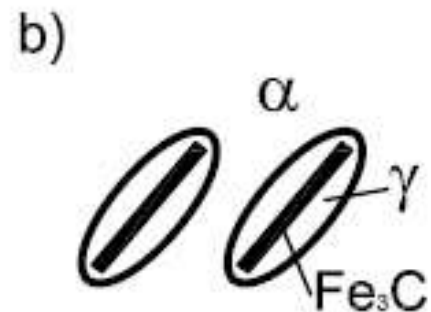
# Rast centara kristalizacije u zrna

- Rast se odvija i u pravcu ferita i u pravcu cementita (Fe-C), a zavisi od brzine difuzije ugljenika i od granice austenit-cementit.
- Brzina pomeranja ove međufazne granice je obrnuto proporcionalna skoku koncentracije difundirajućeg elementa (C). Tako da je brže pomeranje granice austenit-ferit i zato ima preostalog austenita.

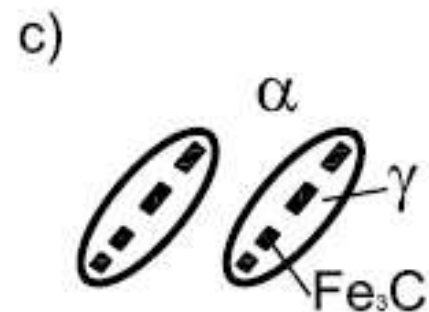
# Rastvaranje karbida



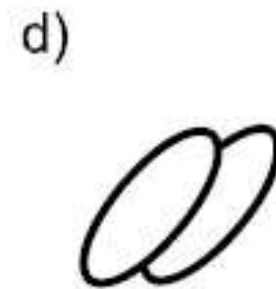
hladno stanje



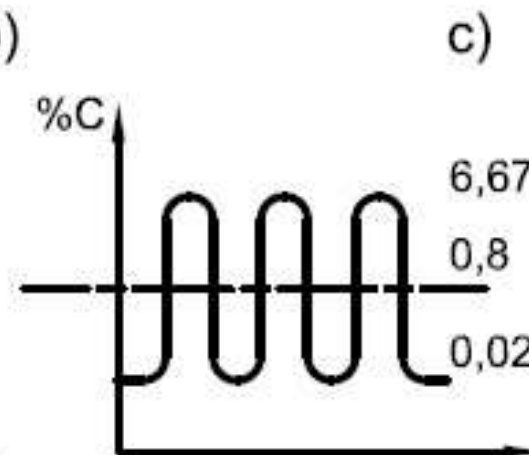
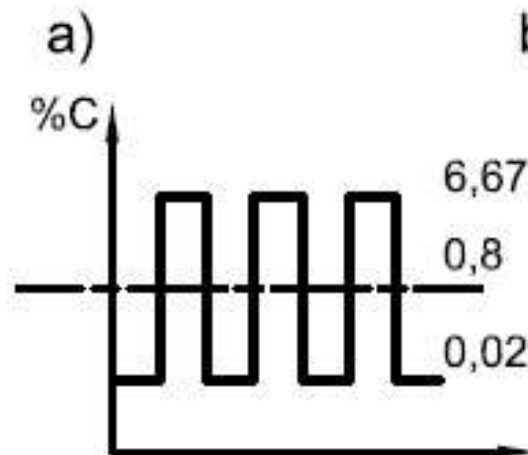
zagrejano stanje  
formiranje austenita ( $\gamma$ )



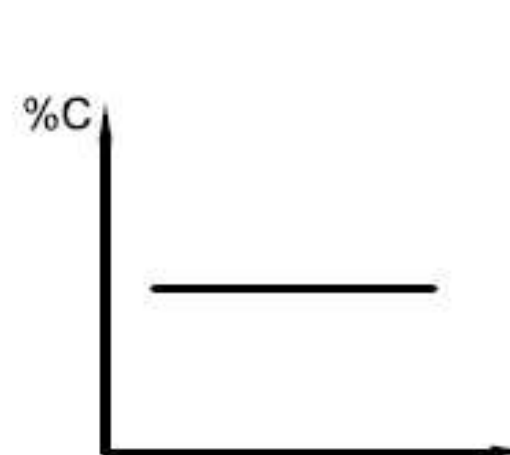
homogeni austenit bez  
tragov/ma  $\text{Fe}_3\text{C}$



homogeni austenit (0,8%C)  
bez tragovima  $\text{Fe}_3\text{C}$



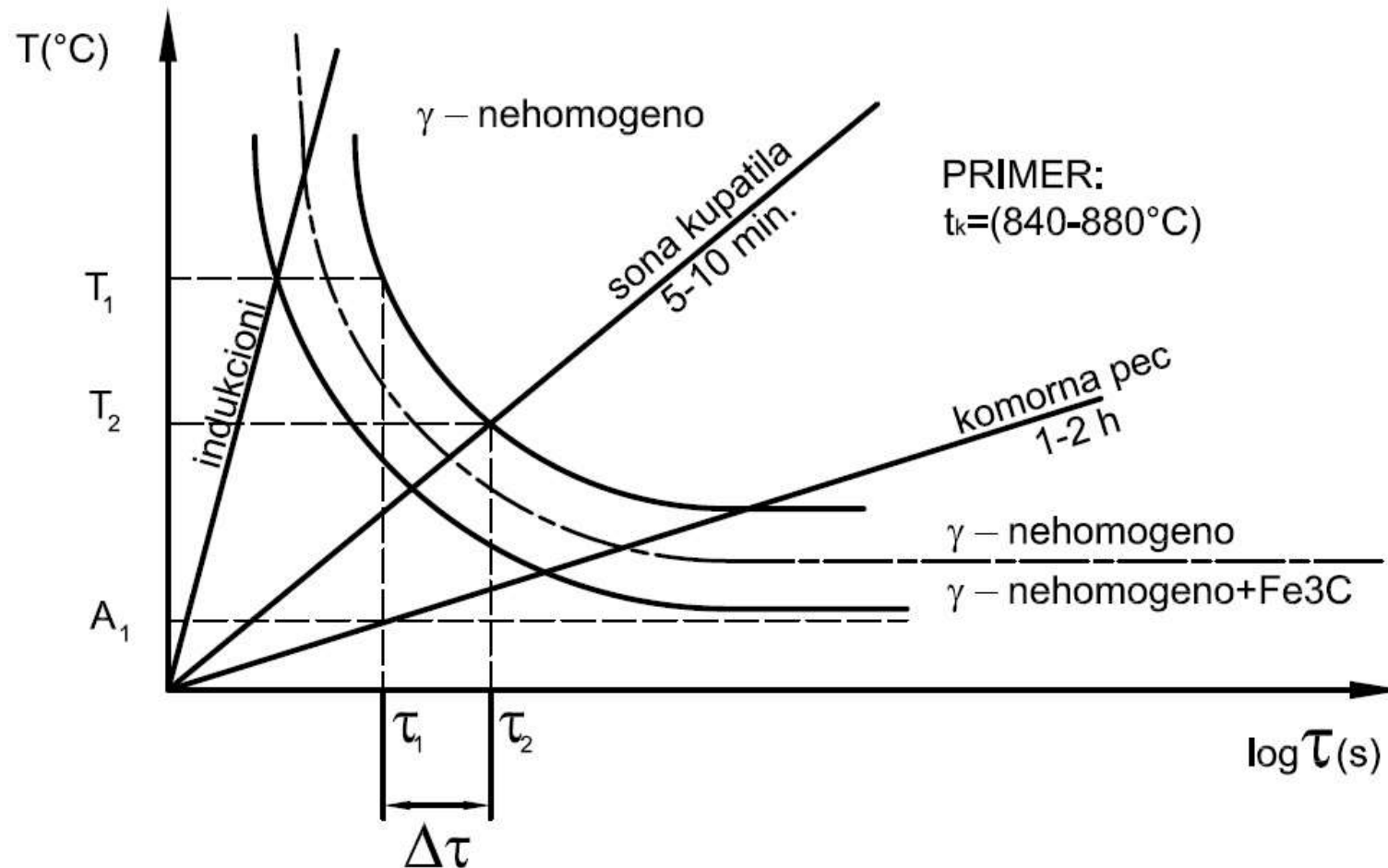
nehomogen



homogen

# Kinetika procesa

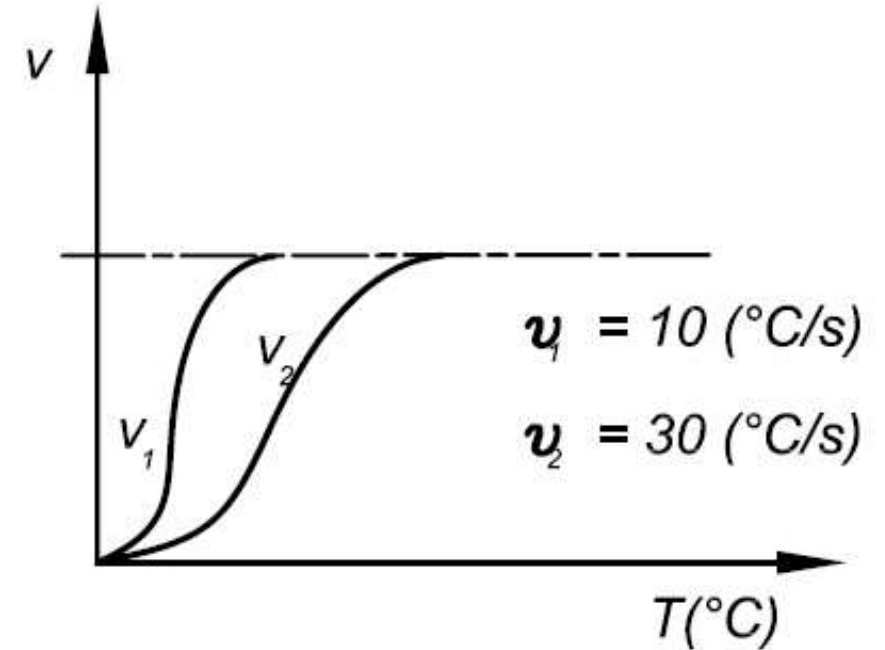
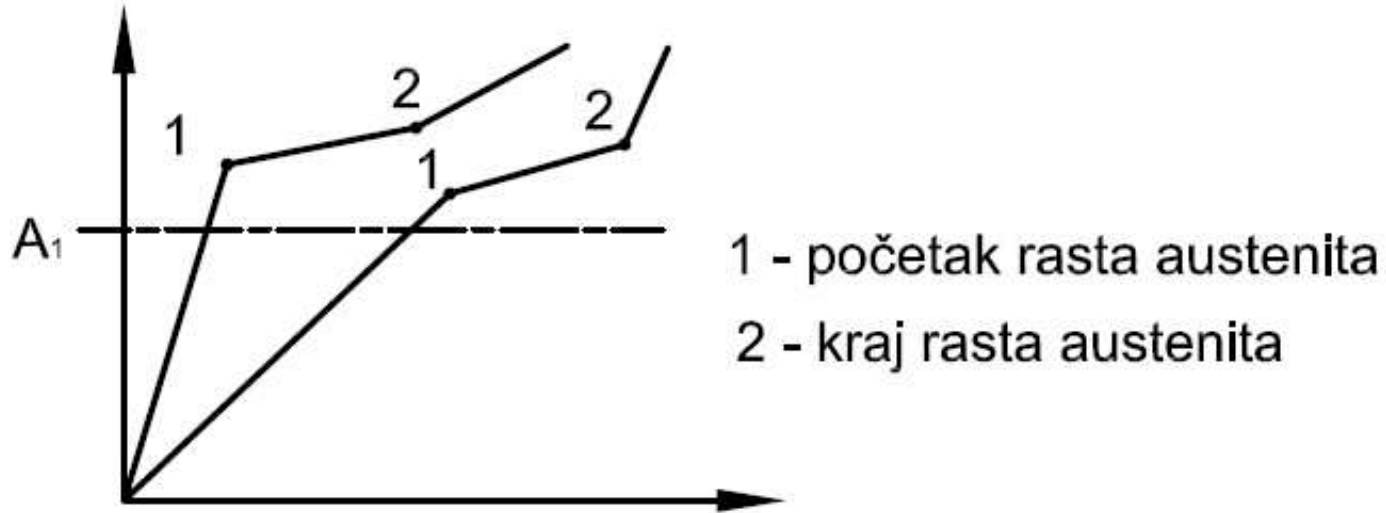
- Proces transformacije nije trenutan i može se pratiti merenjem %nog udela novo nastale austenitne faze preko TTT dijagrama.



# Temperatura kaljenja 840-880°C

- Indukciono kaljenje: 960 °C
- Sono kupatilo: 880 °C
- Komorna peć: 840 °C
- Brzina stvaranja klica sa povišenjem temperature sa 740 °C na 800 °C , povećava se za 280 puta, a brzina rasta zrna 82 puta.

# Brzina zagrevanja i transformacije

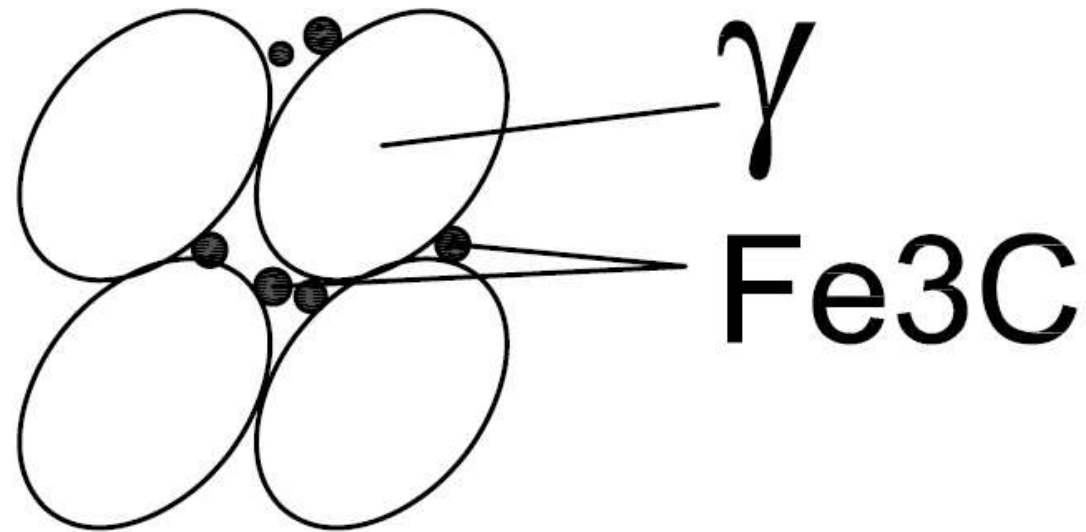


1-početak transformacije  
2-kraj transformacije

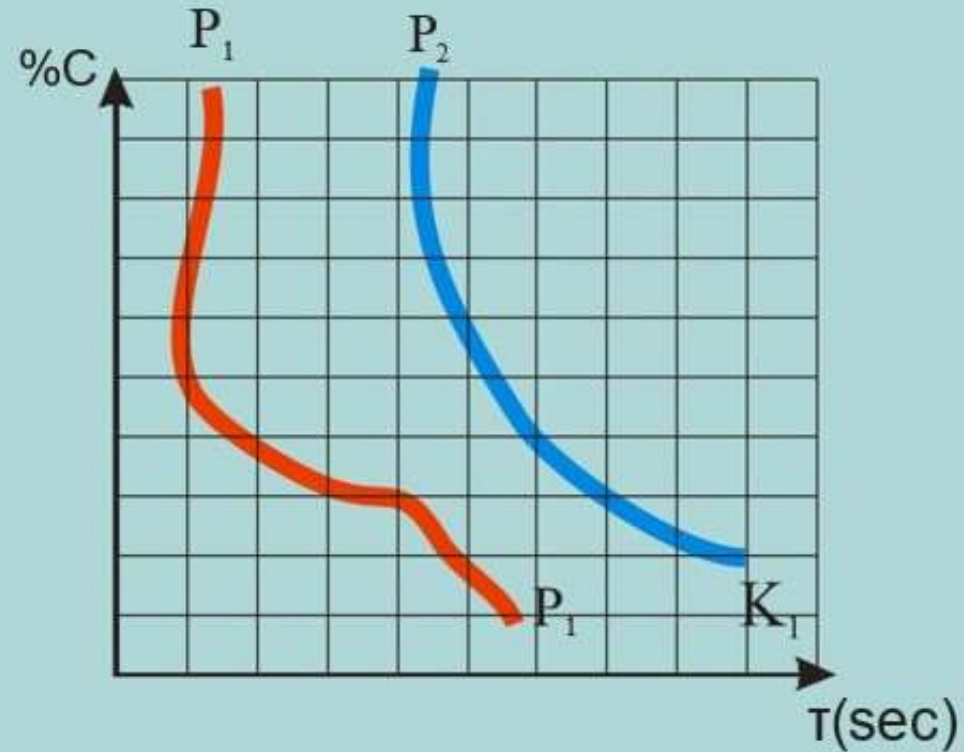
Za 100%transformacije, za  $10^{\circ}\text{C/sec}$  je  $790^{\circ}\text{C}$ , a za  $30^{\circ}\text{C/sec}$  je  $880^{\circ}\text{C}$ .

Nehomogeni austenit se dobija ako je niža temperatura, jer treba više vremena za homogenizaciju i takva struktura dovodi do nehomogenog martenzita, posle kaljenja.

Kod nadeutektoidnog čelika imamo  $P+Fe_3C$ , i njihovo rastvaranje zahteva još dužim proces, ali ne mora da dođe do potpunog rastvaranja cementita, ako se karbidi pravilno rasporede po granici zrna. Jedan deo P je homogenizovan a  $Fe_3C$  služi kao ojačavajuća faza.



# Uticaj hemijskog sastava



## SAVREMENA TEORIJA

- Difuzioni
- Bezdifuzioni procesi
- Legirajuće elemente imaju veliki značaj na parametre procesa

Co, Ni  $\uparrow$  V<sub>dif</sub> (povećava brzinu difuzije)

Cr, Mo, V, W smanjuje brzinu difuzije  $\downarrow$

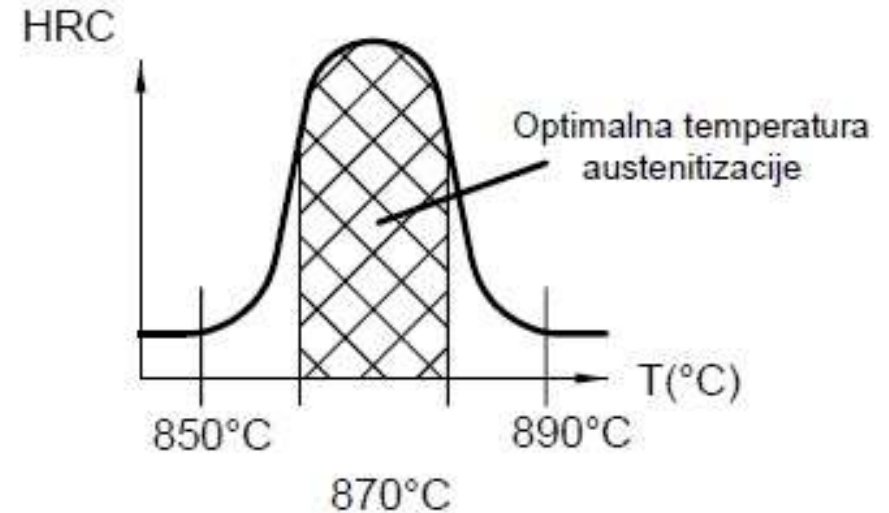
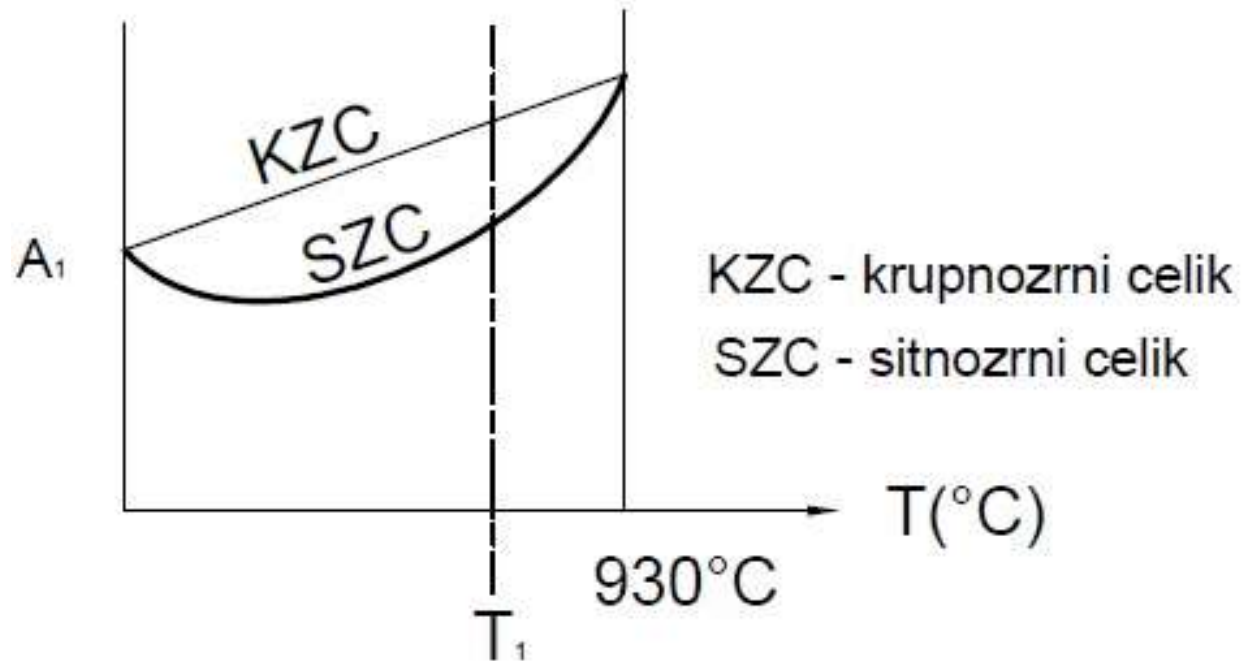
# Rast austenitnog zrna

- Veoma je značajan za rezultate termičke obrade.
- Po završetku transformacije – fino i sitno zrno.
- U toku dalje termičke obrade dolazi do difuzionog procesa, tako da dolazi do povećanja granice zrna i spajanja više zrna u jedno koje ima povećanu strukturnu savršenost. (manje grešaka i sferni oblik).
- Na određenoj temperaturi zrna dostižu određenu veličinu (ravnotežna zrna).

Mo, V, W, Ti, Ta-ometaju porast zrna

Druge faze i nečistoća koče rast zrna

Nasledno KZČ i nasledno SZČ. (dobijanje čelika)



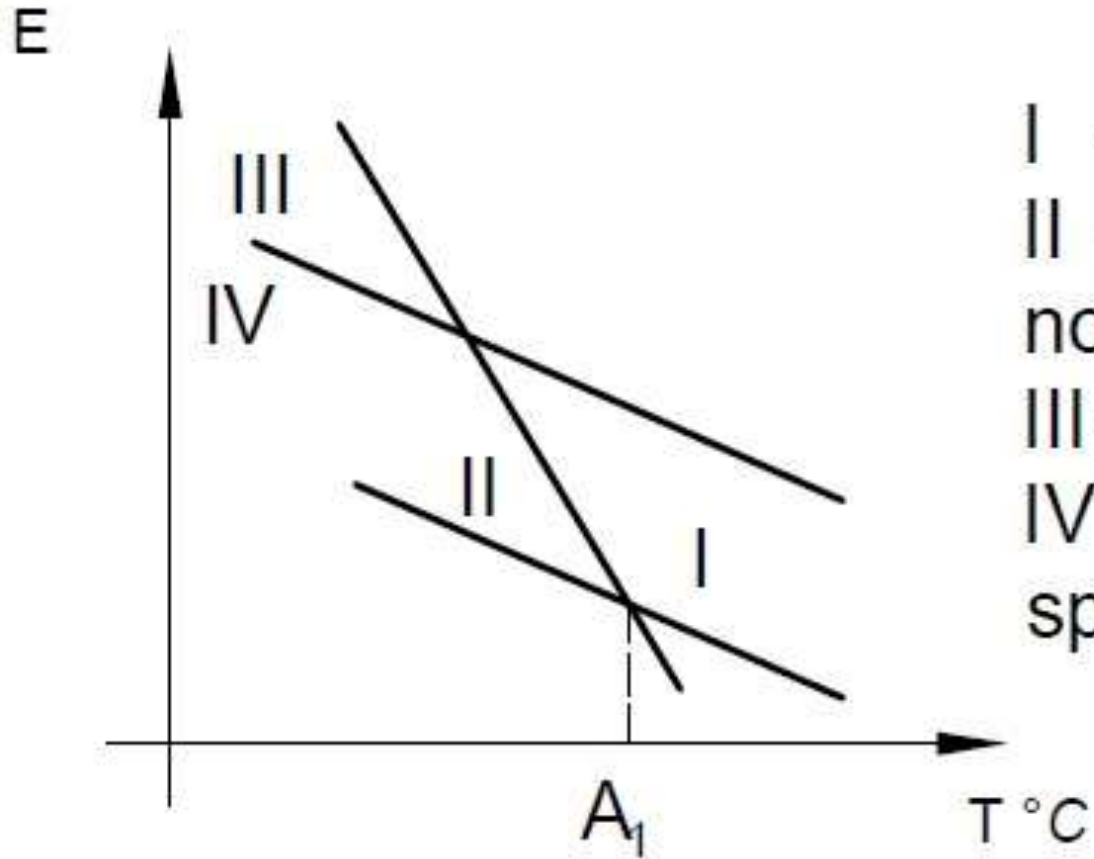
Određuje se na osnovu sledećih parametara:

ASTM – metoda

K=1 do 4 krupno zрно

K> 5 sitno zрно

# TRANSFORMACIJA AUSTENITA PRI HLAĐENJU



I - Zagrejano (austenitno) stanje

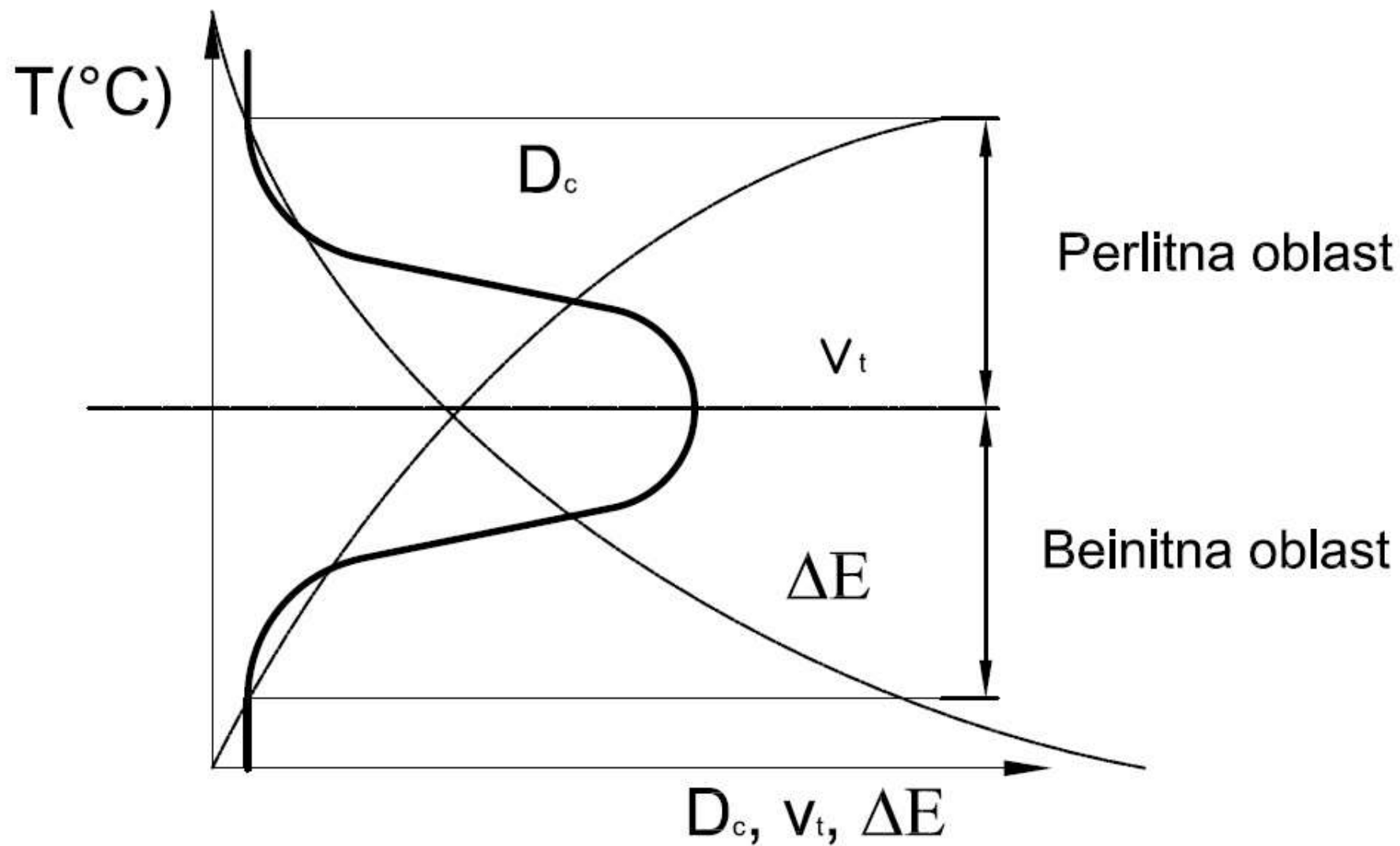
II - Hlađeno stanje, ako sporo hladimo, normalizovanje PERLIT

III - ako brzo hladimo MARTENZIT

IV - otpuštanje, kada martenzit hladimo sporo

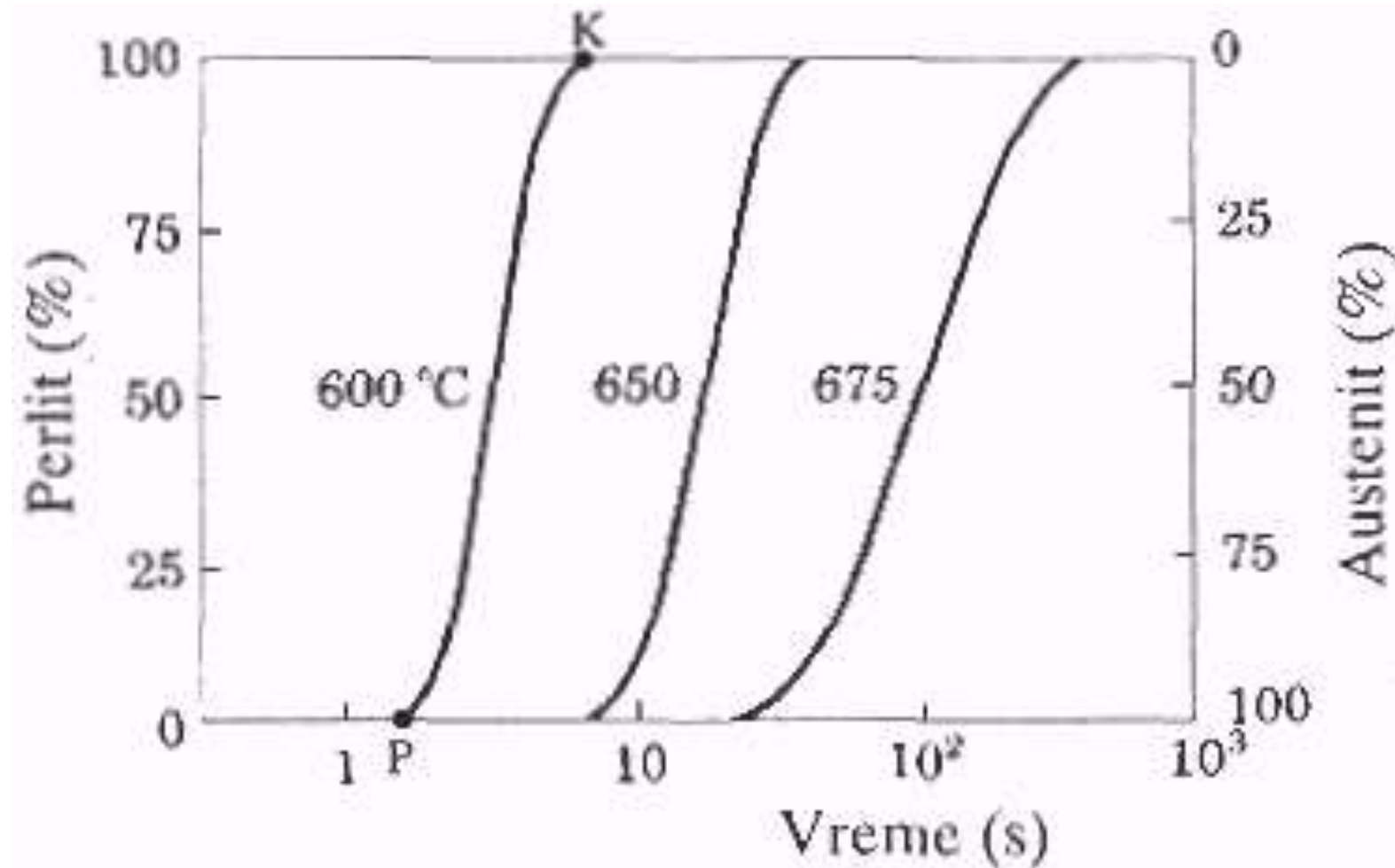
- Razlaganje austenita događa se samo na temperaturama nižim od  $727^{\circ}\text{C}$  (kritična tačka  $A_e$ ). Za opisivanje kinetike transformacije pothlađenog austenita koriste se eksperimentalno dobijeni dijagrami vreme–temperatura–stepen razlaganja, ili dijagrami izotermalne transformacije pothlađenog austenita, tj. razlaganja austenita pri konstantnoj temperaturi. U literaturi ovi dijagrami su poznati pod nazivom TTT (*time–temperature–transformation*).
- Pri transformaciji austenita hlađenjem, prisutna su dva mehanizma: difuzioni (do  $500^{\circ}\text{C}$  i bezdifuzioni (ispod  $500^{\circ}\text{C}$ ).

# Strukture nastale iznad i ispod 500°C

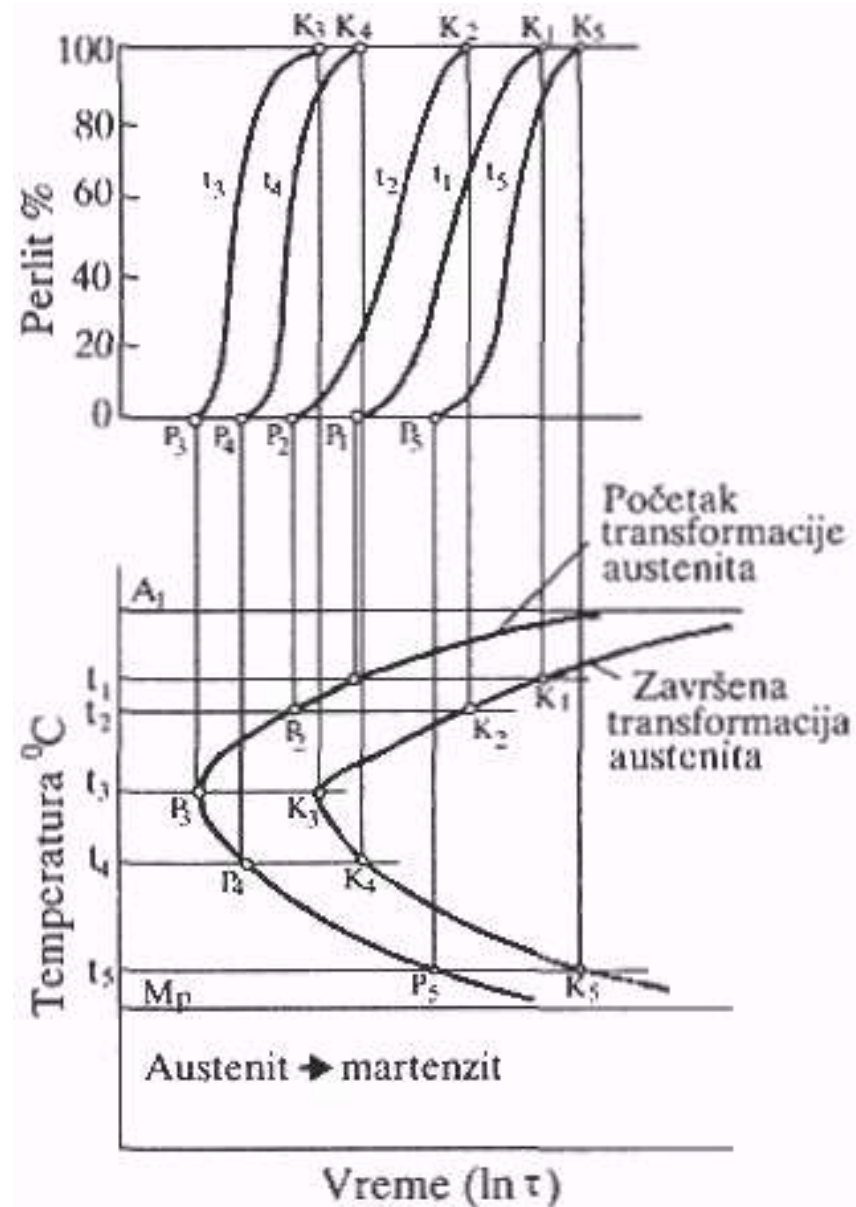


# Transformacija austenita u perlitnom i beinitnom području

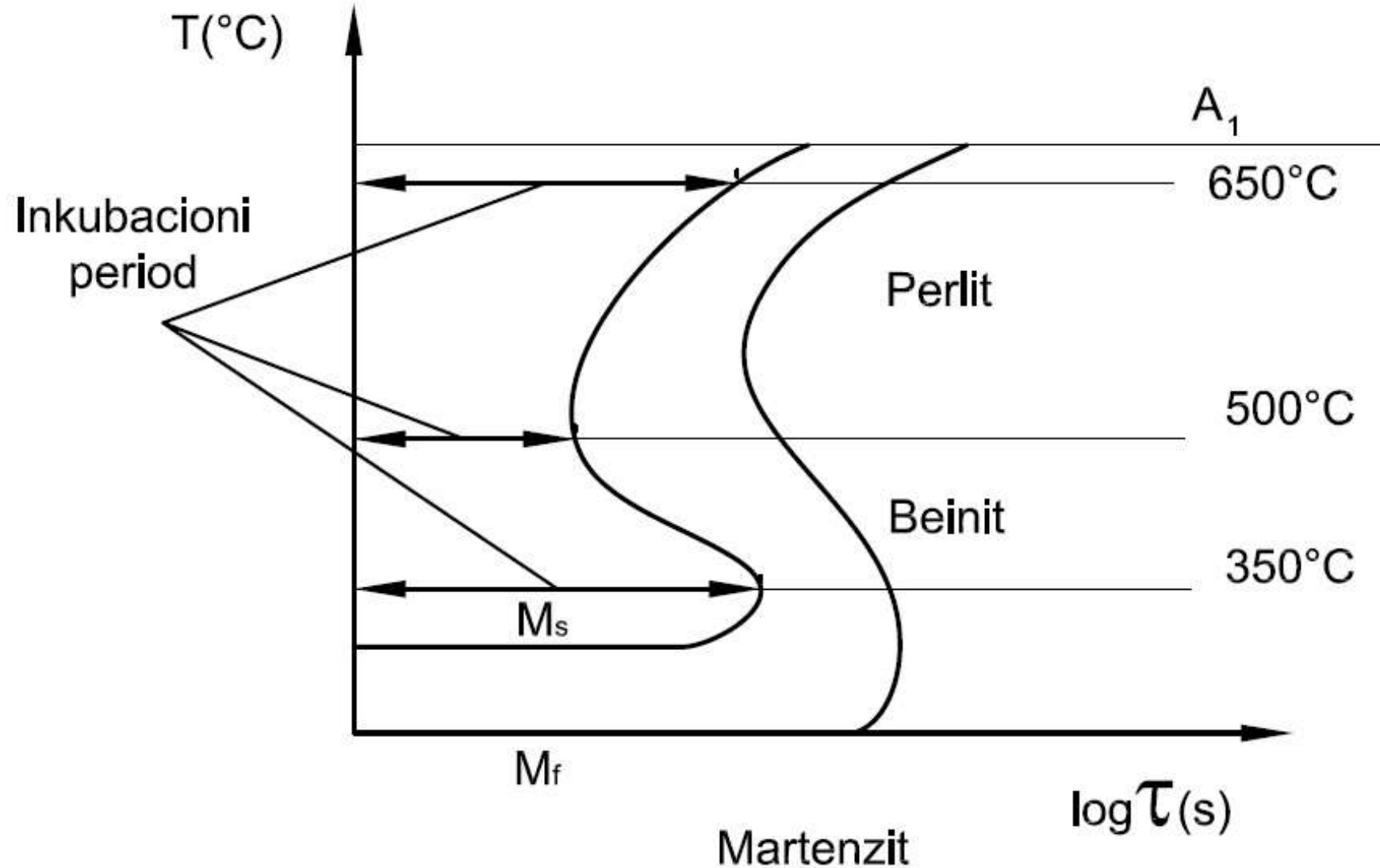
- Eksperimentalno dobijene krive izotermalne transformacije austenita u perlit



# Šema konstruisanja dijagrama izotermalne transformacije austenita eutektoidnog čelika



# Dijagram izotermalne transformacije austenita eutektoidnog čelika (0,8%C)

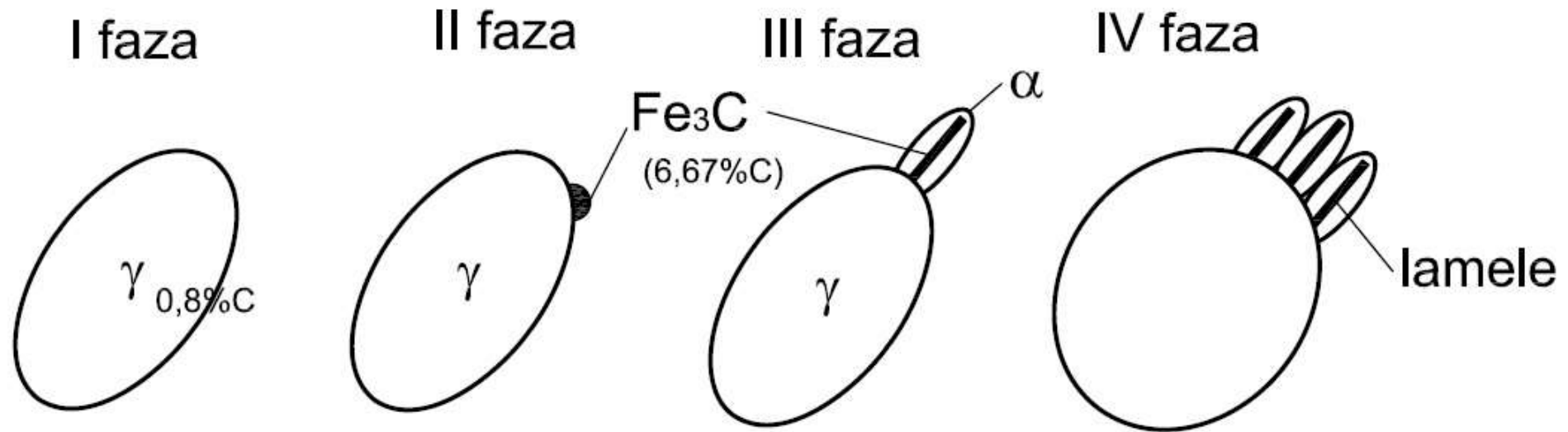


Inkubacioni period pre početka raspada strukture

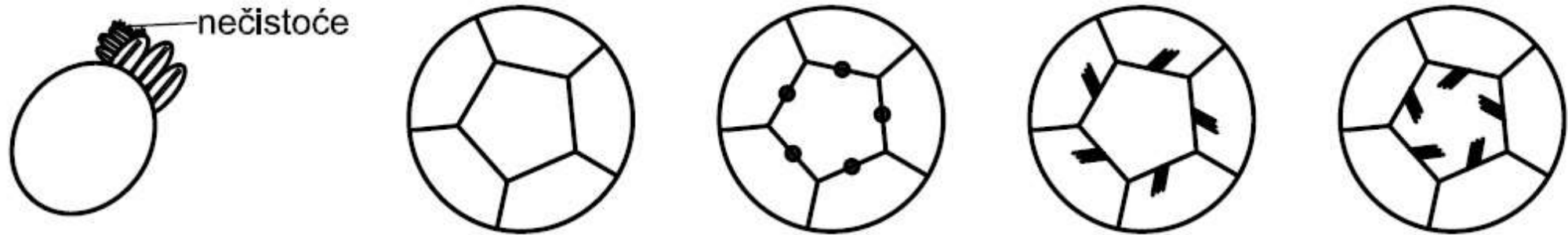
# Razlaganje austenita u perlitnom području

- Perlitna transformacija pothlađenog austenita obavlja se u temperaturnom intervalu od kritične tačke A1 do kolena krive ( $\sim 550^{\circ}\text{C}$ ) i ima kristalizirajući karakter, a započinje po difuzionom mehanizmu. Pre transformacije atomi ugljenika bivaju istisnuti iz rešetke  $\gamma\text{-Fe}$ . Istisnuti atomi ugljenika jedine se sa železom i obrazuju jedinjenje  $\text{Fe}_3\text{C}$ —cementit.
- Prvo formirana jezgra cementita izdvajaju se na granicama austenitnih zrna i služe kao centri kristalizacije. Rast jezgara cementita proizilazi na račun difuzije atoma ugljenika iz okolnog austenita. Delovi austenitnog zrna, koje okružuju obrazovane lamele cementita, kad dovoljno osiromaše ugljenikom transformišu se u ferit, tako se uporedo sa stvaranjem lamela cementita stvaraju i lamele ferita

# Šematski prikaz formiranja perlita iz austenita



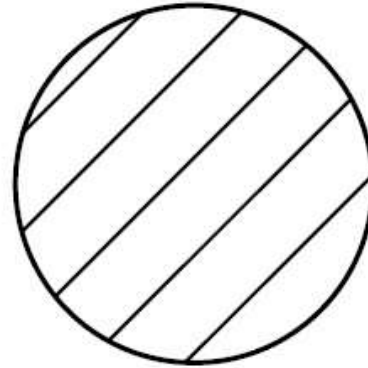
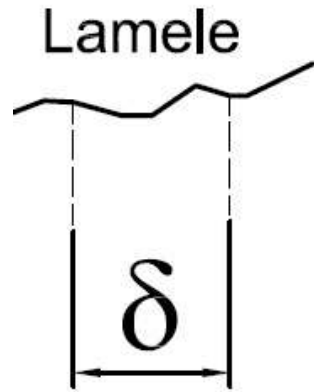
# Šematski prikaz faza formiranja perlitnih zrna u austenitnom zrnu



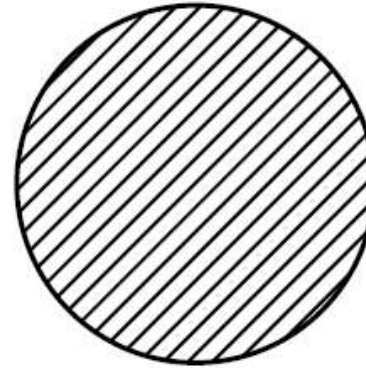
# Rastojanje između dve lamele

$$\delta = \frac{15}{\Delta t} 10^4 (\text{\AA})$$

Provera termičke obrade  
pod mikroskopom



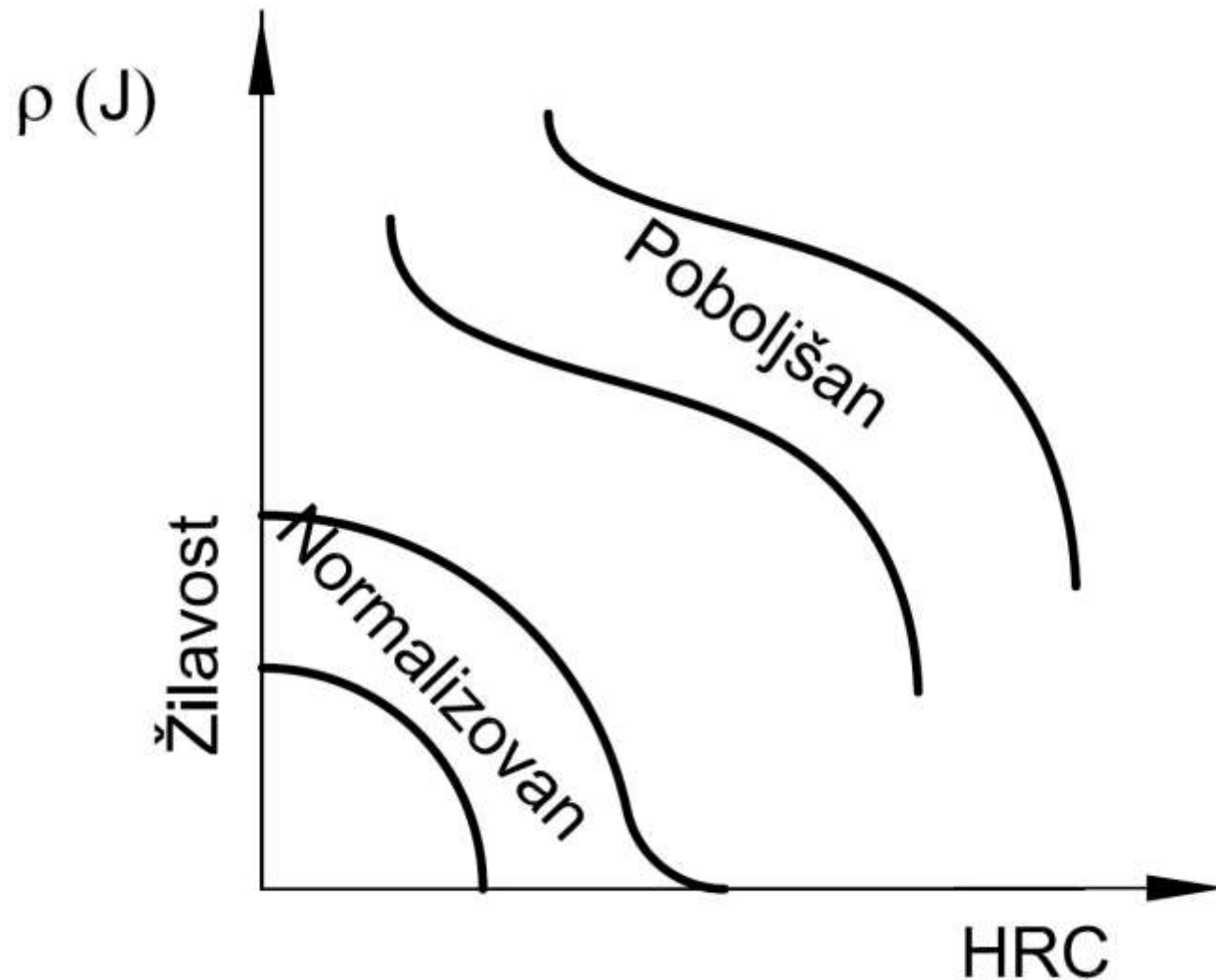
Mekan



Tvrđ

~700°C sa međulamelnim rastojanjem  $\delta = 0,6-1,0 \mu\text{m}$ , a ima tvrdoću HB = 180–250.  
~550°C,  $\delta = 0,1-0,15 \mu\text{m}$ . Ovako dobijena struktura naziva se trustit. Tvrdoća trustita je HB = 350–450.

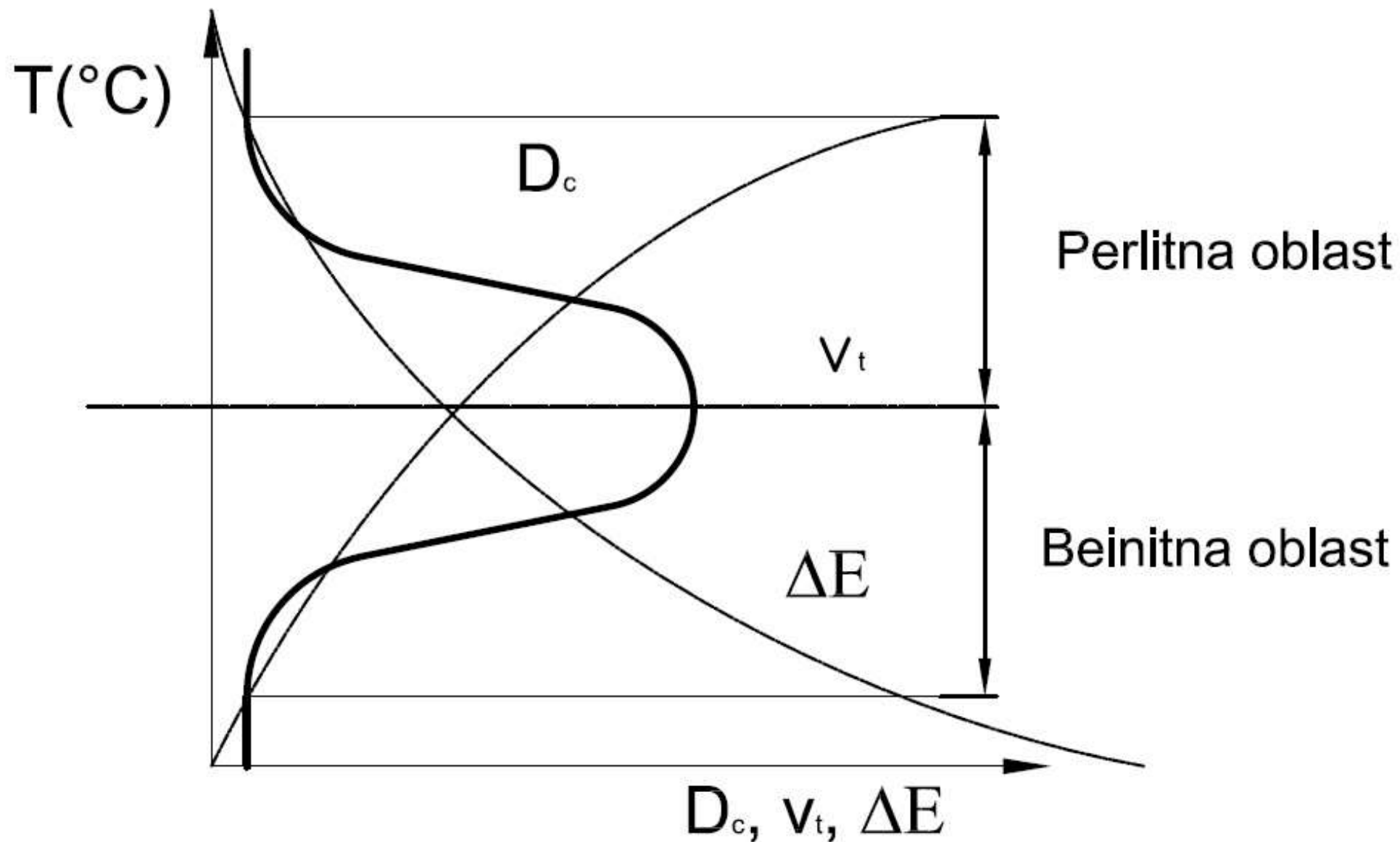
# Poređenje poboljšavanja i normalizacije



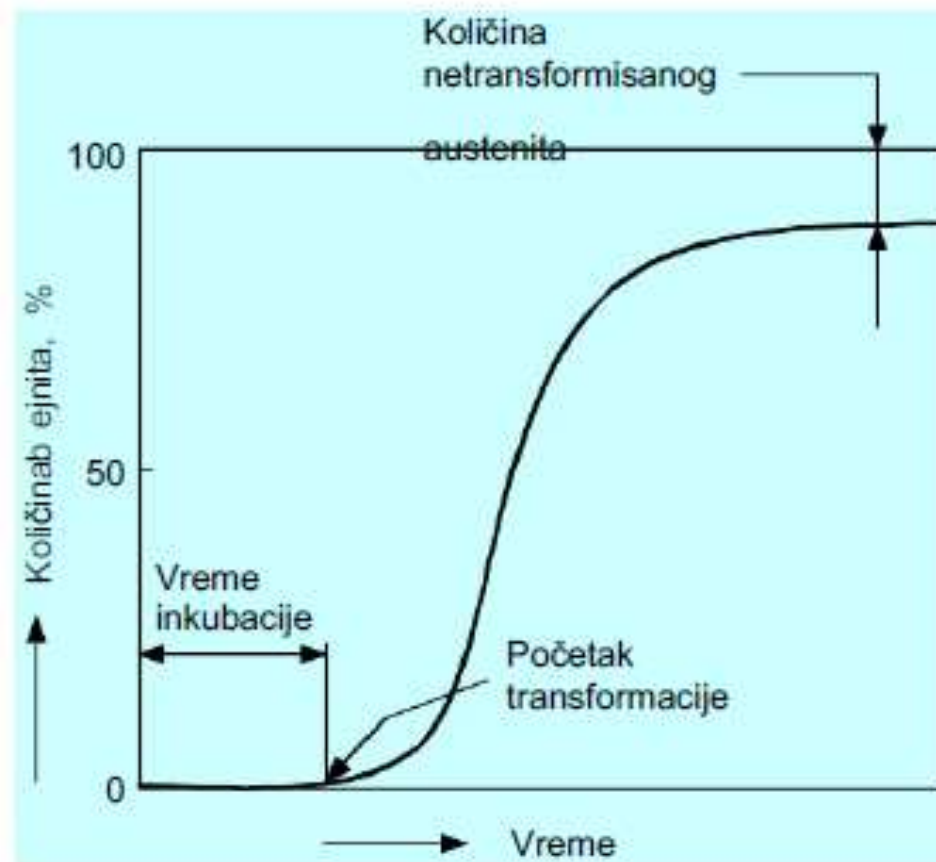
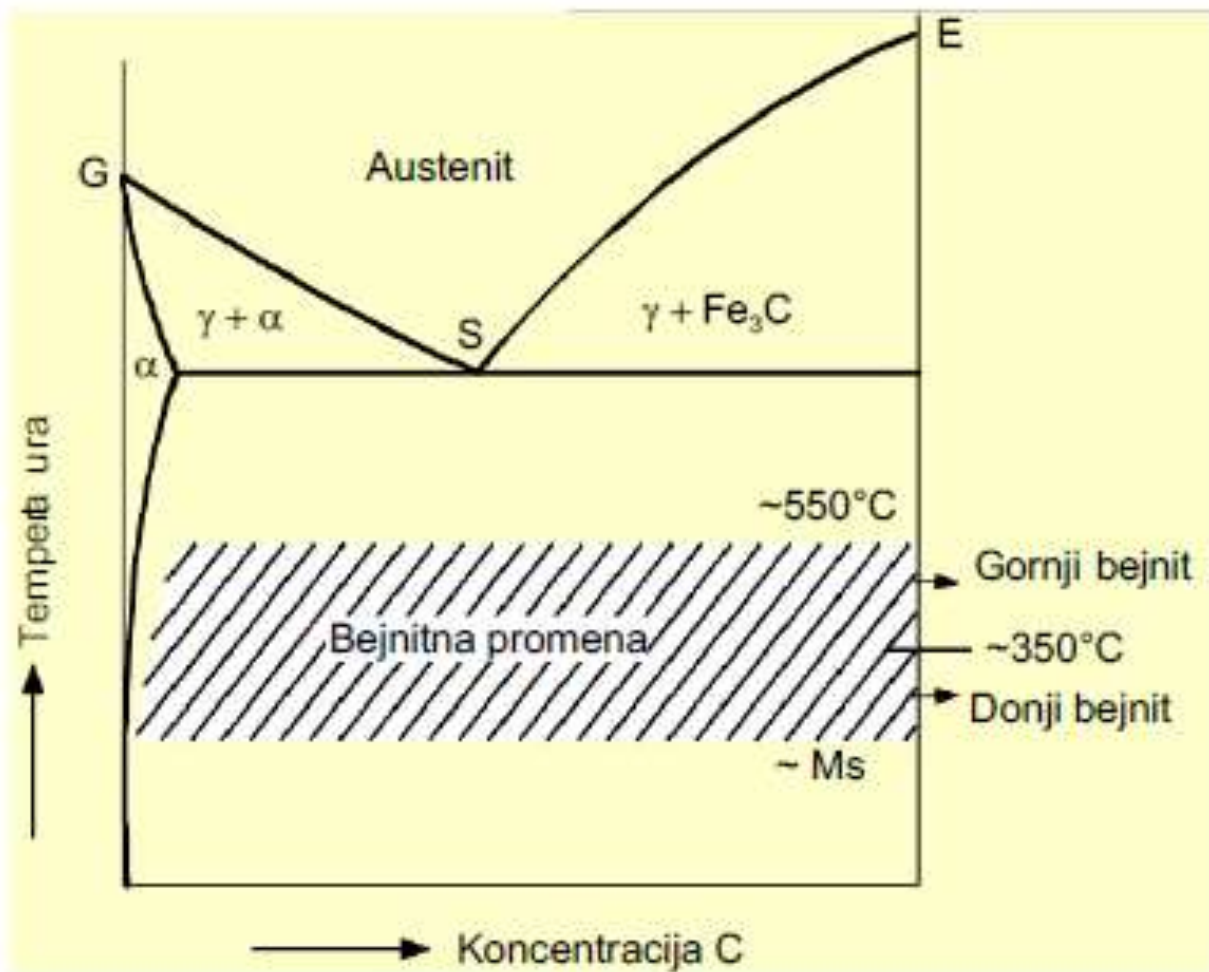
# Razlaganje austenita

- U zavisnosti od veličine i gustine pakovanja lamela ferita i cementita, u strukturi čelika eutektoidnog sastava, razlikuju se mikrostrukture: *perlit*, *sorbit* i *trustit* ili *grubi*, *fini* i *vrlo fini perlit*. Sve tri strukture obrazuju se pri razlaganju pothlađenog austenita difuzionim seljenjem atoma ugljenika pre transformacije austenita.

# Razlaganje austenita u beinitnom području



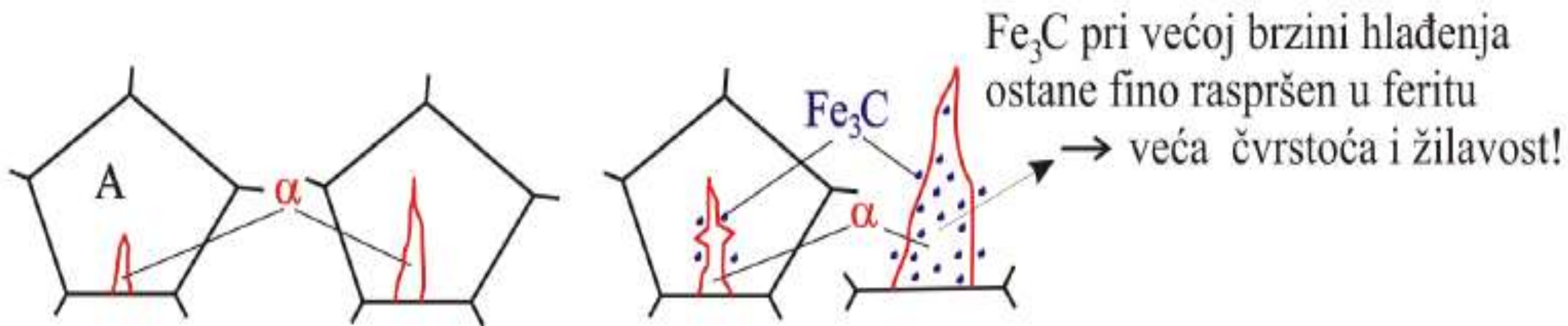
# Oblast i kinetička kriva beinitne transformacije



- Ako je brzina hlađenja pri kontinualnom hlađenju tako podešena da se transformacija obavlja u intervalu temperatura između 200 – 450 °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 nastaje, isto kao i kod perlitne transformacije, ferit i cementit. Zbog bržeg hlađenja i niže temperature, transformacija ferita sadrži viši procenat ugljenika. Isto tako ima razlike i u karbidnoj fazi. Beinitna struktura se razlikuje od perlitne koja je nastala na višim temperaturama transformacije.

- Beinit se takođe sastoji od cementita  $\text{Fe}_3\text{C}$  i ferita. Beinit se sastoji od gornjeg i donjeg beinita. Donji beinit ima veću tvrdoću 65 HRC, dok gornji ima 45 HRC. Kod formiranja beinita prisutne su i difuzioni i bezdifuzioni procesi. Bezdifuzioni procesi su karakteristika za feritnu transformaciju, dok su difuzioni karakteristike za formiranje cementita.
- Gornji beinit nastaje na povišenim temperaturama, karbidi su smešteni između feritnih pločica. Tako izlučeni karbidi smanjuju mehaničke osobine čelika, naročito žilavost.
- Donji beinit je igličastog oblika, ugljenik nema dovoljno energije da difunduje po granici zrna. Mehaničke osobine su bolje.

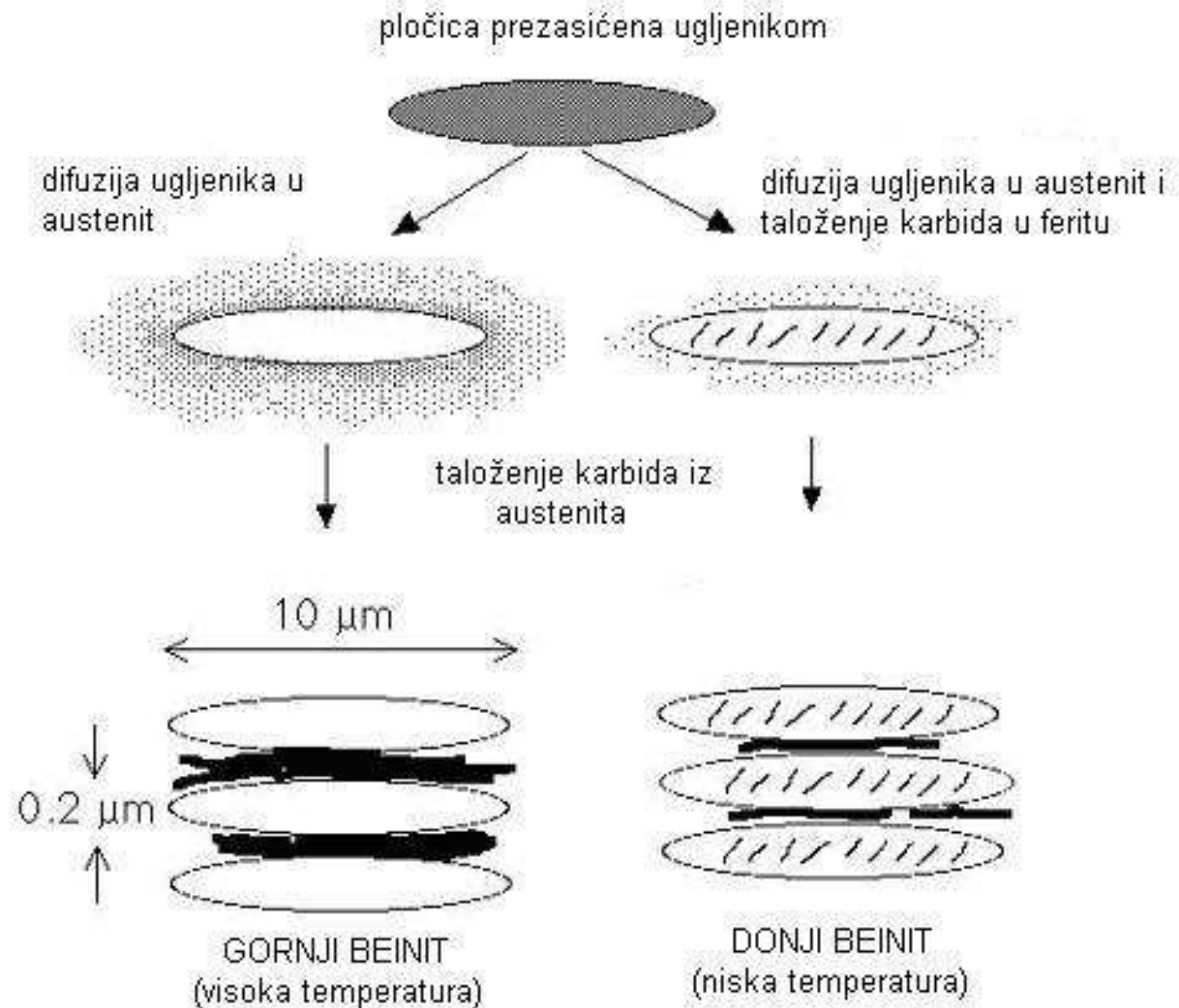
# Razvijanje faze beinita



- Beinitna transformacija počinje sa difuzionim pregrupisavanjem—preraspodelom atoma ugljenika u pothlađenom austenitu, obrazujući zone austenita sa obogaćenim i osiromašenim sadržajem ugljenika. U zonama sa osiromašenim austenitom, čije se temperature početka martenzitne transformacije,  $M_p$ , nalaze u oblasti temperature međufazne transformacije,  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformiše se po mehanizmu martenzitne transformacije. Ovako obrazovani niskougljenični martenzit je nestabilan i odmah, na temperaturi međufazne oblasti, obrazuje beinitnu strukturu. Iz austenita obogaćenog ugljenikom, u procesu izotermalnog razlaganja, izdvajaju se čestice cementita ( $Fe_3C$ ), što dovodi do osiromašavanja austenita ugljenikom i njegove dalje transformacije sve do obrazovanja beinitne strukture.
- Međufazna transformacija austenita, kao i martenzitna transformacija, ne obavlja se u potpunosti, pa se u strukturi čelika pored beinita nalazi i izvesna količina zaostalog austenita.

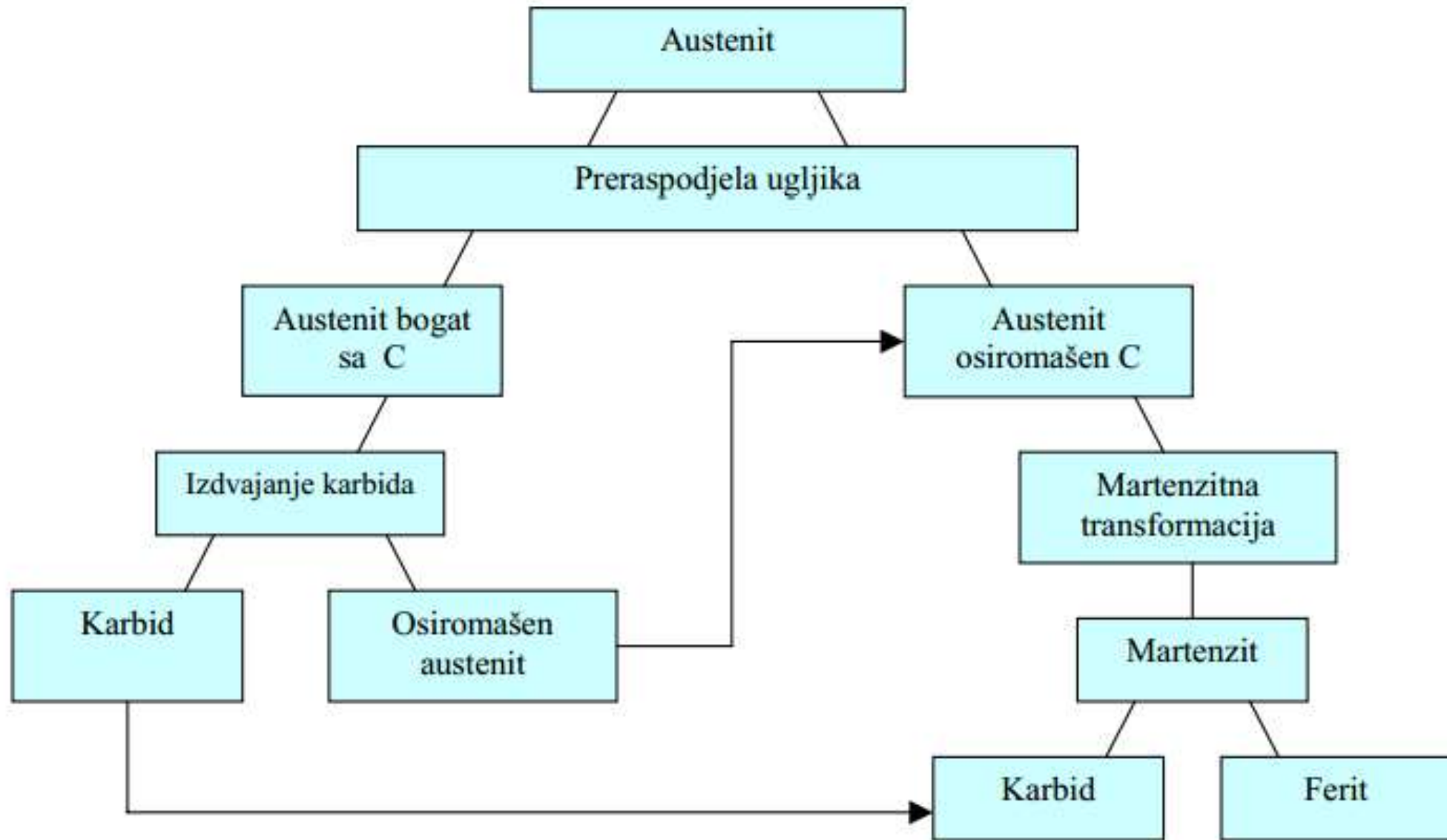
- Gornji beinit smanjuje plastičnost čelika, u poređenju sa strukturama dobijenim perlitnom transformacijom (sorbit, trustit). Smanjenje plastičnosti gornjeg beinita u direktnoj je vezi sa izdvajanjem relativno grubog cementita na granicama feritnih zrna. Tvrdća i čvrstoća se ili ne menjaju ili se njihove vrednosti nešto malo smanjuju.
- Donji beinit u strukturi čelika obezbeđuje dobra mehanička svojstva. U poređenju sa strukturama perlitne transformacije (sorbit, trustit), donji beinit ima visoku vrednost tvrdoće (HB = 500–550) i čvrstoće uz dobru plastičnost i žilavost. Ovo se objašnjava povećanim sadržajem ugljenika i velikom gustinom dislokacija u beinitnoj  $\alpha$ -fazi (feritu) i obrazovanjem disperznog cementita raspoređenog u kristalima  $\alpha$ -faze (feritu).
- Mehanizam obrazovanja gornjeg i donjeg beinita u principu je isti, samo što je struktura gornjeg beinita nešto grublja u odnosu na donji beinit koji je vrlo fine strukture.

# Transformacije austenita u gornji i donji beinit



- Temperatura stvaranja gornjeg beinita: 350-400 °C, ferit je u obliku pločica a kristali Fe<sub>3</sub>C su između, na granicama pločica, pa čak i unutar ferita. Može biti zrnast ili stubast. (Tvrdoća je 45 HRC)
- Od 350-240 °C (Ms), kristali ferita dobijaju oblik iglica a kristali Fe<sub>3</sub>C se nalaze u iglicama α. Struktura slična martenzitnoj, po obliku i tvrdoći (Tvrdoća je 55 HRC).
- Beinit je smeša ferita i cementita, ferita koji je bezdifuziono nastao i karbida koji su nastali kao posledica difuzionih procesa.
- Ferit u beinitu nema koncentraciju koja odgovara ravnotežnoj koncentraciji.

# Šematski prikaz beinitne transformacije



# Kinetika procesa

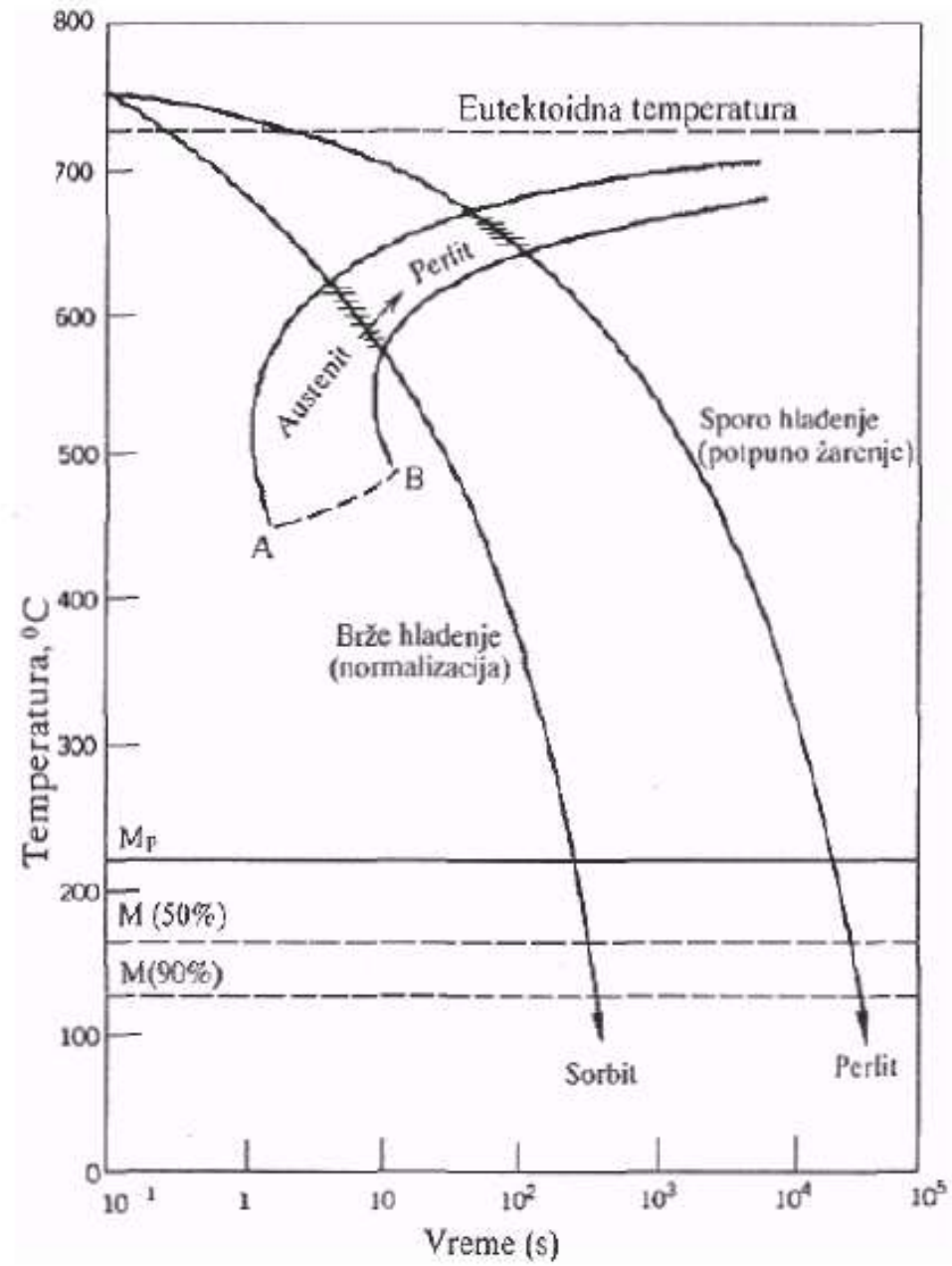
- Kontroliše jedan inkubacioni period koji je sve duži, što je pothlađenje veće. Pri tome transformacija nikada nije potpuna, uvek ostaje jedan deo austenita. Potpunost transformacije zavisi od vrste čelika, temp. transformacije i vremena difuzije.
- Veličina austenitnog zrna, a sa time i temp. austenizacije, deluje na beinitnu transformaciju suprotno u odnosu na perlitnu.
- Kod ugljeničnih čelika oblast beinita i perlita se jasno razlikuju ali postoji interval preklapanja u kojem su obe transformacije jednako moguće.
- Kod legiranih čelika zbog smanjenja difuzije ova dva područja su potpuno odvojena, a kod nekih čelika perlitna transformacija nije čak ni moguća.

- Oblast levo od krive početka transformacije austenita odnosi se na inkubacioni period. Duži inkubacioni period karakteriše stabilnost pothlađenog austenita na datoj temperaturi. Sa povećanjem temperature pothlađivanja stabilnost austenita brzo opada, dostiže minimum, a dalje sa smanjivanjem temperature ponovo raste. Na temperaturi odmah posle kritične tačke  $A_1$  i temperature nešto iznad početka martenzitne transformacije  $M_p$ , austenit je veoma stabilan.

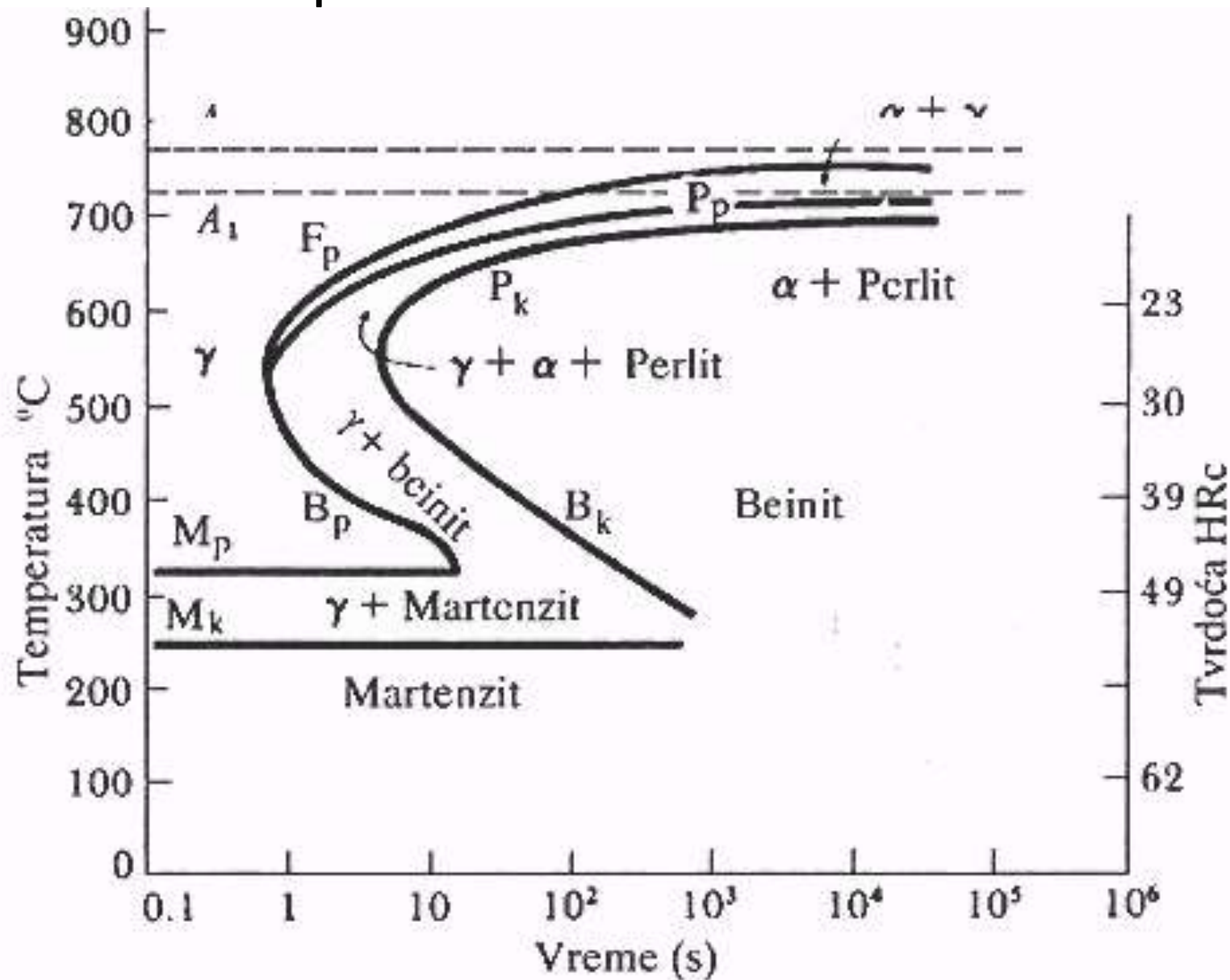
# Kontinualno hlađenje

- Savremeni postupci termičke obrade čelika uglavnom se baziraju na kontinualnom hlađenju delova sa temperature na kojoj je austenit stabilan,  $A_1$ , do sobne temperature. Dijagrami izotermalne transformacije austenita važe samo za hlađenje u uslovima konstantnih temperatura, a oni se moraju modificirati ako se transformacije dešavaju na temperaturama koje se stalno menjaju. Pri kontinuiranom hlađenju potrebno je nešto duže vreme za početak i kraj transformacije austenita. Zbog ovoga su krive izotermalne transformacije austenita pomerene više udesno (duži inkubacioni period) i ka nižim temperaturama,
- Hlađenje brzinama većim od kritične dobija se potpuno martenzitna struktura; hlađenje brzinama manjim od kritične u određenom opsegu brzina dobija se struktura perlita i martenzita; i konačno pri malim brzinama hlađenja dobija se potpuno perlitna struktura.

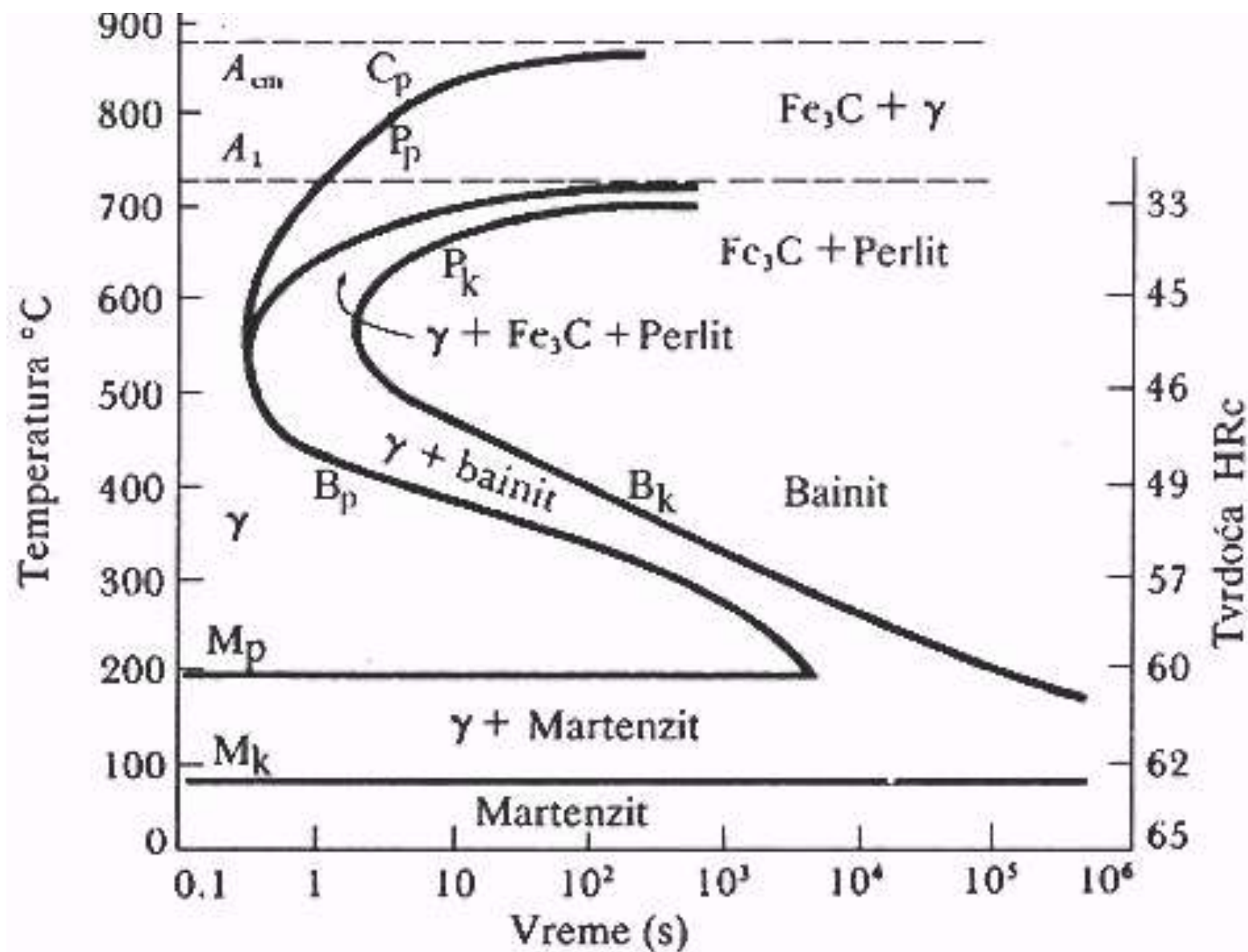
# Kontinualno hlađenje



# Dijagram izotermalnog razlaganja austenita ili TTT–dijagram za podeutektoidni čelik



Dijagram izotermalnog razlaganja austenita ili TTT–dijagram za nadeutektoidni čelik

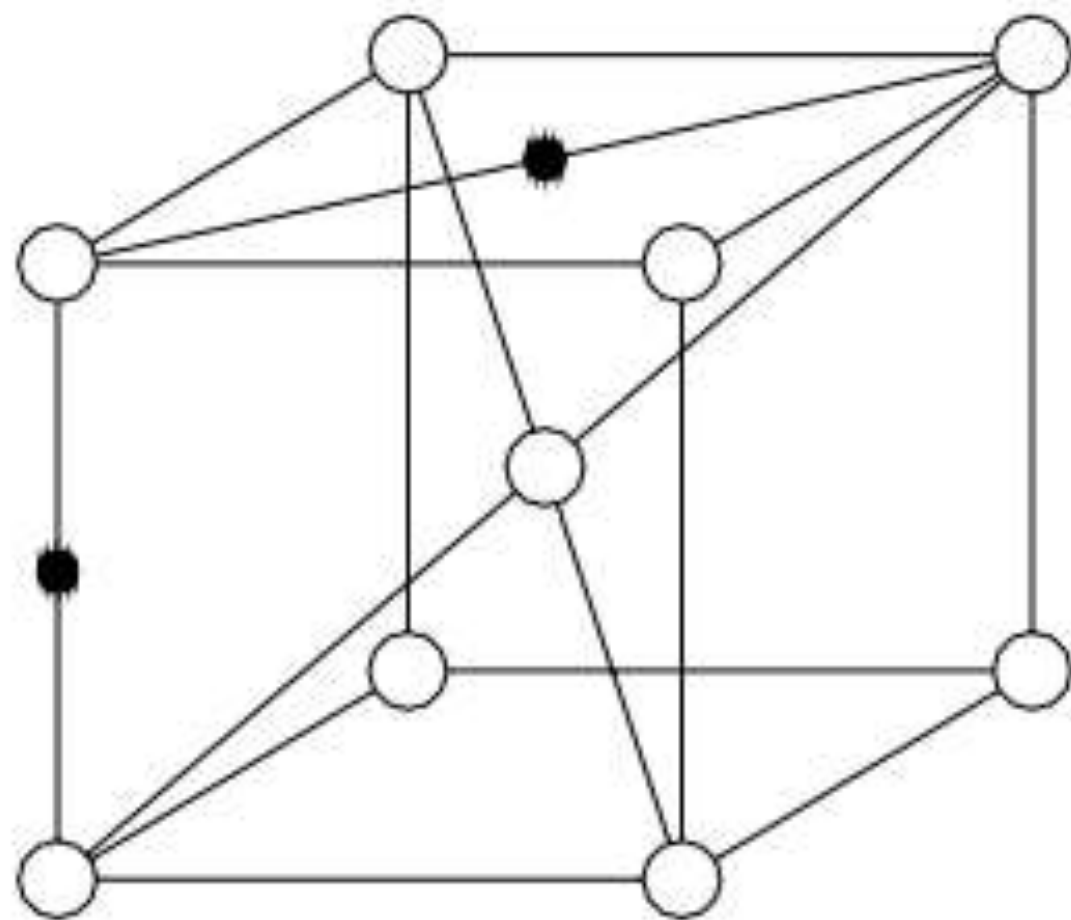


# Sorbit, Trustit

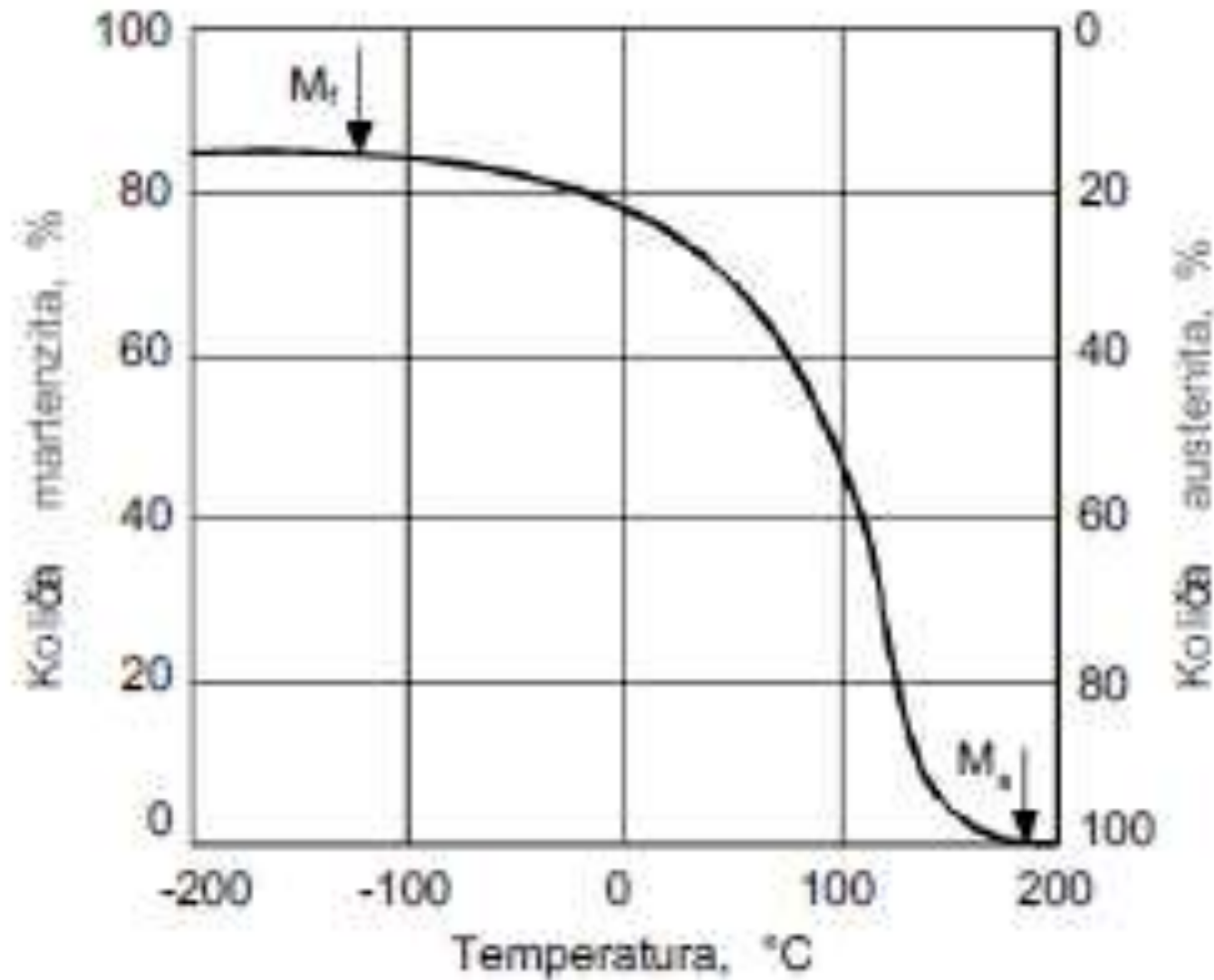
- Sorbit se dobija pri brzini hladjenja 50 do 70 °C/s, pri kojoj nije završena treća faza transformacije austenita. Lamelle cementita i ferita su krupnije nego kod ostalih struktura. Tvrdća sorbita je 300HB.
- Trustit se dobija pri brzini hladjenja 80 do 100 °C/s, pri kojoj se završava druga faza transformacije austenita a treća ostaje započeta. Lamelle ferita i cementita su vrlo tanke. Trustit je tvrdi od sorbita, 400HB, a mekši od beinita, odnosno martenzita.

# Martenzitna transformacija

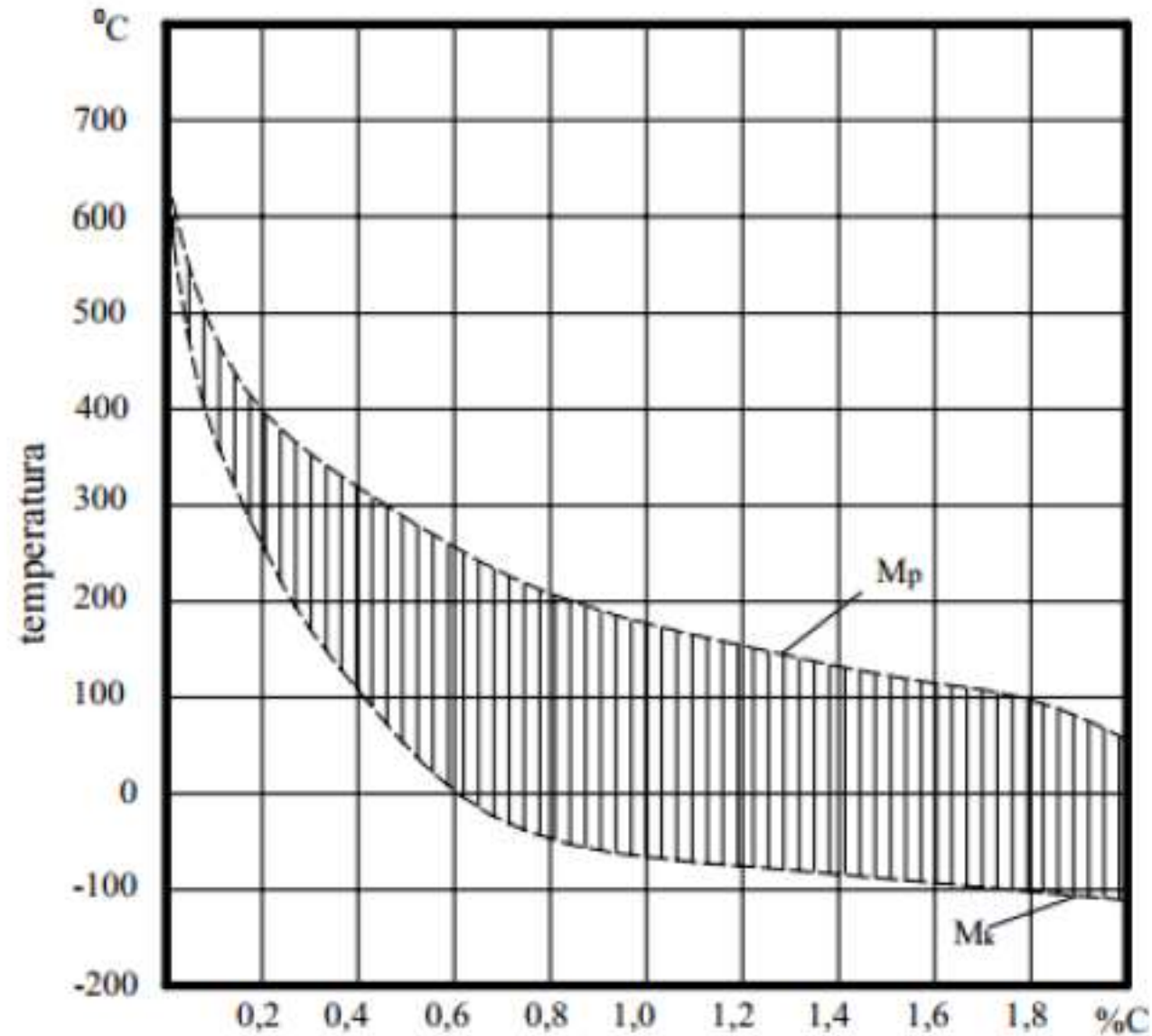
- Ako se hlađenje austenita obavi dovoljno velikom brzinom, ili na dovoljno niskoj temperaturi, procesom transformacije austenita nastaje martenzit. Proces nastajanja martenzita nije još do danas potpuno objašnjen, sigurno je samo to da je to proces transformacije bez difuzije. Prinudni rastvor ugljenika u  $\alpha$  željezo na sobnoj temperaturi izaziva deformisanje rešetke martenzita tako da je ova prostorno centrirana tetragonalna rešetka umesto kubne koja je karakteristična za  $\alpha$  željezo.



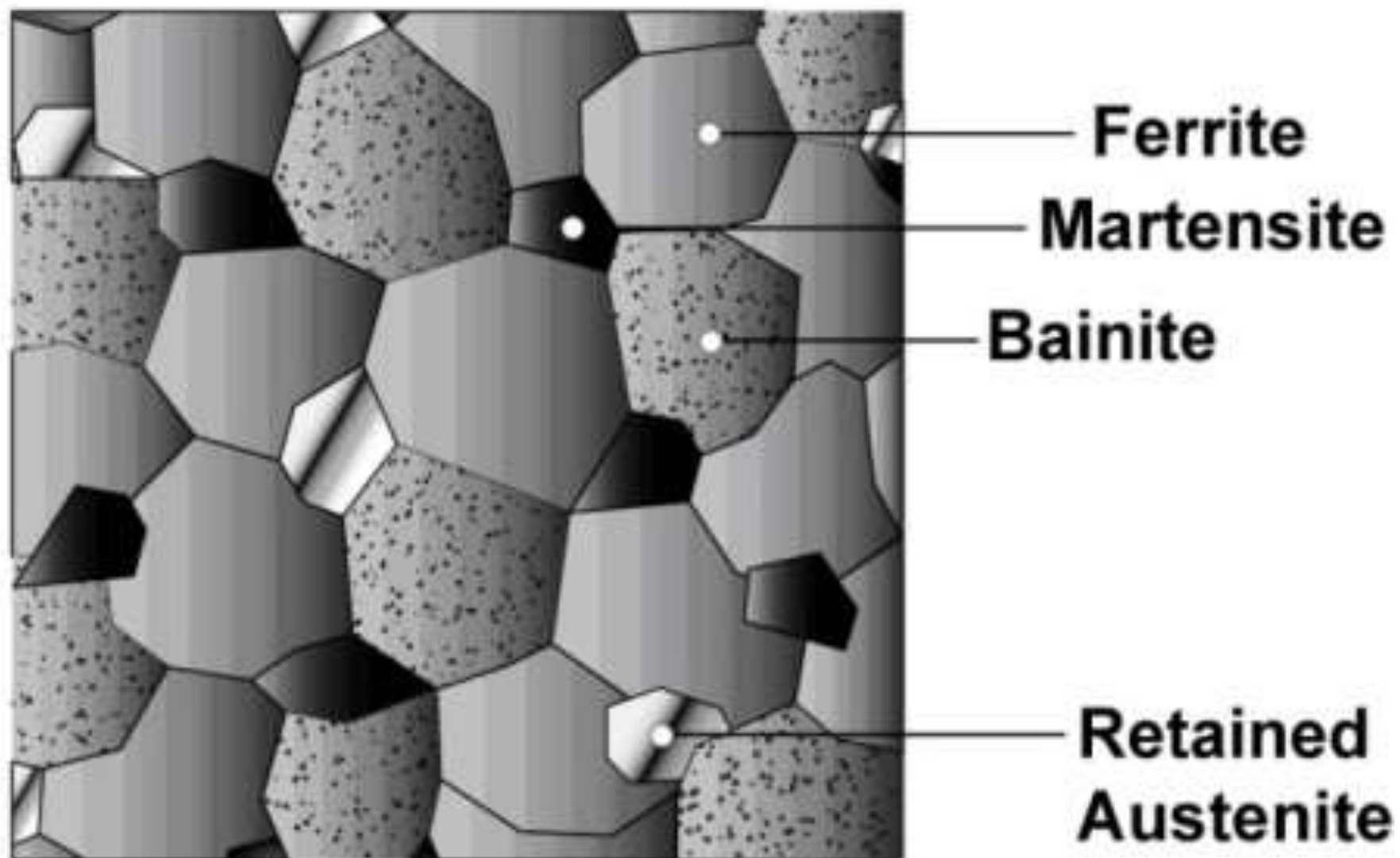
# Kinetička kriva promene austenita u martenzit



# Temperatura početka i kraja martenzitne transformacije



# TRIP



# **ALATNI ČELICI**

# ALATI ZA OBRADU ODVAJANJEM ČESTICA



# Alati



Alatnim čelicima nazivaju se ugljeni i legirani čelici, koji imaju visoku tvrdoću i otpornost prema habanju, a upotrebljavaju se za izradu različitog alata za obradu metala i drugih materijala. Moraju da imaju i druga važna svojstva, kao što su:

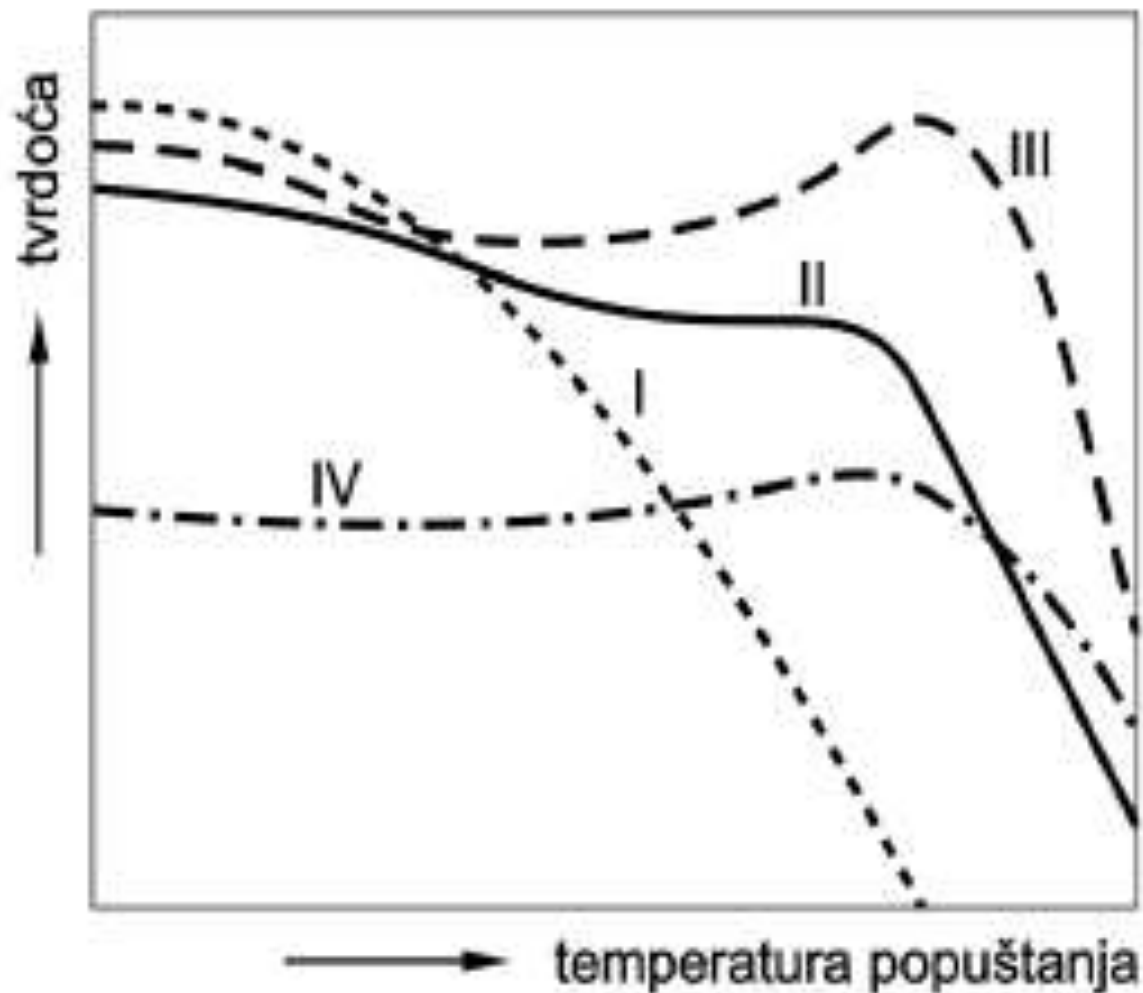
- dobra toplotna stabilnost, da ne bi došlo do promene strukture i mehaničkih svojstava pri zagrevanju alata u toku procesa rada;
- otpornost prema razugljeničenju površinskog sloja i oksidaciji, jer ove pojave smanjuju čvrstoću, tvrdoću i otpornost prema habanju;
- odgovarajuća toplotna provodljivost, da bi se sprečilo pregrevanje, a time i smanjenje tvrdoće u površinskom sloju, što je naročito važno kod alata za obradu deformacijom u toplom stanju;
- mali koeficijent linearnog širenja na temperaturama kojima je alat izložen u toku rada, tj. dimenziona postojanost;
- dobra obrada brušenjem, što je naročito važno pri izradi alata za merne instrumente.

- Razvoj modernih industrijskih alata:
  - 1898 g. TAYLOR-WHITE-ov brzorezni čelik (1,85% C, 3,8% Cr, 8% W),
  - 1904 g. J. A. MATHEWS - brzorezni čelik s vanadijem,
  - 1910 g. razvoj wolframovih čelika za topli rad,
  - 1912 g. dodatak kobalta u alatne čelike,
  - 1930 g. započinje razvoj brzoreznih čelika legiranih molibden

# ALATNI ČELICI

- Ugljenični alatni čelici
- Legirani alatni čelici
- Brzorezni čelici
- Ostali materijali za alate

# Dijagram otpuštanja



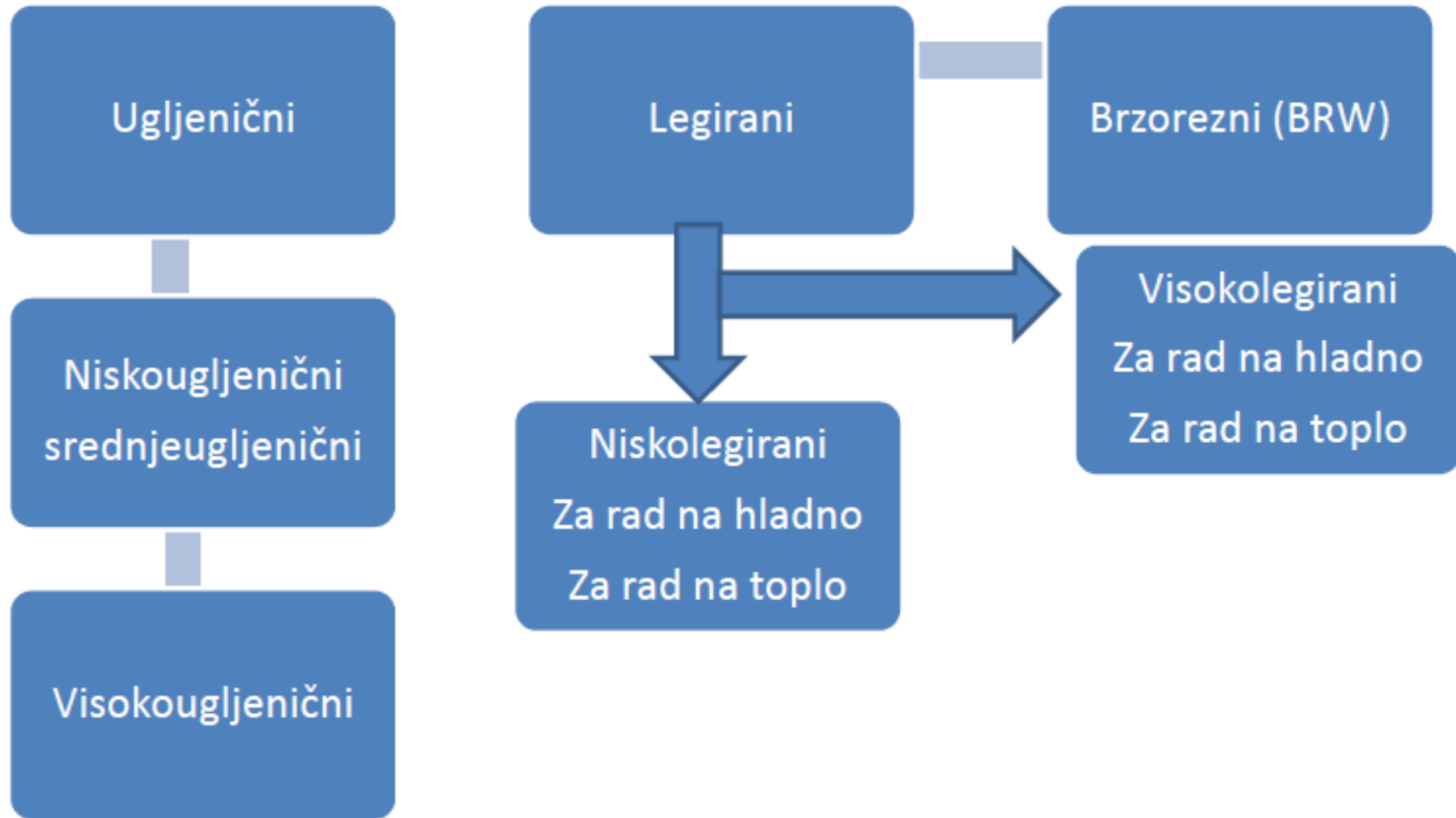
I - nelegirani i niskolegirani alatni čelici za hladni rad

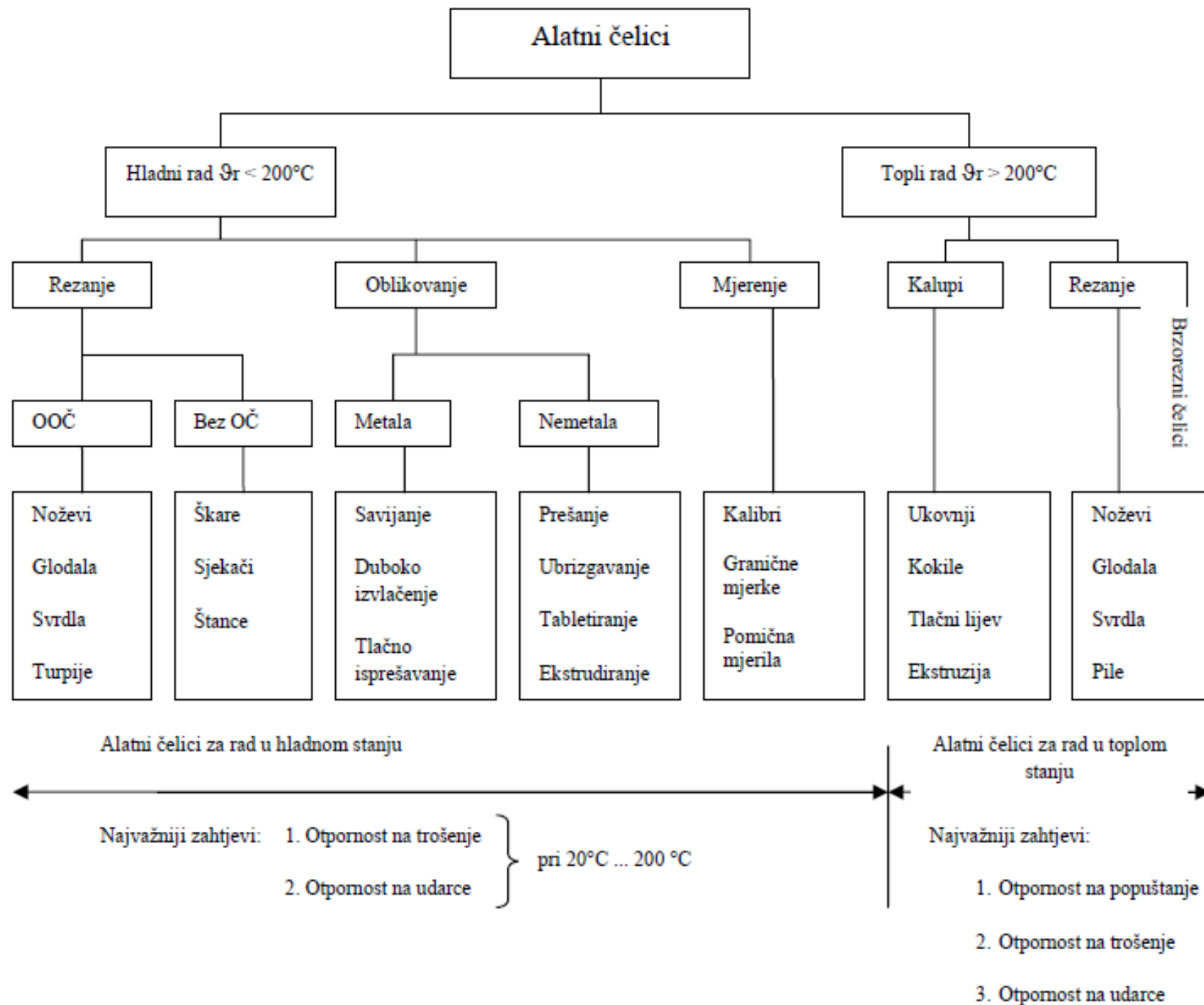
II - srednjelegirani i visokolegirani čelici za hladni rad

III - brzorezni čelici

IV - srednjelegirani i visokolegirani čelici za topli rad

# ALATNI ČELICI





# Uticaj nekih legirajućih elemenata na svojstva čelika

| Legirajući element | Uticaj na prokaljivost*                                | Važniji uticaji na svojstva                                                                                                                                            |
|--------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Si                 | +                                                      | Povećanje $R_{p0,2}$                                                                                                                                                   |
| Mn                 | ++                                                     | Povećanje otpornosti na trošenje uz visok % Mn                                                                                                                         |
| Cr                 | +                                                      | Povećanje otpornosti na trošenje; otpornost na koroziju (uz više od 12 %Cr)                                                                                            |
| Ni                 | +                                                      | Povećanje udarne radnje loma                                                                                                                                           |
| W                  | +                                                      | Spriječava (usporava ili odgađa) pad tvrdoće na povišenim temperaturama; povećava otpornost na trošenje na sobnoj i povišenoj temperaturi                              |
| Mo                 | +++                                                    | Spriječava (usporava) pad tvrdoće na povišenim temperaturama; povećava $R_{p0,2}$ na povišenim temperaturama; povećava otpornost na puzanje na povišenim temperaturama |
| V                  | + ako je otopljen na $T_a$<br>– ako je ostao u karbidu | Spriječava (usporava) pad tvrdoće na povišenim temperaturama; spriječava porast austenitnog zrna na previsokoj $T_a$                                                   |
| Co                 | –                                                      | Spriječava pad tvrdoće na povišenim temperaturama i usporava sve reakcije u strukturi (npr. pri popuštanju)                                                            |

# Ugljenični alatni čelici

Sa niskim sadržajem ugljenika (sa 0,25%C)

- Primena za merne alate i kontrolnike, metalne lenjire, šablone i sl.

Sa srednjim sadržajem ugljenika (sa 0,25-0,6%C)

- Primena za izradu ručnih alata i pribora, reznih alata za obradu drveta, livačkih kalupa i sl.(na pr. Č1540 za sekire, čekiće, srpove)

Sa visokim sadržajem ugljenika (više od 0,6%C); 0,6-1,4% C

- Primena za izradu alata za prosecanje, za preradu hladnim deformisanjem, za obradu drveta i termoplasta, stezni alati, mali kalupi za izradu plastike i gume i sl.(Č1840, Č1841, Č1940)

# Legirani alatni čelici

- Legirani alatni čelici se koriste u slučaju kada je neophodna postojanost na povišenim temperaturama i veća prokaljivost.
- Legirani alatni čelici se dele na niskolegirane (ukupan sadržaj legirajućih elemenata ne prelazi 5%) i visokolegirane.
- Niskolegirani čelici za rad na hladno koriste se za razne vrste alata za obradu čelika, obojenih metala, drveta, plastike i papira.
- Obrada se odvija na sobnoj temperaturi(na hladno), s tim što temperatura alata usled trenja ne sme za duže vreme da preći temperaturu od 300 °C.

- Primer: Č6840(za spiralne burgije, glodala, ureznice i nareznice, hirurške instrumente), Č6441(za noževe za obradu drveta i papira), Č4830( alati za jaka dinamička opterećenja).
- Niskolegirani alatni čelici **za rad na toplo namenjeni su za radne uslove pri** temperaturama iznad 300 °C.
- Primeri: U ovu grupu spadaju čelik Č5742 namenejn za kovačke alate i Č5741 za livačke kalupe.

# Legirani alatni čelici

## Visokolegirani alatni čelici za rad na hladno sadrže visok sadržaj Cr i C.

- Predstavnik ove grupe čelika je Č4150 (čelik sa 12%Cr i 2%C).
- Ovaj čelik se odlikuje velikom tvrdoćom i otpornošću na habanje.
- Primena: Koristi se za izradu profilisanih glodala, burgija za lake metale i mesing, testere za metal(uz vodeno hladjenje), kalupe za preradu plastike, presovanje porcelana i keramike.

## Visokolegirani alatni čelici za rad na toplo sadrže 5 do 10%W, 0,25-0,45%C i dodatke Cr, V, Ni, Co.

- Od ovih čelika izrađuju se alati najviše opterećeni kako mehanički tako i termički. Č6451(za presovanje na toplo u dubokim gravurama, za matrice, trnove alata za probijanje), Č6450(matrice za toplo presovanje, trnovi, alati za valjanje zavrtnjeva, alati za duboko izvlačenje, kalupi za livenje pod pritiskom).

Cr-Ni čelici austenitne strukture se koriste za izradu izuzetno termički i mehanički opterećenih matrica za ekstruziju profilisanih cevi i šipki od bakra, nikla, bronzе i mesinga.

# Brzorezni čelici

- Brzorezni čelici imaju najbolje rezne osobine sa visokim sadržajem W(volframa) 6,3-18%W i ugljenika (0,8 – 1.4%C) pošto se zakale sa visoke temperature i visoko otpuste. Klasični BRW čelik (Č6880) sadrži: 0,75%C, 18%W, 4,5%Cr, 1%V.
- Sitnozrnost i ravnomerna rasporedjenost nastalih karbida ( $W_2C$ ,  $V_4C_3$ ) u ovom čeliku postiže se specifičnim postupcima izrade, kovanja, i termičke obrade brzoreznih čelika.
- Iz ekonomskih razloga prešlo se na izradu brzoreznih čelika sa nižim procentom volframa(W) što je uticalo na smanjenje veka reznih alata.
- Čelik sa 10-12%W i 3-5%V (Č9681, Č9683)

# ALATNI ČELICI

Nadeutektoidni (Ledeburitni čelici): M+fino dispergovani karbidi, tvrdoća: 60-65 HRC

Podeutektoidni: M osnova bez karbida, tvrdoća: 45-55 HRC

Martenzitno stareći čelici (legura Fe-Ni): skoro uopšte nema ugljenik, tvrdoća: 40-50 HRC (mehanizam ojačavanja se bazira na izlučivanju intermetalnih jedinjenja)

Podela prema režimu rada:

1. Za rad na hladno
2. Za rad na toplo
3. Za rezanje velikim brzinama (HSS): najizdržljiviji na pritisak, ekstremne brzine ubrizgavanja u kalupe za livenje pod pritiskom.

Tvrđi metali

## **Podela prema svojstvima:(prema toplotnoj postojanosti):**

- Toplotno postojani - TP
- Toplotno poluposzojani - TPP
- Toplotno nepostojani – TN

## **Podela prema nameni:**

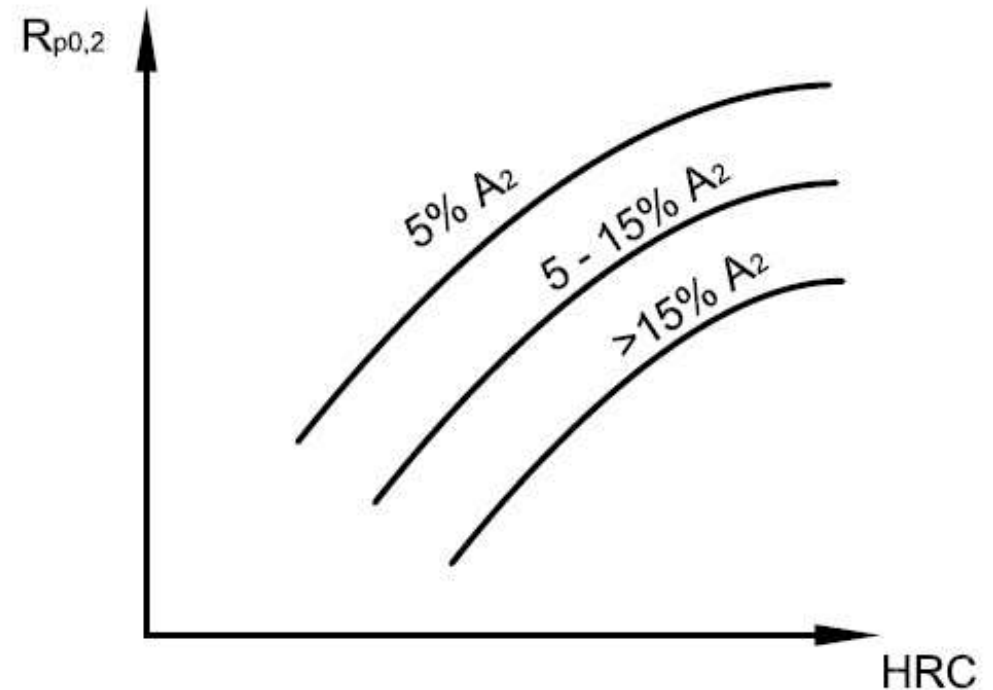
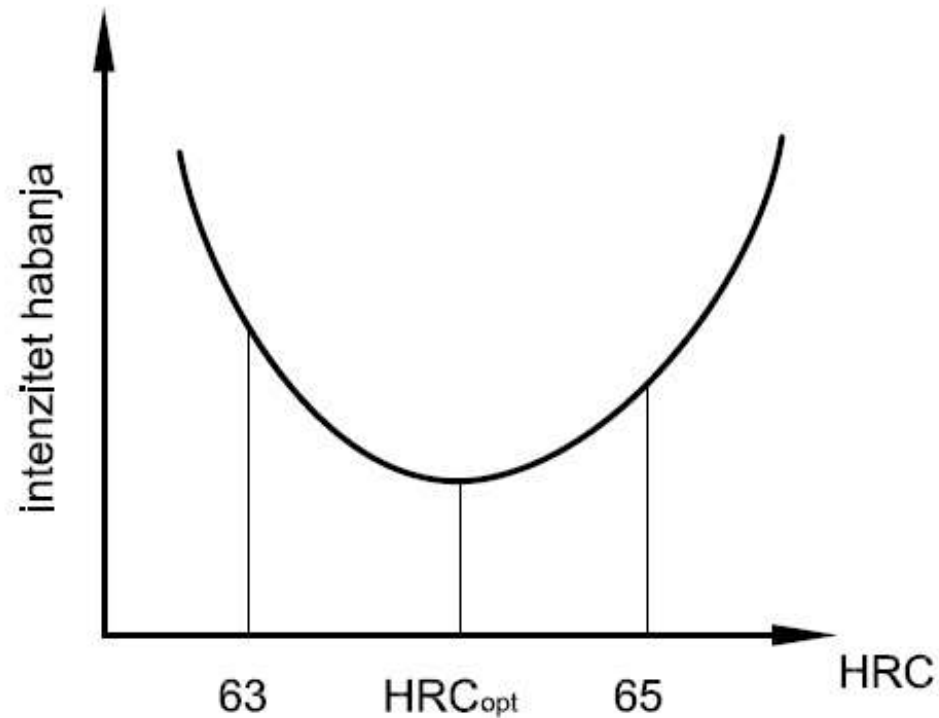
- Alati za obradu rezanjem
- Alati za deformisanje na hladno
- Alati za deformisanje na toplo
- Alati za kokile

## Osobine alatnih čelika

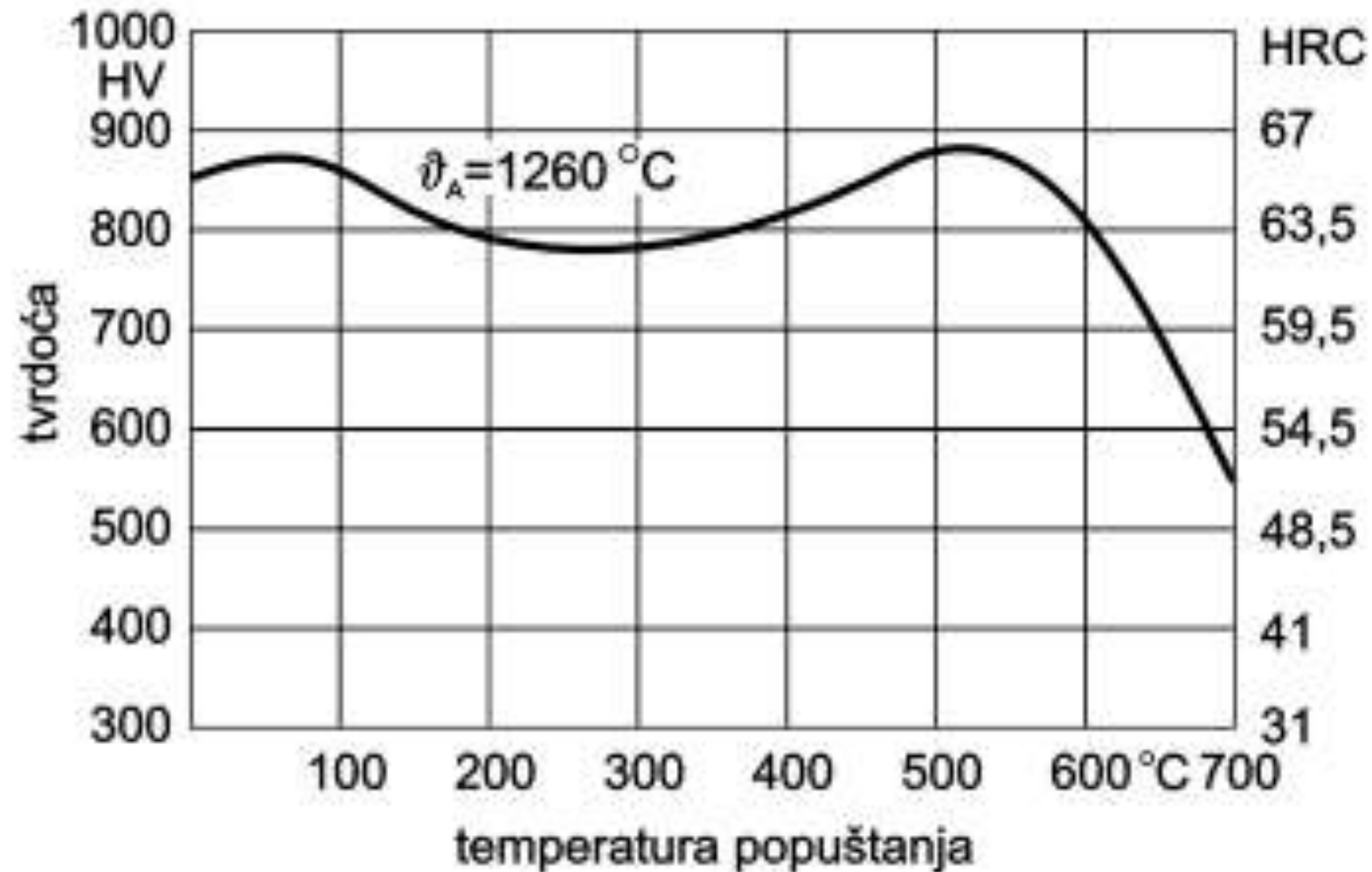
- Postojanost alata: vreme njegovog zadržavanja u eksploataciji i efektivnost u toku rada. Zavisi od osobina: tvrdoća, otpornost na plastičnu deformaciju, čvrstoća, otpornost na zamorni lom, žilavost, toplotna postojanost, otpornost na habanje, prokaljivost, fizičke i hemijske osobine.
- Tehnološke osobine: kaljivost, deformacija pri termičkoj obradi, otpornost prema obrazovanju pukotina, otpornost prema pregrevanju, otpornost prema razugljeničenju i oksidaciji, obradivost rezanjem.

# TVRDOĆA

- Jedna od najvažnijih osobina alata. Sa porastom raste otpornost na habanje. Na tvrdoću utiče i sadržaj zaostalog austenita ( $A_z$ ).



# Sekundarna čvrstoća



# Otpornost na plastičnu deformaciju

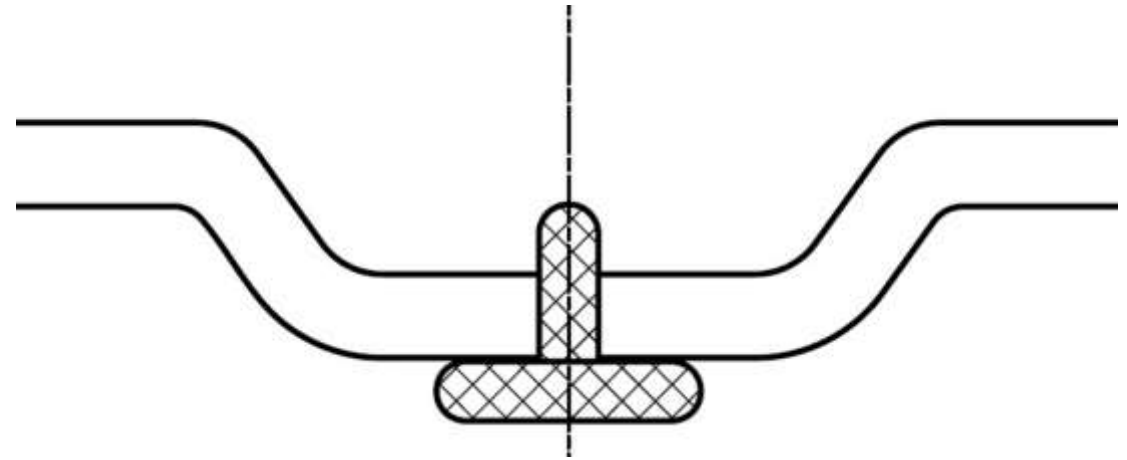
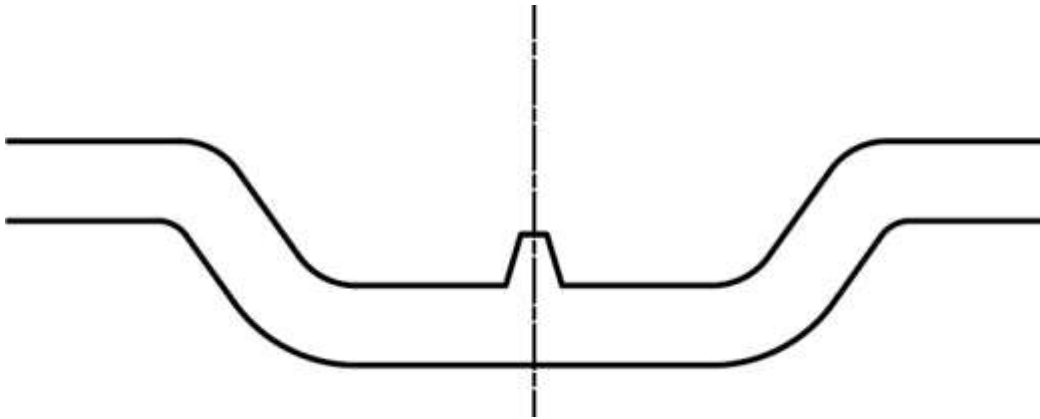
- Definiše otpor radnih površina alata na visoke napone koji nastaju pri eksploataciji. Definiše se sa  $R_{p0.2}$ , pri sabijanju na pritisak, a zavisi od strukture i Az.
- Pri velikim tvrdoćama – malo  $R_{p0.2}$ .
- Koliko će se deformisati oštrica!
- Kod nekih alatnih čelika imamo dvostruko otpuštanje. Prvo otklanja zaostali austenit i formira centre karbidnih čestica a drugim se dobija optimalna otpornost na lokalnu plastičnu deformaciju.

# Čvrstoća alatnih čelika

- Alati moraju imati visoku čvrstoću: savojnu i uvojnu. Mesto dejstva maksimalnih savojnih i uvojnih napona se uvek nalazi udaljeno od mesta maksimalnog habanja.
- Približno 70% malih reznih alata se lomi pre nastanka efekta habanja u dozvoljenoj meri. (glodalo-zona habanja na vrhu zuba a lom nastaje na korenu zuba,  $R_m$ ).
- Savojna čvrstoća ne zavisi samo od sadržaja C u martenzitu i sadržaja zaostalog austenita, nego i od: osobine strukture (veličina zrna, sastav na granici zrna, rasporeda karbida, rasporeda napona....)
- Za čvrstoću je bitno dali je čelik liven ili kovan, ili dobijen sinterovanjem praha (ASP).
- Velika osetljivost na promenu naponskog stanja, tako da čvrstoća (zatezna, savojna, uvojna, pritisna) zavisi od pravca isecanja komada (uzduzni i poprečni), koji se razlikuje zbog načina proizvodnje.

- **Otpornost na zamorni lom:** kod cikličnih opterećenja kod alata za rad na toplo i kod alata za rad na hladno.
- **Dinamička čvrstoća:** nije isto ako se materijal optereti uzdužno ili poprečno (2-3 puta bolje osobine ako je poprečne opterećenja). Kod sinterovanih materijala smer opterećenja ne igra ulogu.
- **Žilavost:** važna ako su i ciklična i udarna opterećenja, žilavost je povezana sa tvrdoćom. Kod alatnih čelika ova osobina je veoma važna i definiše se kao otpornost na obrazovanju pukotina pri udarnim opterećenjima.
- **Otpornost na toplotni zamor:** ova otpornost se odnosi na obrazovanje površinskih pslina u toku višestrukog zagrevanja i hlađenja. Najčešće se javlja kod alata za kovanje. Kao posledica javljaju se površinske prsline u obliku mreže. Još veći problem se javlja ako dolazi do hemijske reakcije, koje šire mrežu prslina. Na toplotni zamor se može uticati i geometrijom alata.

# Otpornost na toplotni zamor (alat za liveneje)



**Toplotna potojanost:** znači zadržavanje osobina i strukture na visokim temperaturama. Povećava se legiranjem i kaljenjem na višim temperaturama (HRC, žilavost)

### **Fizičke osobine:**

1. Toplotna provodljivost
2. Koeficijent toplotnog širenja

**Hemijske osobine:** otpornost na dejstva atmosfere, otpornost prema tečnim metalima, otpornost prema koroziji

- **Otpornost na habanje:** koji zavisi od uslova eksploatacije i obrađivanog materijala.

- **Prokaljivost čelika:** od prokaljivosti zavisi otpornost A.Č. Prema većim pritiscima i dinamičkim opterećenjima. Ispituje se na probama 20x20x100 mm i posle kaljenja i loma epruvete dobija se tipičan izgled preloma. Kod srednje kaljivih čelika se radi Jominy proba.
- **Kaljivost čelika:** je sposobnost stvaranja martenzitne strukture i povećanje tvrdoće na površini.
- **Tehnološka svojstva:** ponašanje alata za vreme mašinske i termičke obrade.
- **Hemijska svojstva čelika:** važno je zbog kontakata sa raznim materijalima i to na povišenim temperaturama. Postoji korozivna otpornost.
- **„EG“** – oznaka da mogu da budu u telu čoveka.

# Alatni čelici za rad na toplo

Izloženi su cikličnom zagrevanju u hlađenju. Osnovne karakteristike koje trebaju zadovoljiti su:

1. toplotna postojanost
2. žilavost na povišenim temperaturama (od 40 do 60 J na sobnoj)
3. otpornost na termociklični zamor
4. hemijska postojanost

## **Legirajući elementi:**

- Cr – povećava čvrstoću na povećanim temperaturama, povećava otpornost na habanje i postojanost na povišenim temperaturama.
- Mn – povećava prokaljivost do 0,7 %
- Ni – žilavost i prokaljivost do 2%
- W – povećava čvrstoću i otpornost na habanje ali je jako skup.
- Mo – (1 do 1,54%) smanjuje efekat lepljenja površina
- V – do 1% dejstvo kao W i Mo, ali je daleko skuplji od W.
- Si – utiče na elastičnost, negativni efekti da razugljeniči materijal i oksidacija.

## **Podela i izbor čelika za rad na toplo:**

1. Alati za kovanje: dominira udarno opterećenje. Maximalna žilavost, visoka čvrstoća.
2. Alati za provlačenje i prosecanje na toplo: manje su dimenzije ovih alata, ali je bitna visoka topla postojanost.

## **Izbor čelika za alat na toplo:**

- Dimenzije alata (legiranost jako važan)
- Morfologija alata / oblik (dimenzije alata – komplikovan oblik, deblji zidovi).
- Mašina za alat – gde će alat da radi. Pritisci, snaga mašine, karakteristike.

| <b><i>Podela<br/>: leg. el.</i></b> | <b><i>Oznaka</i></b> | <b><i>Karakteristike i primena</i></b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ni –<br>Mo – Cr                     | Č 5742<br>Č 5741     | Veliku udarnu i dinamičku čvrstoću imaju (maksimalnu žilavost). Kovački alati, alati za utiskivanje, alati za fine gravure                                                                                                                                                                                                                                                 |
| W – Cr<br>– V                       | Č 6451<br>Č 6450     | Rade na visokim temperaturama i ne gube svih svojstva na tim temperaturama. Zadržavaju mehaničke osobine. Kristi se tamo gde je nedovoljno hlađenje alata. Od njih se proizvode alati za prese, rezanje na toplo trnove, čaure i izradu klipova kod istiskivanja.                                                                                                          |
| Mo- Cr<br>- V                       | Č 4751<br>Č 4753     | Najviše korišćeni čelici na toplo. Ima dobru toplotnu provodljivost pošto sadrži Mo. Dobro otpornost na habanje zbog Mo. Velikoserjska proizvodnja alata za kovanje (100.000,00 otkivaka). Da bi čelik bio kvalitetan izuzetno je važan raspored i dimenzije karbida. Zbog toga treba uraditi homogenizaciju posle livenja. Otklanjanje segregacije legirajućih elemenata. |
| W – Cr<br>– Si                      | Č 6443<br>Č 6444     | Predviđeni na rad na toplo i hladno. Lako se obrađuju i tehnološki su. Menjaju čvrstoću na temperaturi.                                                                                                                                                                                                                                                                    |

## **Specifičnost termičke obrade – tok izrade alata na toplo**

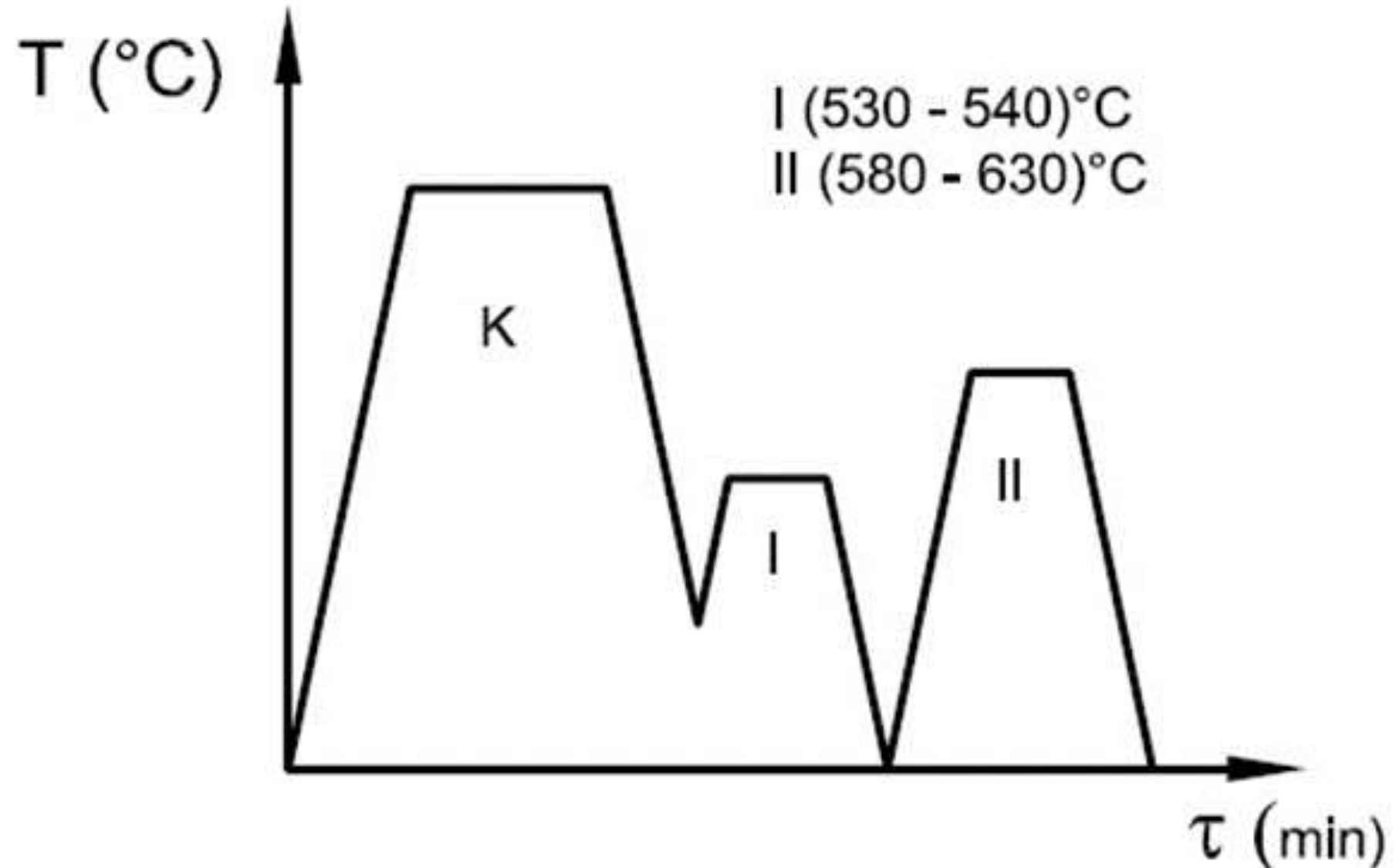
Ovi čelici mašinski se obrađuju u meko žarenom stanju (700-800°C).

Hlađenje u peći.

- meko žarenje
- mašinska obrada
- stabilizaciono žarenje – zbog preostalih napona posle mašinske obrade
- termička obrada
- Isprobavanje alata

- **Kaljenje** koje se vrši uglavnom sa 2 predgrevanje i tek onda zagrevanje na završnu temperaturu. Radi se u peći. Uglavnom sa radi sa zaštitnom atmosferom, može i u vakumu. Nakon toga hlađenje u peći. Posle zagrevanja – hlađenja traje 2h. Posle toga ide hlađenje u uljima. Treba paziti na deformacije tokom hlađenja. Zbog toga koristimo tokom hlađenja prese ili više komada odjednom
- **Otpuštanje** – otpuštanje ide odmah posle kaljenja, sačekaćemo dok se ohladi na 100-150°C i odmah počnemo otpuštanje.

# Termička obrada



# Brzorezni čelici

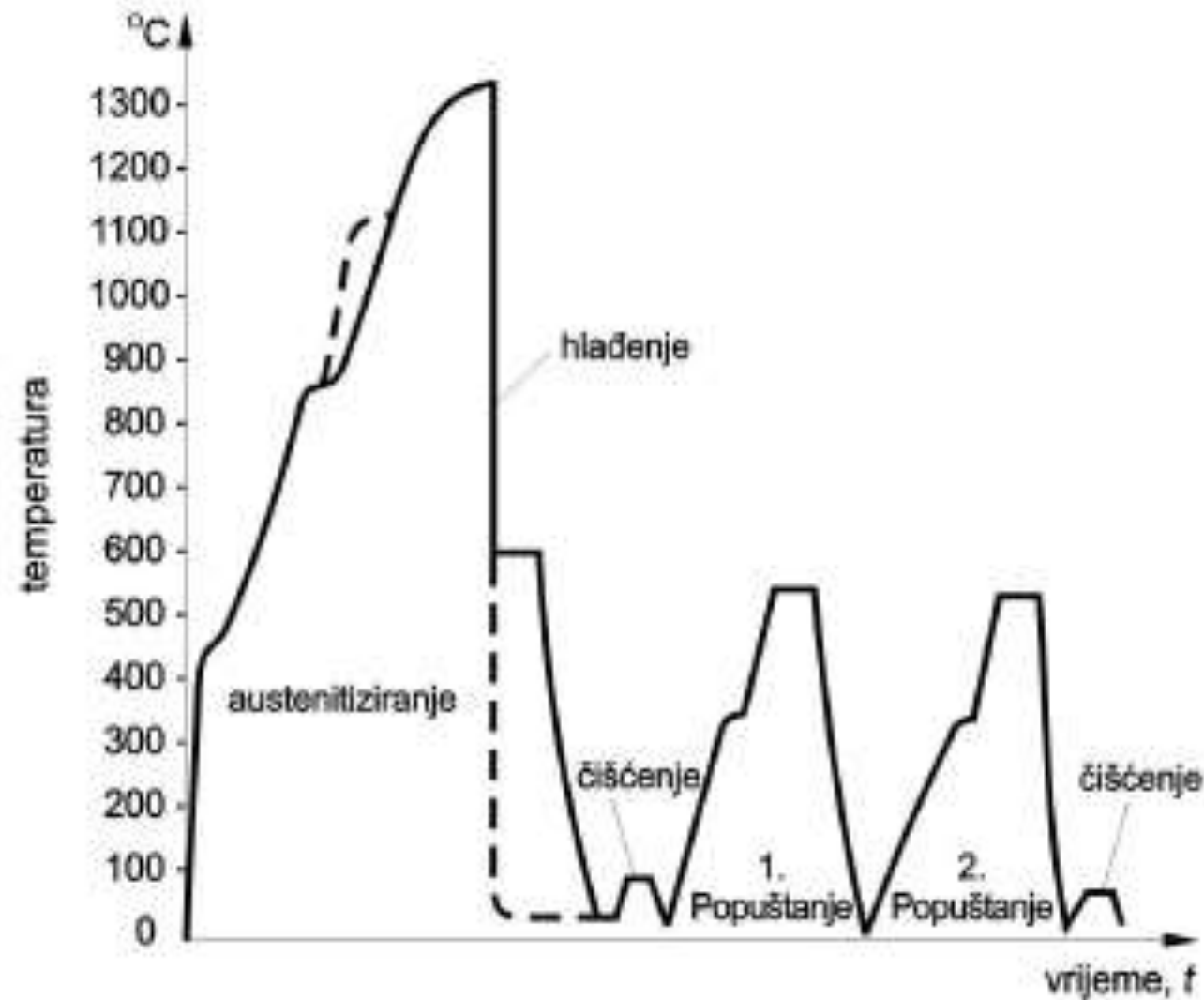
- Najkvalitetnija grupa i najskuplja čelika! Sve dobre osobine sadrže ti čelici. Rad na 600-700°C. Danas uglavnom imaju prevlaku. Tvrdća im je 63-67 HRc. Eutektoidni sadržaj sa 0,8 %C. Imaju 1 %V i 0,2 %C).

| Podela: leg.el.             | Oznaka           | Karakteristike i primena                                                                                                       |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| W ( 12÷18 %)                | Č 6880           | HSS - najstariji                                                                                                               |
|                             | Č 6881<br>Č 6882 | + 1 %V, sa većim temperaturom može da radi                                                                                     |
| Mo (5%) – W (6%)<br>+ 4 %Co | Č 7680<br>Č 7880 | Najpopularniji sve dobre osobine ima                                                                                           |
| W – Co (5÷10%)              | Č 6980           | 5 %Co – koristo se za grubu obradu                                                                                             |
|                             | Č 9682           | 10 %Co – najstrožiji režime rezanja možemo ostvariti pomoću njega                                                              |
|                             | Č 9681           | 10 %Co+4 %V vrlo precizni alati, fazonski noževi.                                                                              |
| Mo – W – Co<br>(1,25 %C)    | Č 9780           | Može da radi u najgorim i najmogućim uslovima kao i Č7680. Razvijen za najmanje mašine i zove se SUPER BRZOREZNI ČELIK. 70 HRC |

## Termička obrada:

- meko žarenje – pre mašinske obrade (790-860 °C 3h) sporo hlađenje u peći, pa posle na vazduhu.
- mašinska obrada
- kaljenje (950-960°C) neki i na 1250°C. Zagrevanje je trostepeno i nakon toga na završnu. I st. 500-600°C; II st. 800-900°C; III st. 1000-1050°C; IV st. završna temperatura kaljenja. Kaljenje se vrši u solima i peći imaju keramički lonac. Tako prepoznamo da se radi o peći gde se brzorezne čelike kale. Ako hladimo u solima, onda 10-15% ima zaostalog austenita-min. Preostali elementi su karbidi i martenzit. Hlađenje u uljima i može u vakumu. Kod većina ovih čelika je potrebno pothlađenje( -80°C).
- Otpuštanje – obavezno se radi 3 otpuštanja
  - I – pri čemu se smanjuje stabilnost preostalog austenita (60-80 min) omogućavaju se efekti difuzije. Nema pravila za izbor temperature. Zavisi od vrsta rada čelika, temperature rada.
  - II – tvrdoću dobijemo koji tražimo. Merimo tvrdoću-Najvažniji moment!
  - III – funkcija od II otpuštanja.

# Termička obrada brzoreznog čelika



# Vatrootporni čelici

- Predviđeni su na rad na vrlo visokim temperaturama i pri tome ne gube mehaničke osobine. Izrađuje se od njega šaržeri za termičku obradu, delovi za reaktore, elektrane,.....
- Izloženi su na koroziju zbog prisustva  $O_2$ , i agresivnih fluida. Na povišenoj temperaturi je proces difuzije ubrzan što dovodi do sferoidizacije perlita zatim grafitizacije, prestarevanja, do pojave toplotne krtosti preraspodele legirajućih elemenata.

Postoje dva načina formiranja:

- i. legiranje elementima koji će zautaviti proces difuzije (C, Si, W – ubrzaju proces difuzije). Na sobnoj temperaturi  $C \rightarrow 3000 \frac{cm^2}{sec}, \alpha - rešetku$ , na  $950^\circ C$   $C \rightarrow 950 \cdot 10^{10} \frac{cm^2}{sec}, \gamma - rešetku$
- i. fomiranje faza koje su otporni na visokim temperaturama. Karbidi  $TiC, W_2C, Mn_3C, VC, Fe_3C$ , mataloidi  $Ni_3(Ti, Al)$ ,  $N_3N_b$ , hemijske jedinjenja. INKONEL – firma za izradu turbine (lopatice), ORAO – MIG21, MIG – 29, MTU – nemačka firma za mlazne motore.