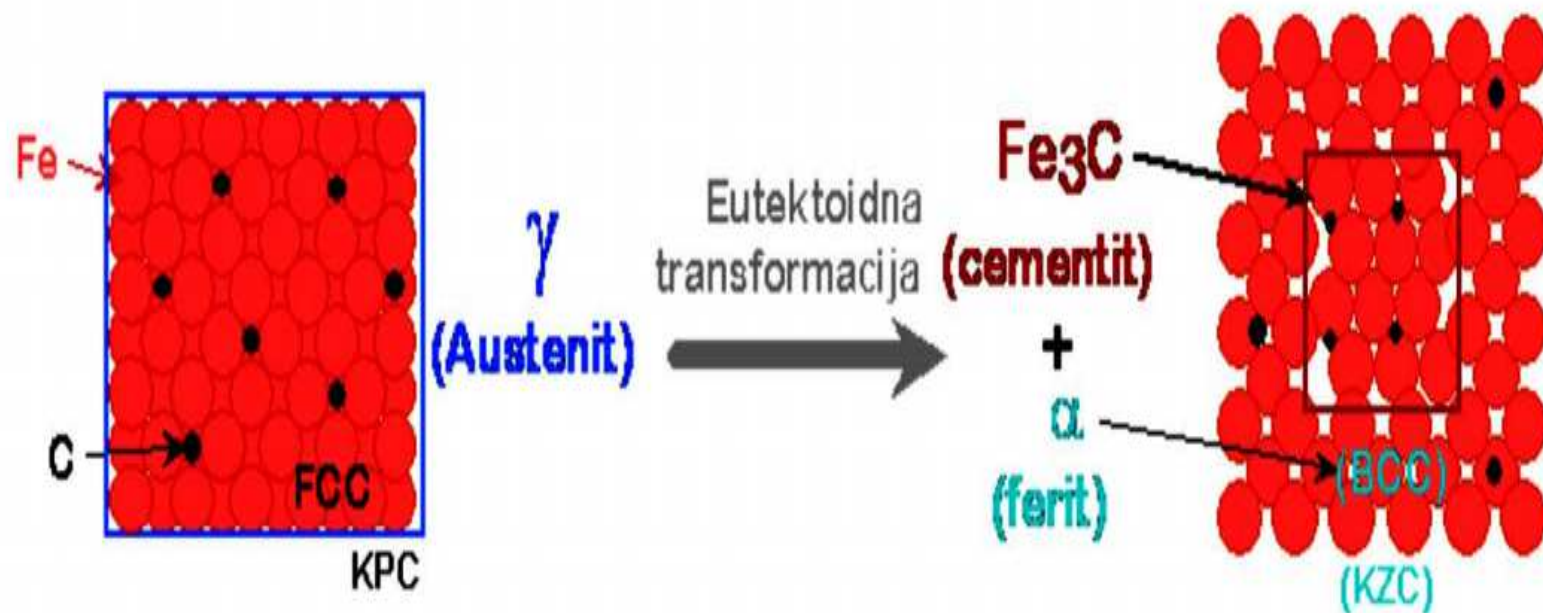


FAZNE TRANSFORMACIJE

Mašinski materijali

Fazne transformacije

- Na koji način brzina transformacije zavisi od vremena i temperature ?
- Kako možemo usporiti transformaciju tako da inženjerski kontrolišemo neravnotežne strukture?



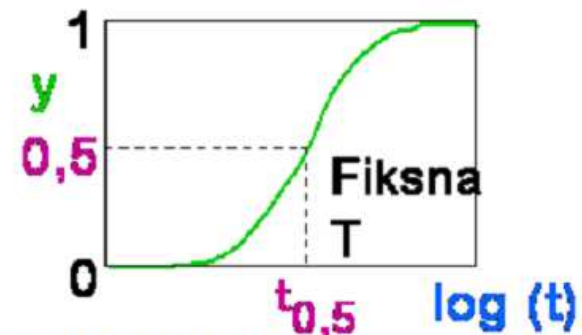
Frakcije transformacije

TRANSFORMISANA FRAKCIJA ZAVISI OD VREMENA

Avrami

$$y = 1 - e^{-kt^n}$$

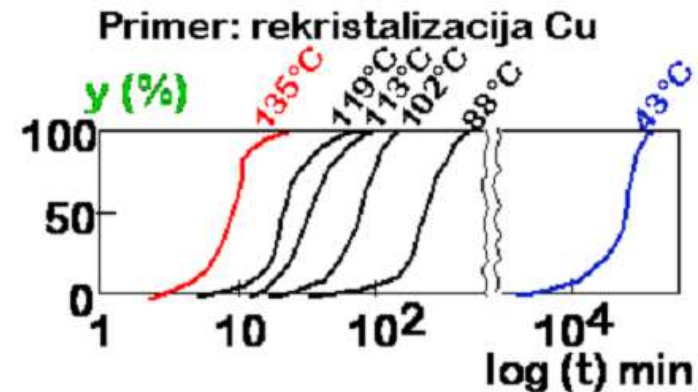
transformisana frakcija y vreme t



BRZINA TRANSFORMACIJE ZAVISI OD TEMPERATURE

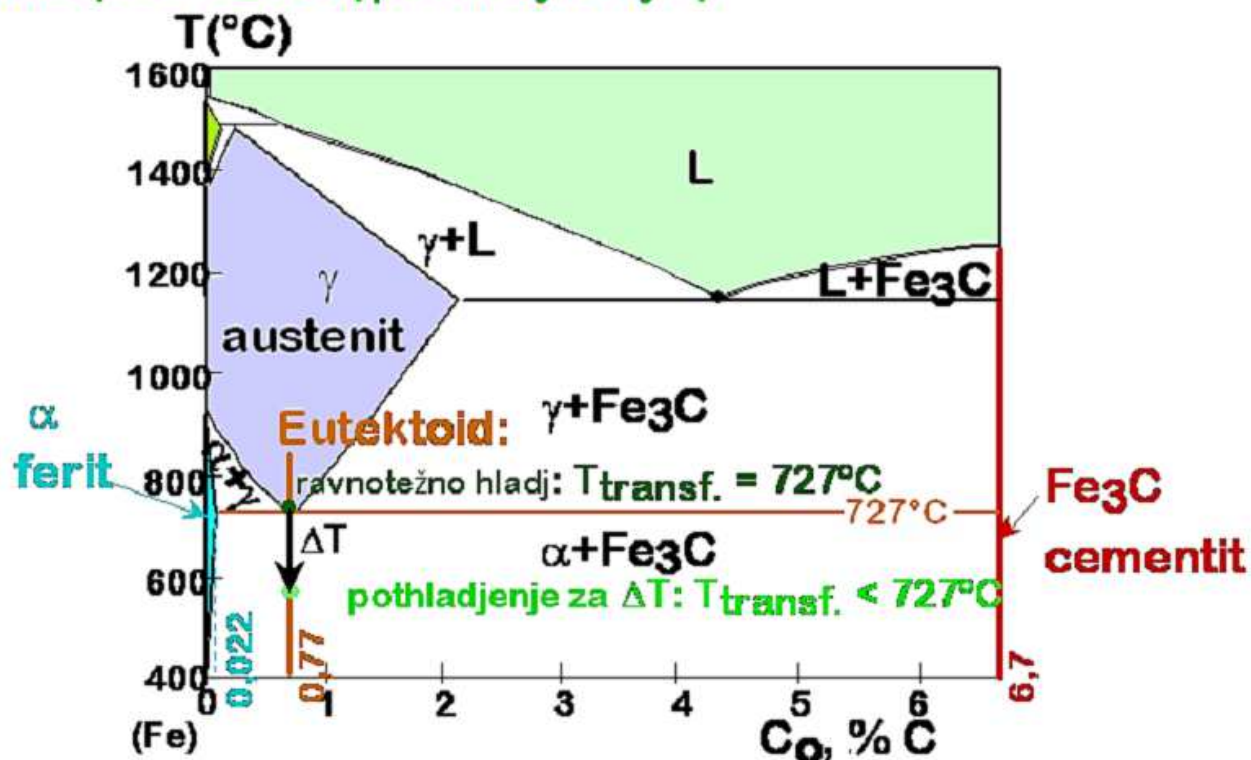
energija aktivacije

$$\tau = \frac{1}{t_{0,5}} = Ae^{-Q/RT}$$

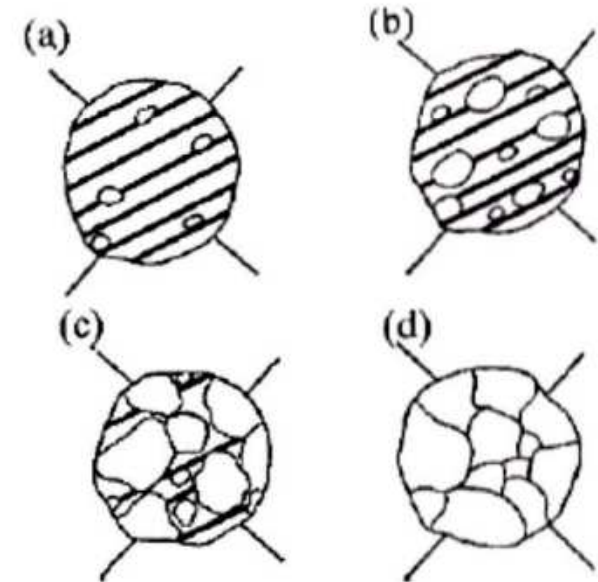
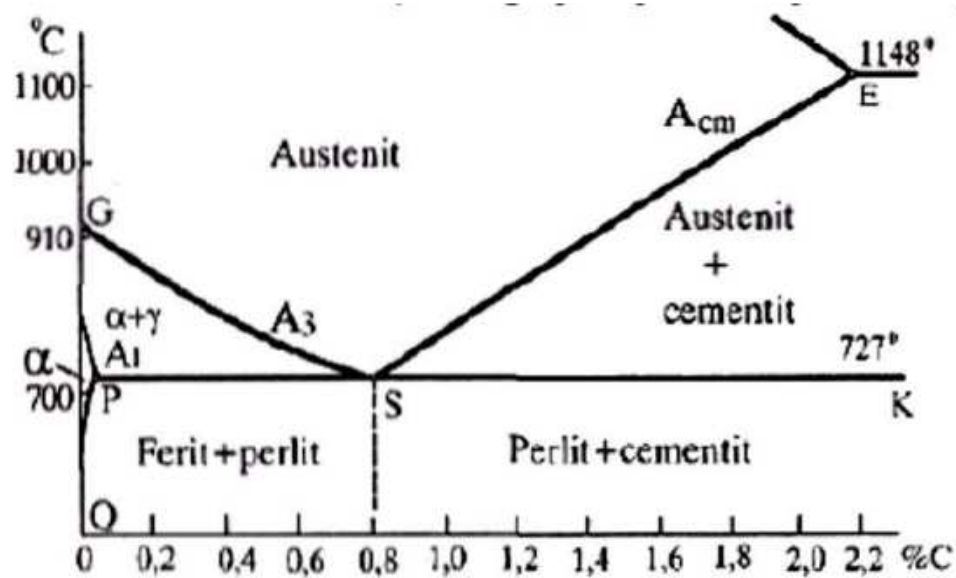


TRANSFORMACIJE I PODHLADJENOST

- **Eutektoid.transf. (Fe-C sistem):** $\gamma \Rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$
- **Može se pojaviti na:**
 - ... **727°C** (lagano hladjenje)
 - ... **ispod 727°C** (pothladjivanje)



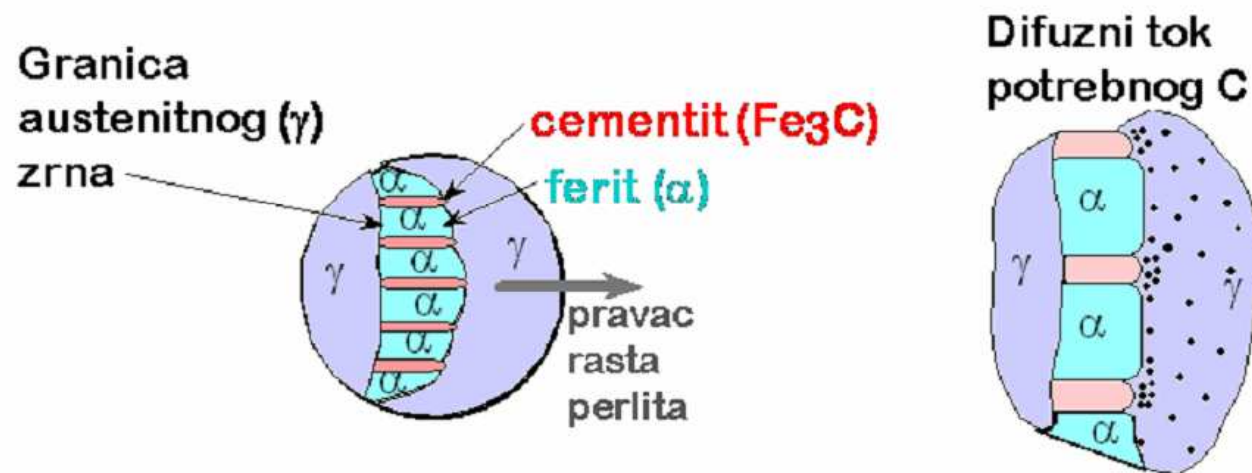
FAZNE TRANSFORMACIJE PRI ZAGREVANJU



Deo dijagrama stanja Fe-Fe₃C i šematski prikaz obrazovanja austenitnih zrna u procesu zagrevanja

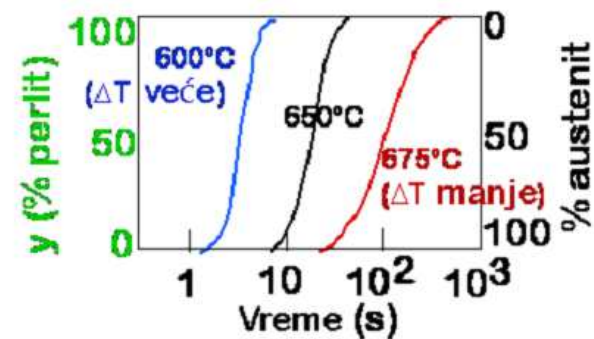
RAZLAGANJE PODHLADJENOG AUSTENITA

(Dijagram izotermalne transformacije austenita



Razlaganje austenita na T nižim od 727°C

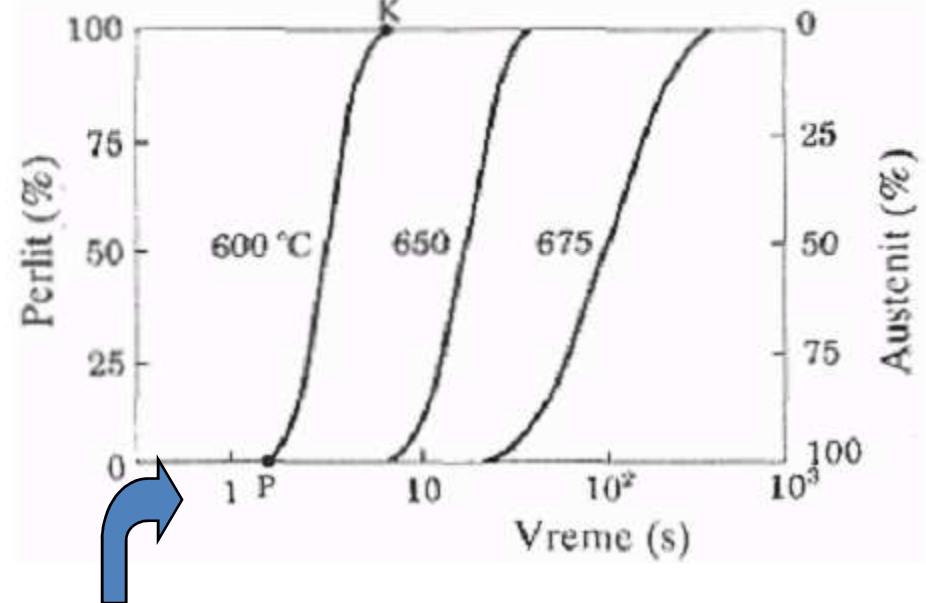
Za opisivanje kinetike transformacije podhladjenog austenita koriste se eksperimentalno dobijeni dijagrami TTT



Dijagram izotermalne transformacije austenita

Potpuna transformacija austenita završava se po isteku određenog vremena tačka K)

Proces transformacije austenita pri $T = \text{konst.}$

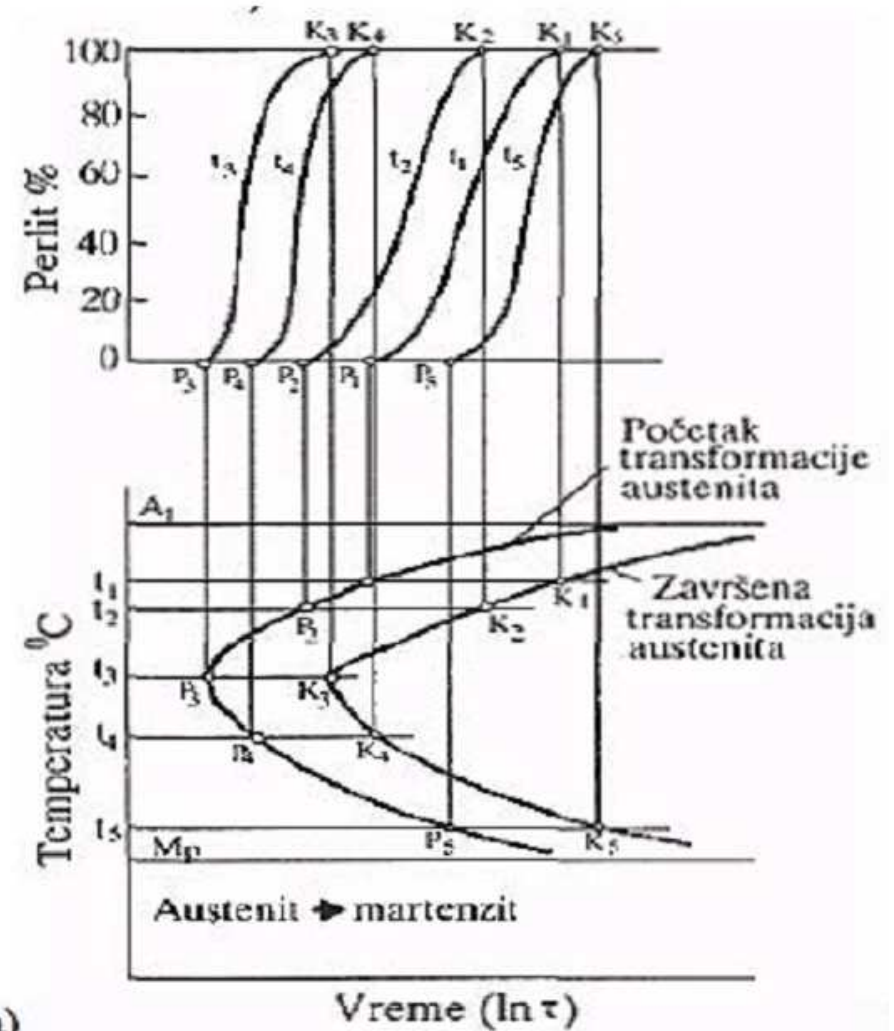


Eksperimentalno dobijene krive izotermalne transformacije austenita u perlit za ugljeni čelik sa 0,8%C u funkciji vremena i temperature

Šema konstruisanja dijagrama izotermalne transformacije austenita eutektoidnog čelika

$P_1, P_2, P_3 \dots P_n$ - vreme početka transformacije austenita

$K_1, K_2, K_3, \dots K_n$ - vreme završetka transformacije austenita

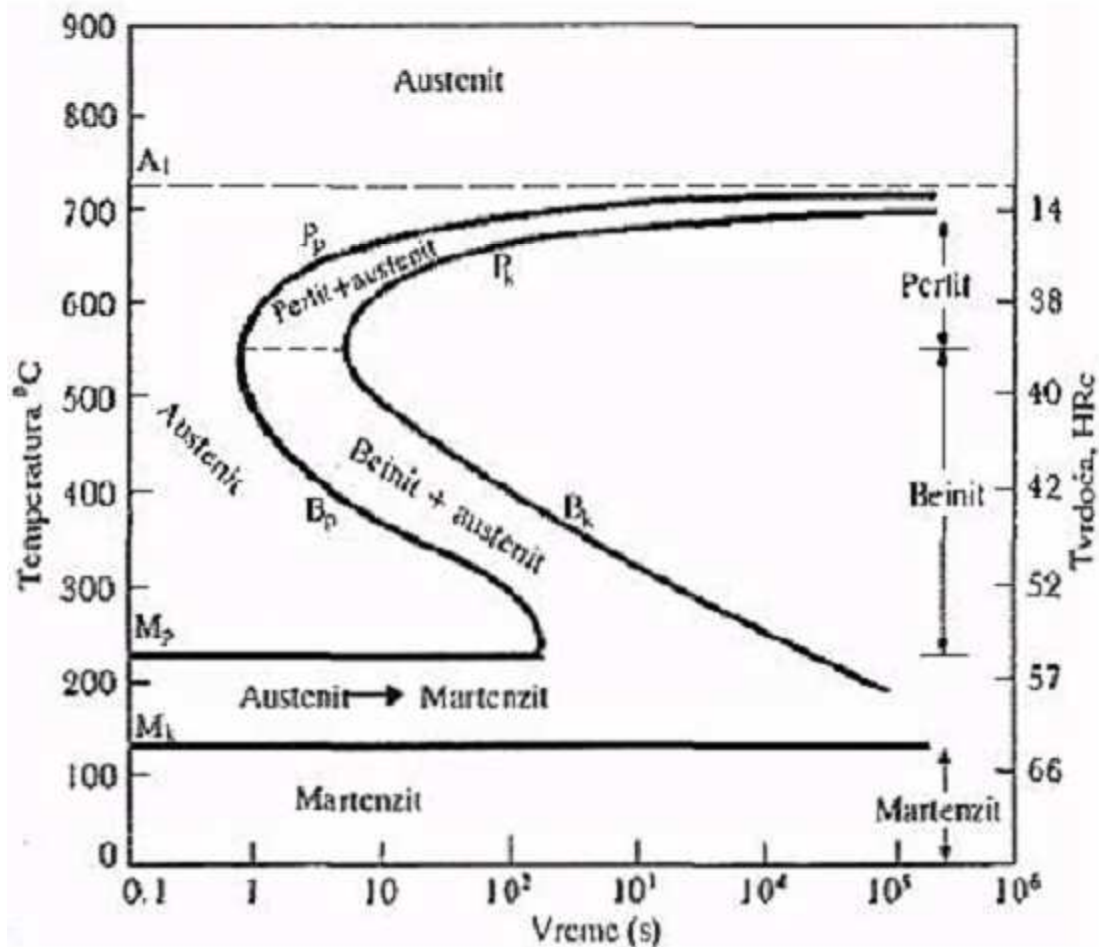


(a)

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

Medjuoblast počinje od kolena krive (550°C) i proteže se sve do početka martenzitne transformacije M_p .

- Perlitna transformacija(difuziono seljenje ugljenika).
- Martenzitna transformacija (bezdifuzioni) proces
- Rezultat transformacije podhladjenog austenita dobija se struktura- Beinit.
- Martenzitna oblast počinje od temperature početka martenzitnog preobražaja, a podhladjeni austenit bezdifuziono se transformiše u martenzitnu strukturu.



TRANSFORMACIJA AUSTENITA

- **PERLITNA TRANSFORMACIJA** se obavlja na temperaturama iznad 450°C , kada je moguća laka difuzija atoma ugljenika i atoma železa.
- **BEINITNA TRANSFORMACIJA** se obavlja na temperaturama između 200 i 450°C tj. kada više nije moguća difuzija atoma Fe već samo atoma C.
- **MARTENZITNA TRANSFORMACIJA** je na temperaturama ispod 200°C kada više nije moguća difuzija.
- USLOV ZA STABILAN TOK RAZLAGANJA AUSTENITA JE
- DOVOLJNO VELIKO PODHLADJENJE
- Postupak transformacije austenita se u tehnici termičke obrade može postići na dva načina:
- kontinuiranim hladjenjem
- izotermnom transformacijom

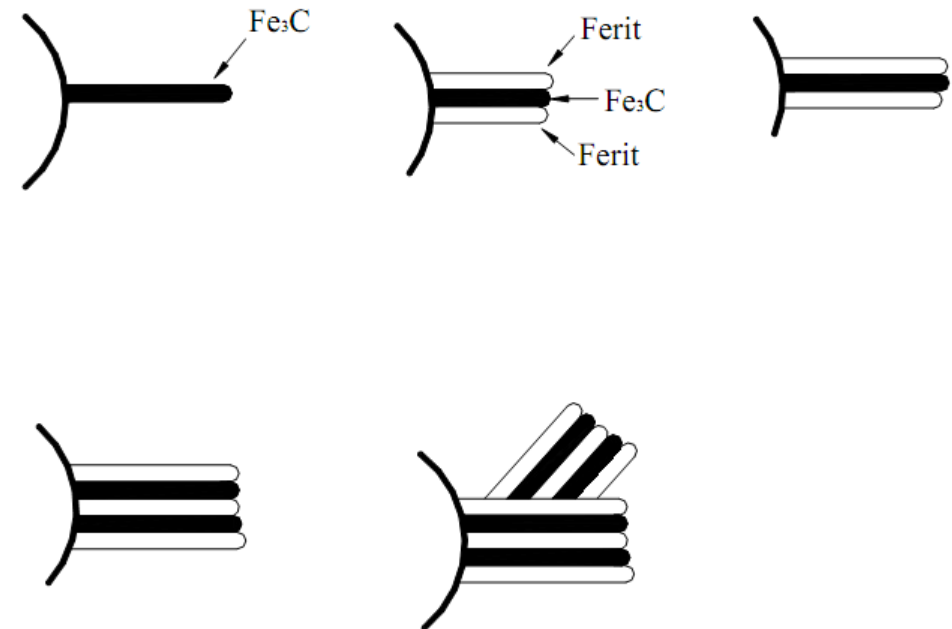
Perlitna transformacija

- Temperatura preobražaja između 720 i 450°C (perlitna oblast):
- Transformacija počinje pojavom klica cementita na granicama austenitnog zrna. Okolina kristala cementita siromaši ugljenikom i transformiše se u α -Fe.
- Pošto je rastvorljivost C u α -Fe mala, to se ugljenik (C) potiskuje u susedna austenitna područja. Ova područja postaju presićena sa C pa
- nastaje pojava novih kristala cementita.

Na 700 ° C nastaje
grubo lamelarni perlit

Na 600 ° C
finolamelarni perlit

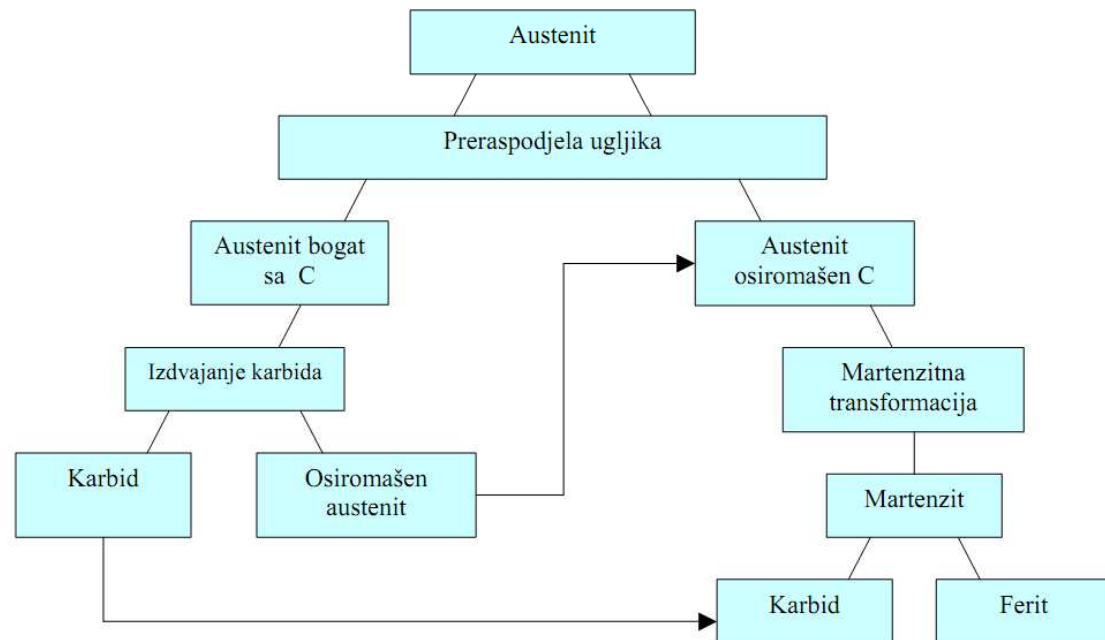
Na 500 ° C
veoma finolamelarni perlit



BEINITNA TRANSFORMACIJA

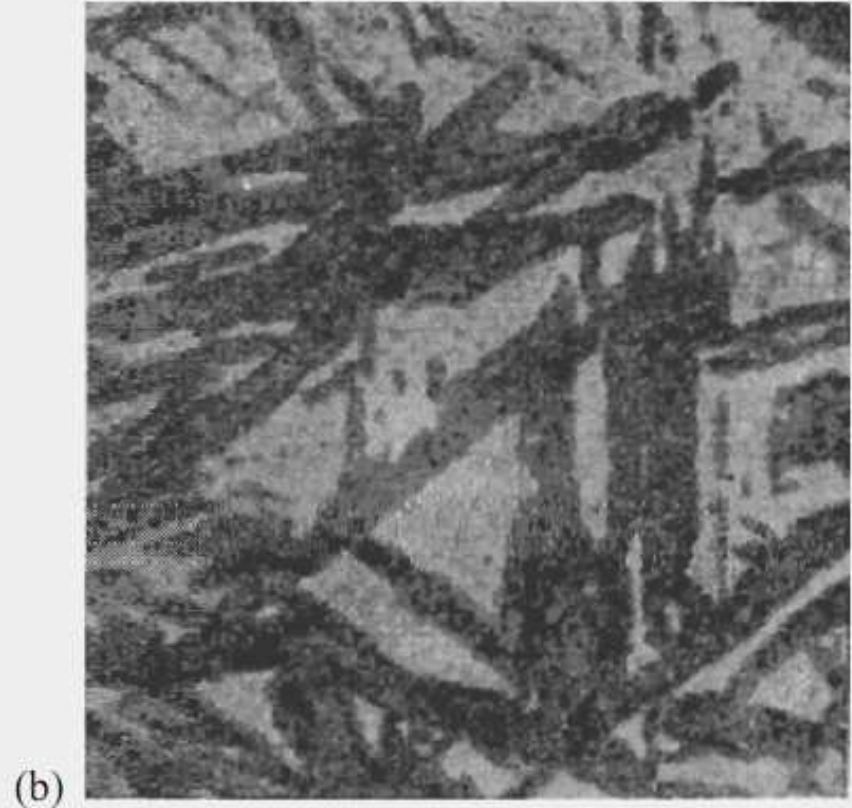
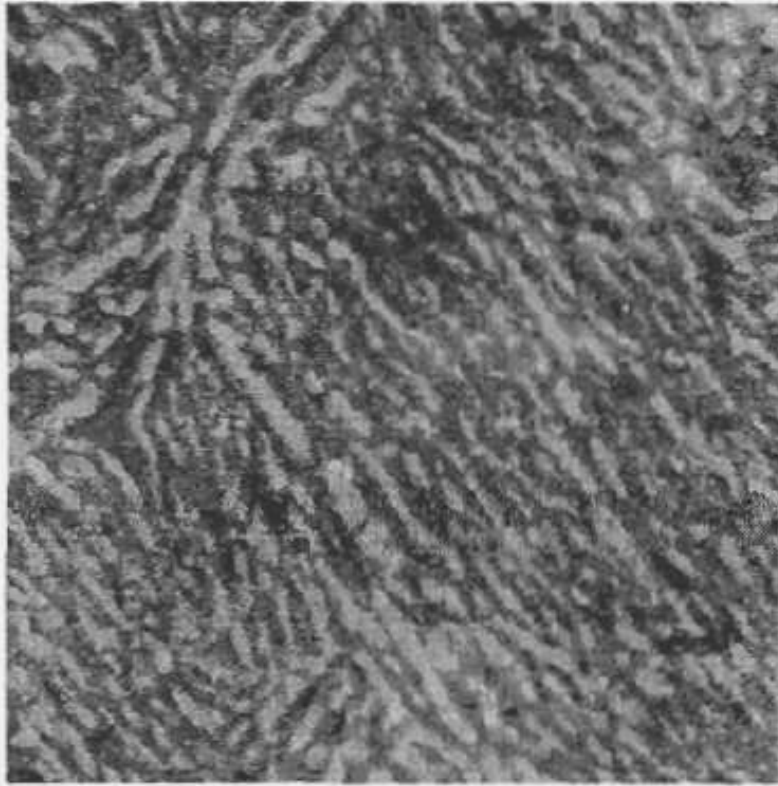
- Temperatura preobražaja izmedju 400 °C i Ms tačke (beinitna oblast) iz austenita nastaje beinit.

Beinit, kao i perlit, sastoji se iz ferita i cementita stin što ne nastaje direktno iz austenita, već preko prelaznog stanja, ugljenikom presićenog α - Fe, iz koga se ugljenik tek kasnije izdvaja u obliku karbida železa. Rezultat toga je igličasta struktura beinita, globularna struktura karbida i porast tvrdoće uslovljen povećanjem disperznosti.



Slika Šema toka procesa kod beinitne transformacije (A.Guljajev)

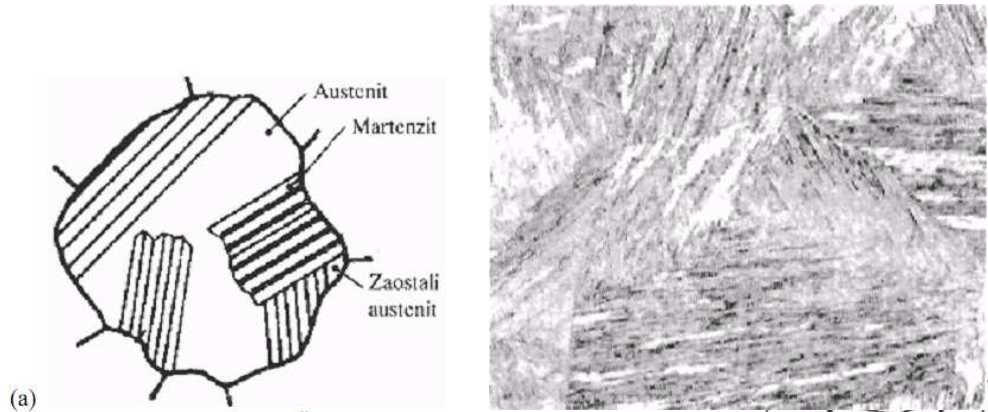
Mikrostruktura beinita



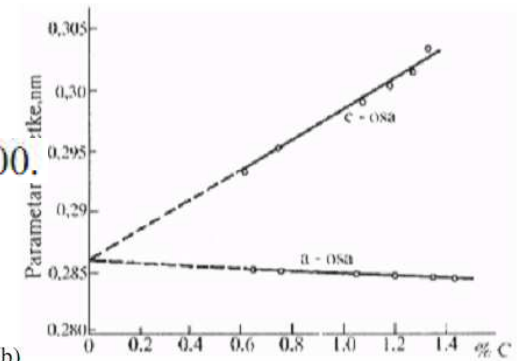
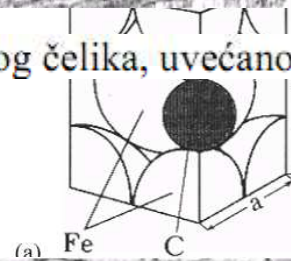
Mikrostruktura beinita
a) gornji beinit x5000

b) donji beinit i zaostali austenit x500

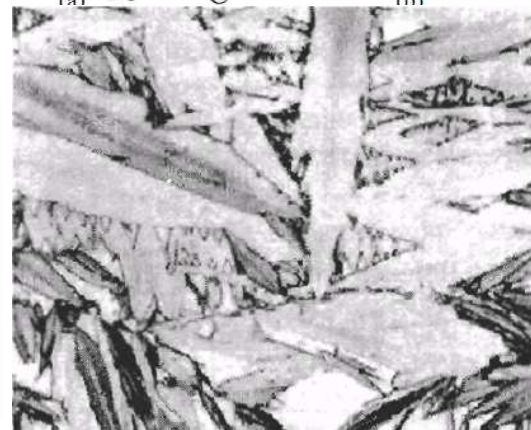
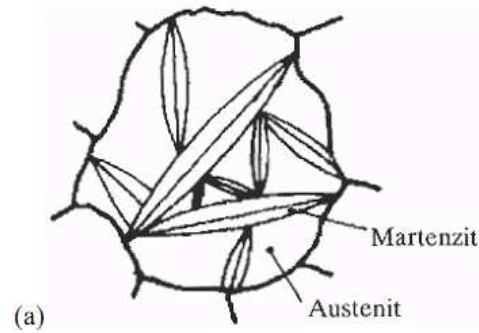
MARTENZITNA TRANSFORMACIJA



Mikrostruktura paketastog martenzita kod niskougleničnog čelika, uvećano $\times 800$.



Post parametara rešetke c i a od % ugljenika.

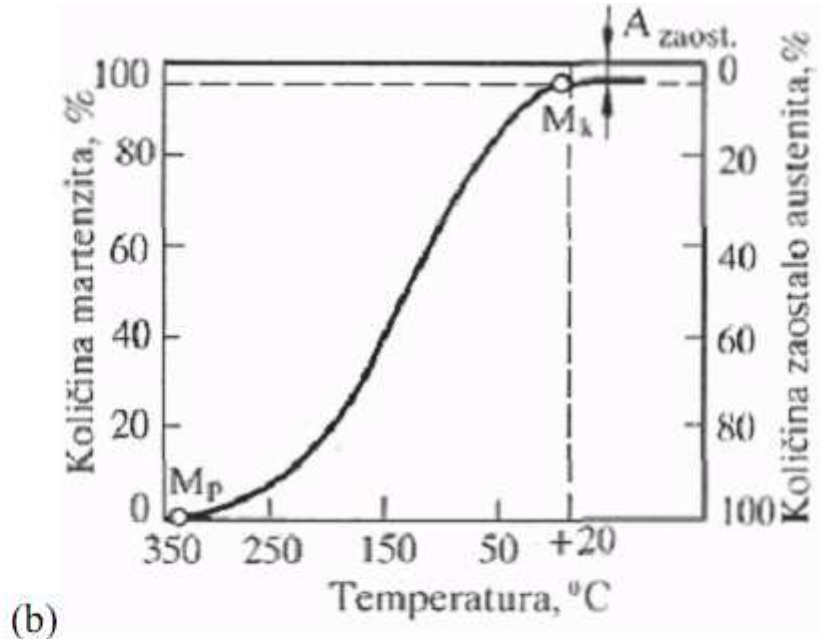
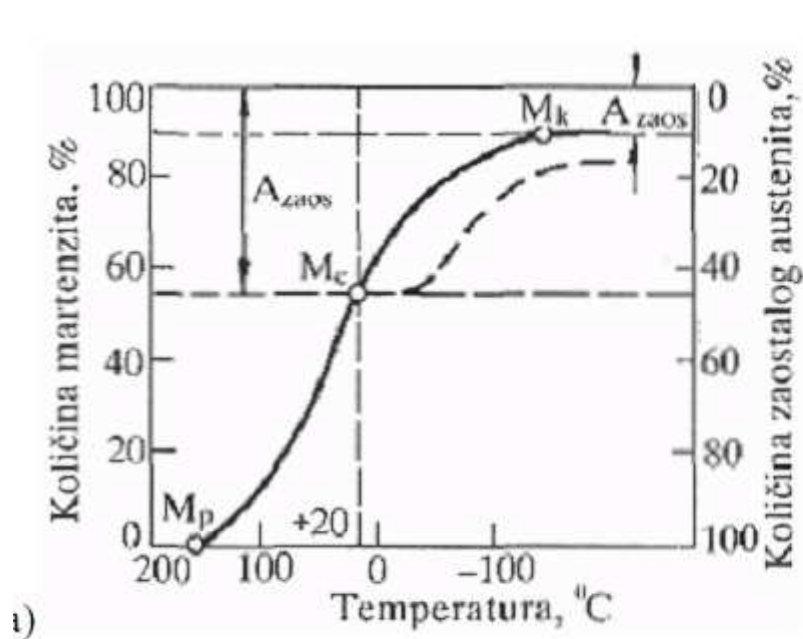


Pločasti kristali martenzita obrazuju se kod visokougleničnih čelika ($> 0,8\% C$).

MARTENZITNA TRANSFORMACIJA

- Ispod 180°C (martenzitna oblast) iz veoma podhladjenog austenita nastaje martenzit.
- Bezdifuziona transformacija austenita koja ne zavisi od vremena trajanja procesa već samo od temperature.
- Martenzitna transformacija nastaje kada brzina hladjenja stabilnog austenita dostigne vrednost kritične brzine, tako da se austenit bez predhodnog oslobađanja ugljenika transformiše u presićeni čvrsti α - čvrsti rastvor.
- Struktura čelika koja se dobija pri uslovima kritične brzine hladjenja naziva se **martenzit**.

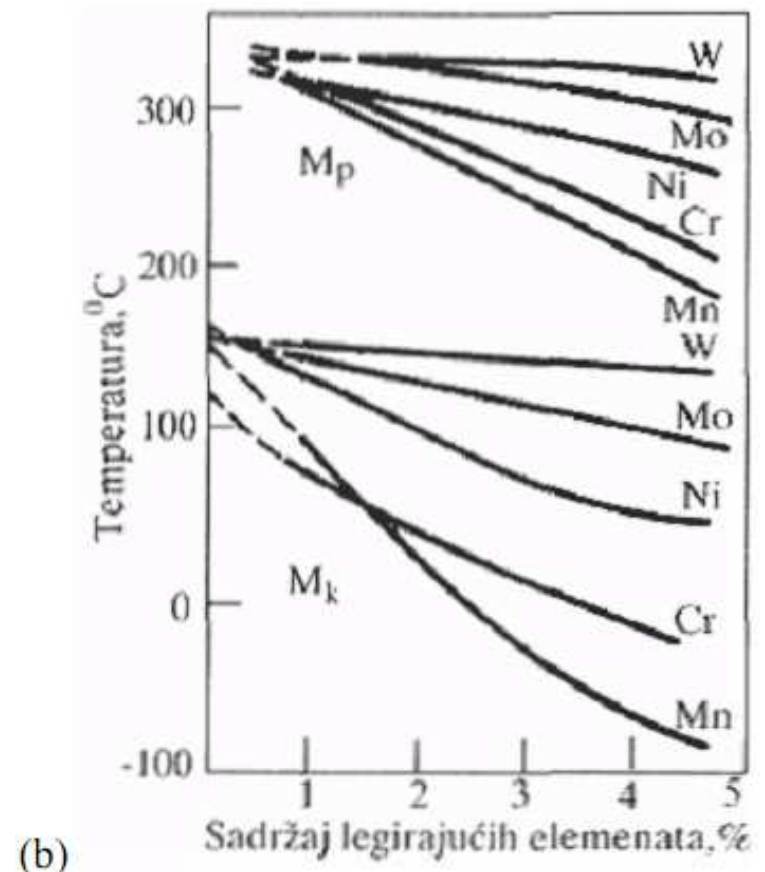
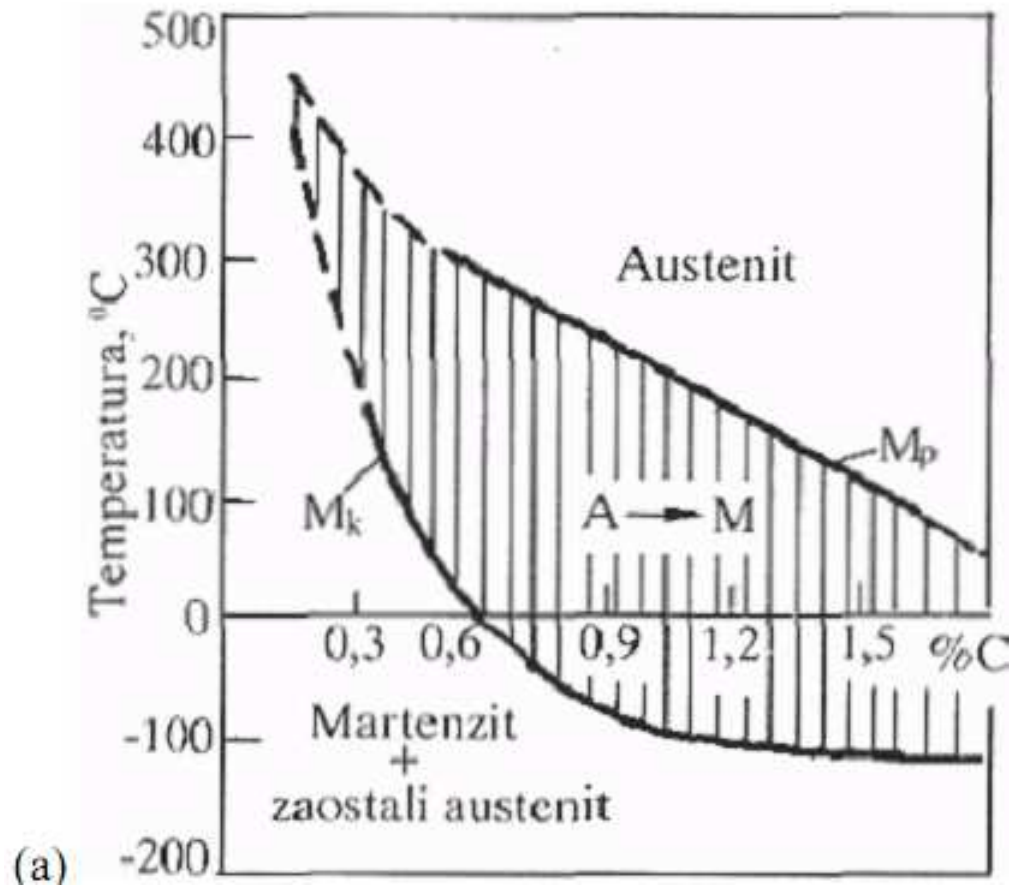
Krive martenzitne transformacije



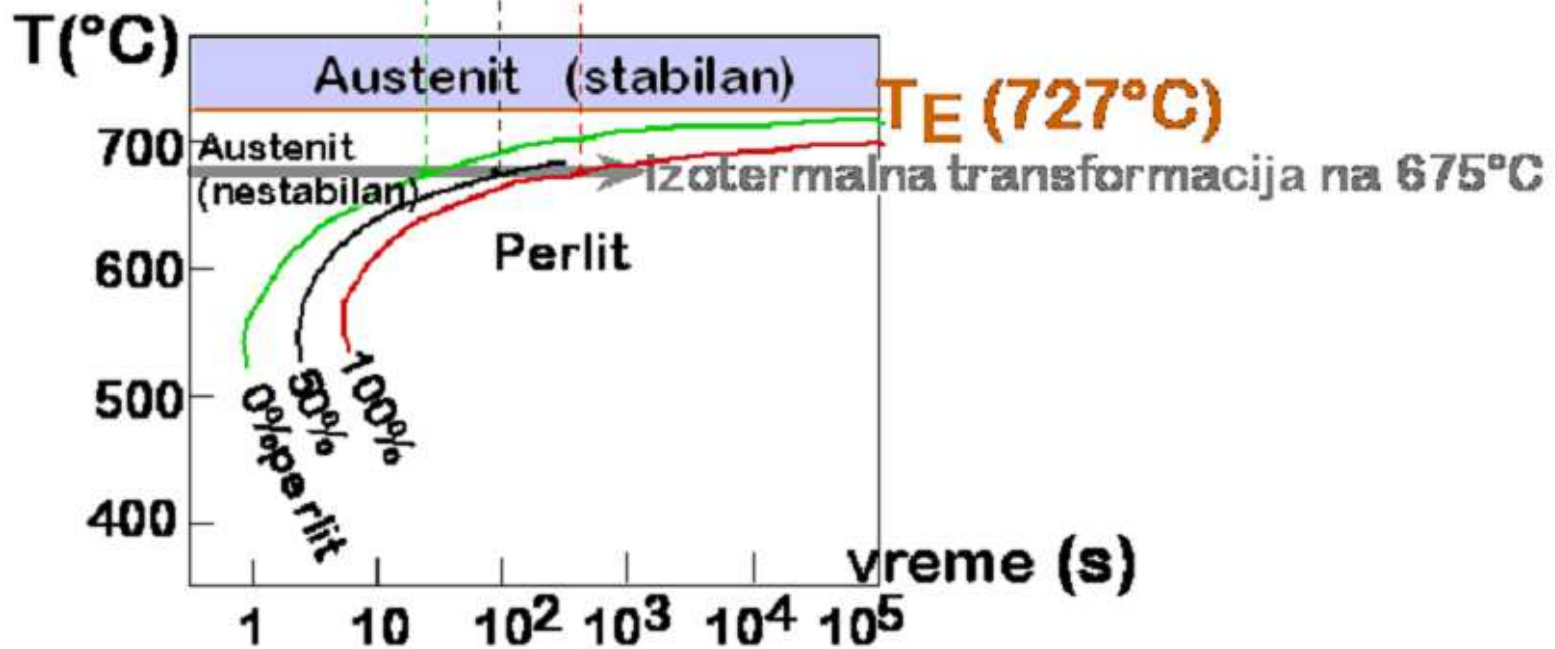
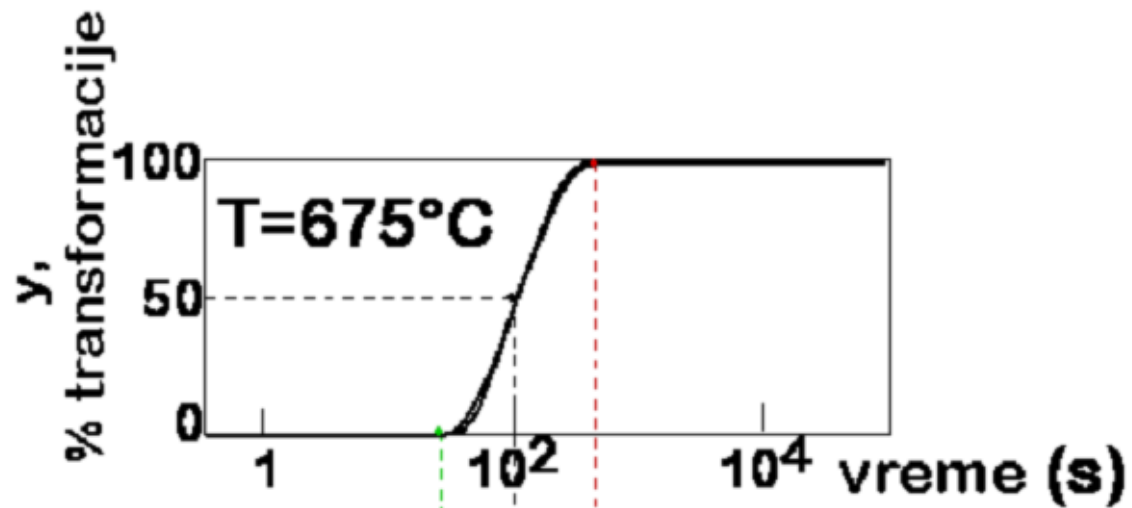
T_p -temperatura početka transformacije martenzita

T_k - temperatura završetka transformacije martenzita

- a) Uticaj sadržaja ugljenika na M_p i M_k
- b) Uticaj legirajućih elemenata na M_p i M_k



Dijagrami izotermalnog razlaganja

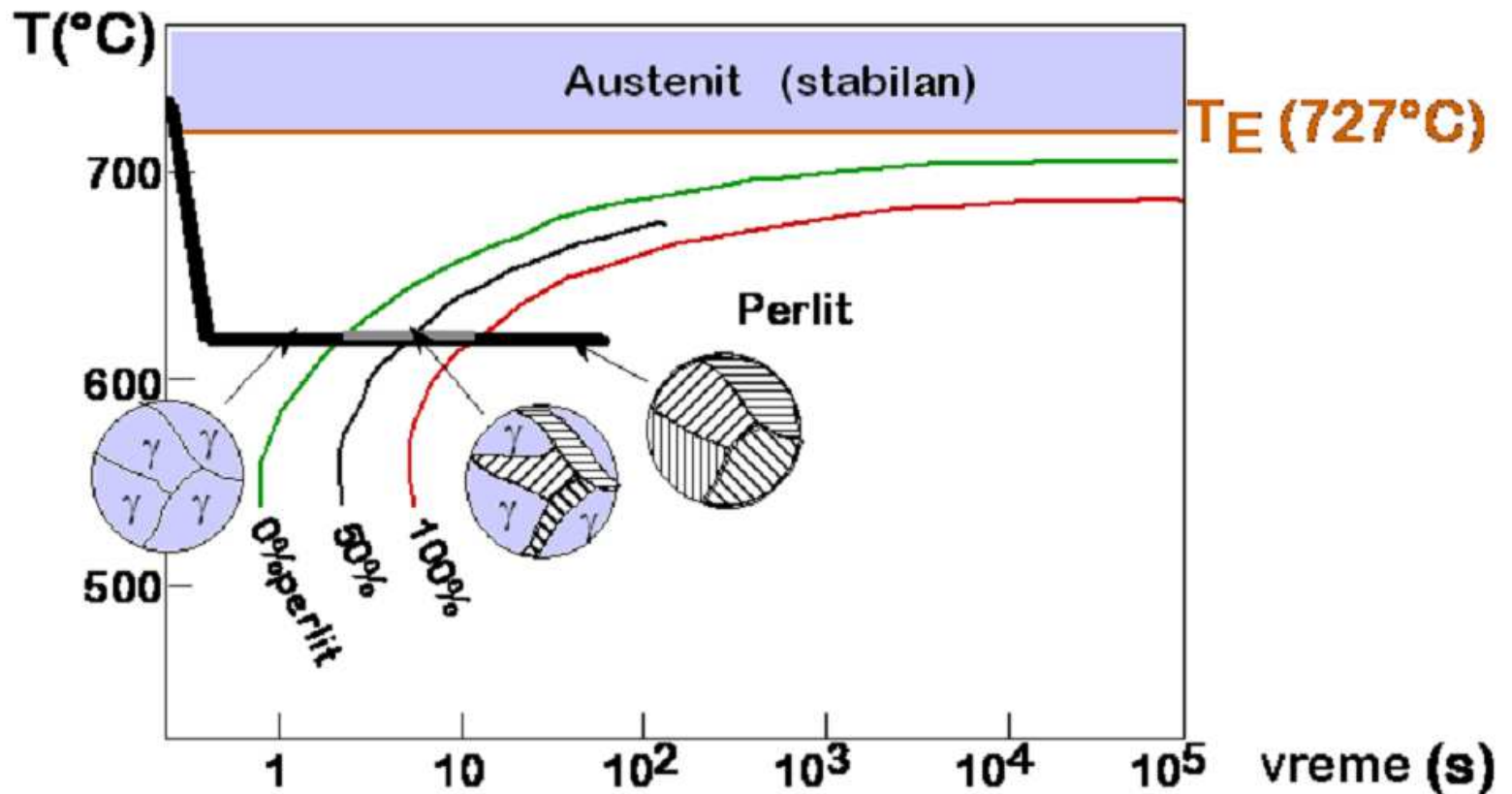


Primer: Tok hladjenja Fe-C sistema

Eutektoidni sastav, $C_0 = 0,77\%C$

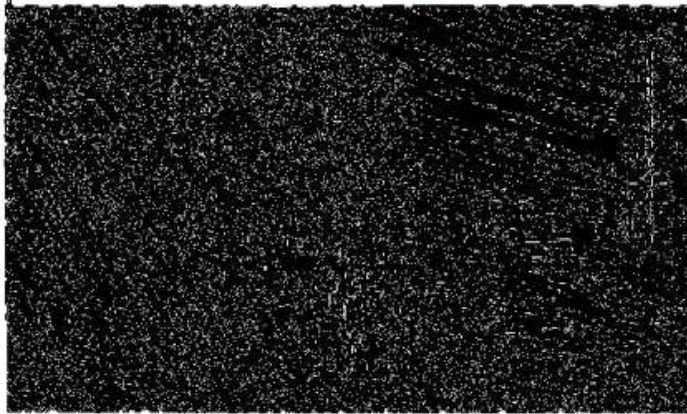
Početak na $T > 727^\circ C$

Brzo hladjenje do $625^\circ C$ i izotermalno držanje



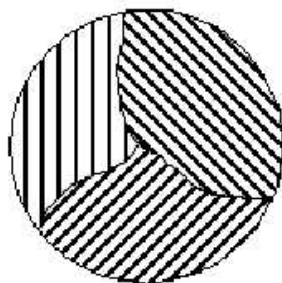
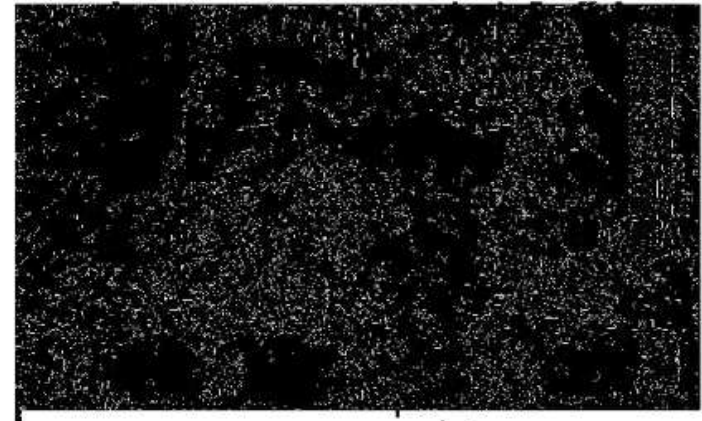
Morfologija perlita

- $T_{\text{transf.}}$ odmah ispod T_E
--viša T : difuzija je brža
--perlit je krupnijeg zrna

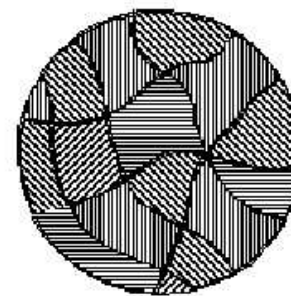


10 μm

- $T_{\text{transf.}}$ dosta ispod T_E
--niža T : difuzija je sporija
--perlit je finiji



- za manje ΔT :
kolonije su
veće



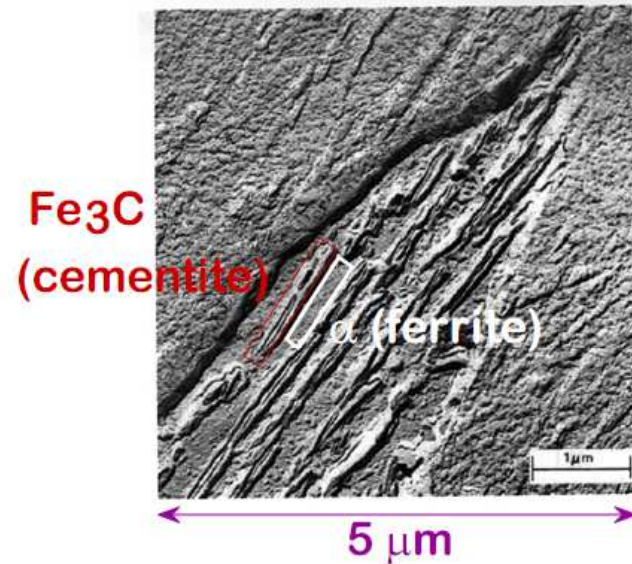
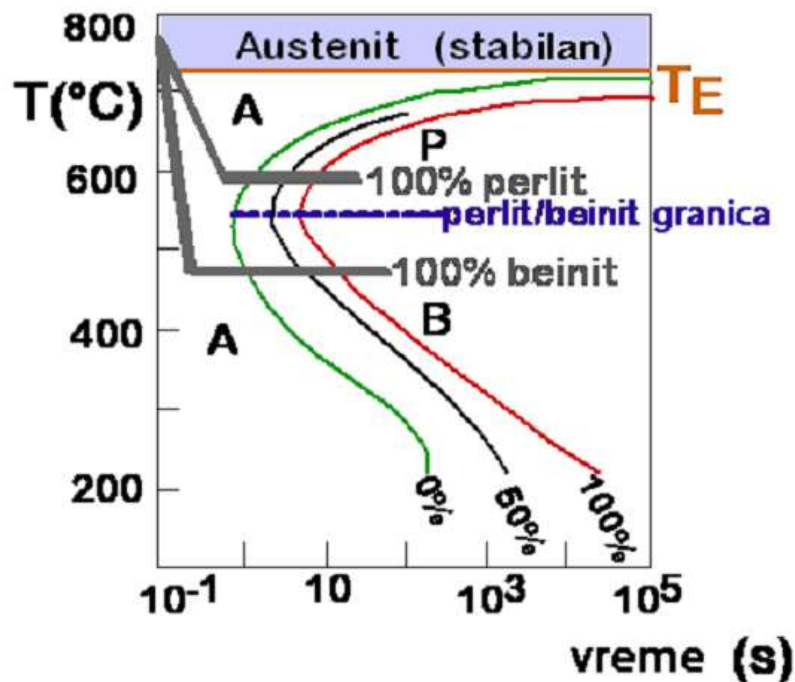
- za veće ΔT :
kolonije su
manje

Sorbit, Trustit i Bainit

- **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. Tvrdoća 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, 4000HB, a mekši od beinita, odnosno martenzita.
- **Bainit** se dobija pri brzini hladjenja 100 do 150°C/s, kao medjustruktura trustita i martenzita. Bainit je tvrdi od trustita, 5000HB, a mekši od martenzita.

Proizvodi neravnotežne transformacije Fe-C

- Beinit:
 - a lamele (trake) sa izduženim iglicama Fe₃C
 - difuzija je kontrolisana
- Dijagram izotermalne transf.

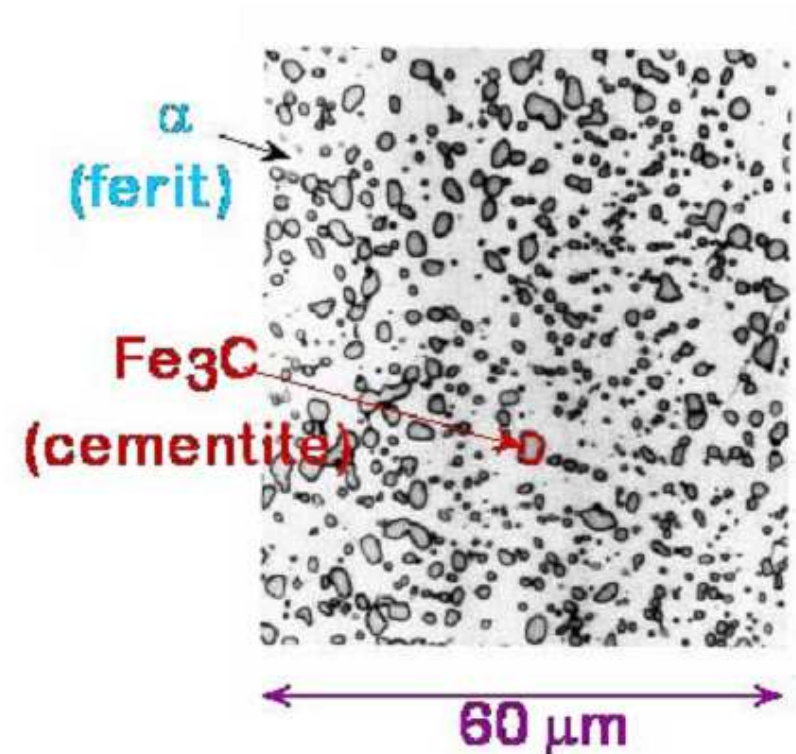
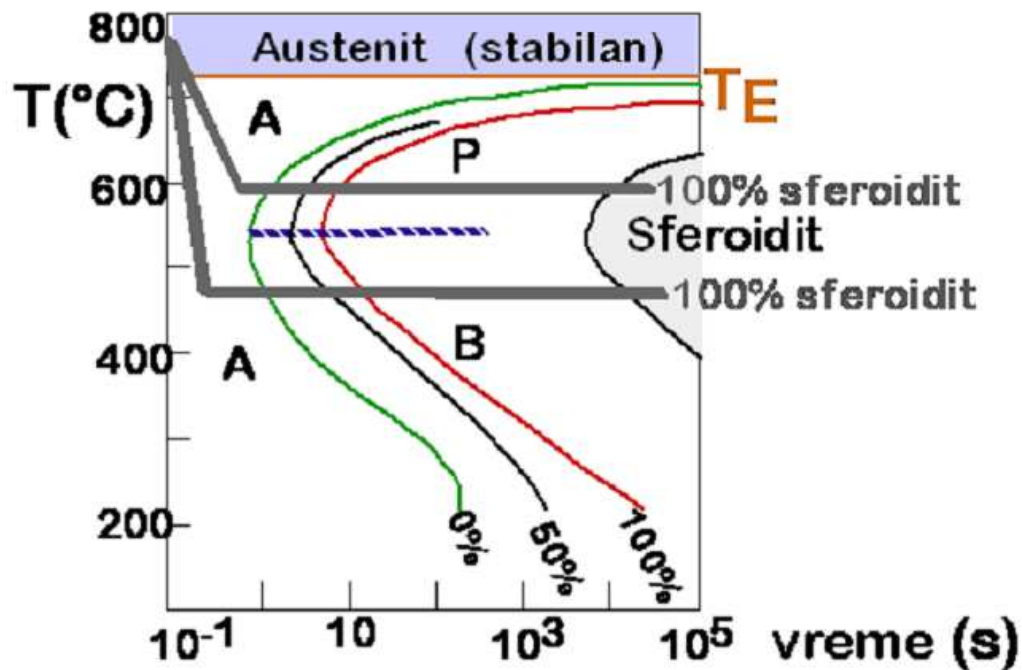


Brzina beinitne reakcije:

$$r_{\text{beinit}} = e^{-Q/RT}$$

Drugi produkti Fe-C

- Sferoidne strukture:- α kristali sa sfernim Fe_3C , difuzno zavisne
- Dugim zagrevanjem beinita ili perlita smanjuje se površina granica zrna
- Dijagram izotermalne transformacije



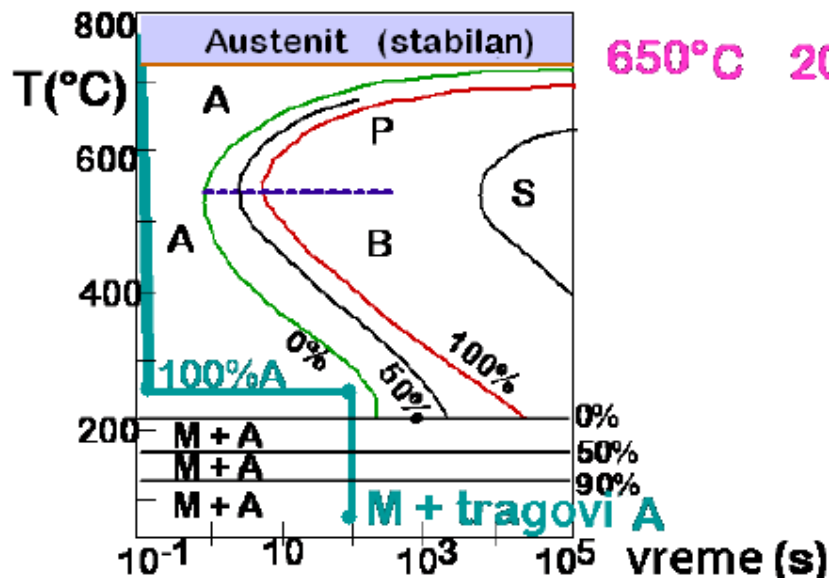
Primer podhladjenja Fe-C

PR. POTHLADENJA: Fe-C SISTEM (2)

- $C_0 = C_{\text{eutektoid}}$
- Tri istorije...

Brzo hlađenje do:	Drža- nje: 10^4 s	Brzo hlađenje do:	Drža- nje: 10^3 s	Brzo hlađenje do:
350°C	10^4 s	T_{sobna}		
250°C	10^2 s	T_{sobna}		
650°C	20s	400°C	10^3 s	T_{sobna}

II slučaj

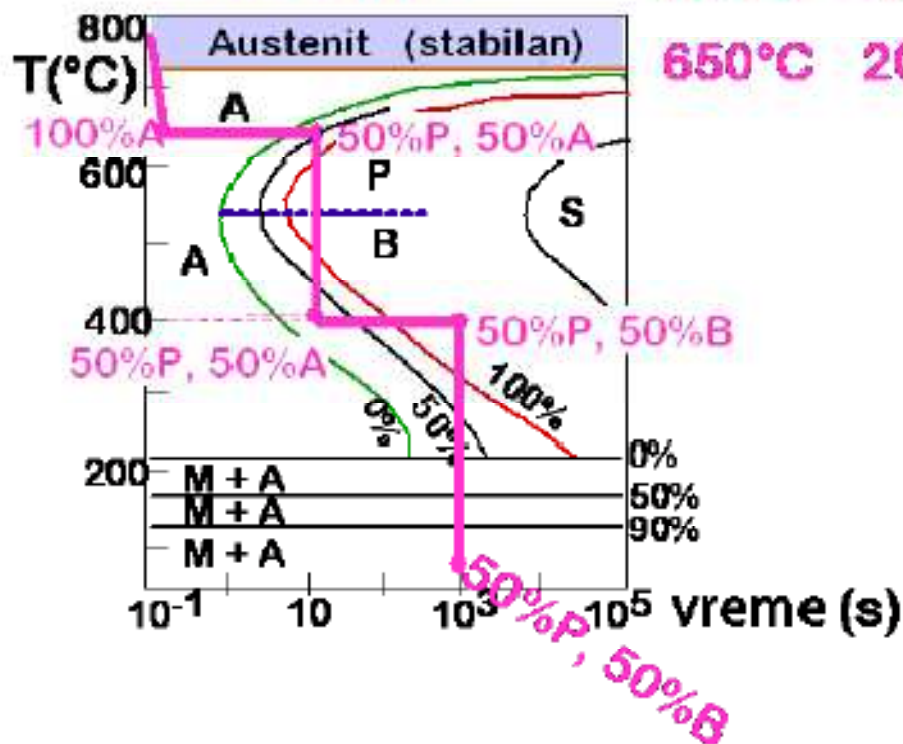


PR. POTHLAĐENJA: Fe-C SISTEM (3)

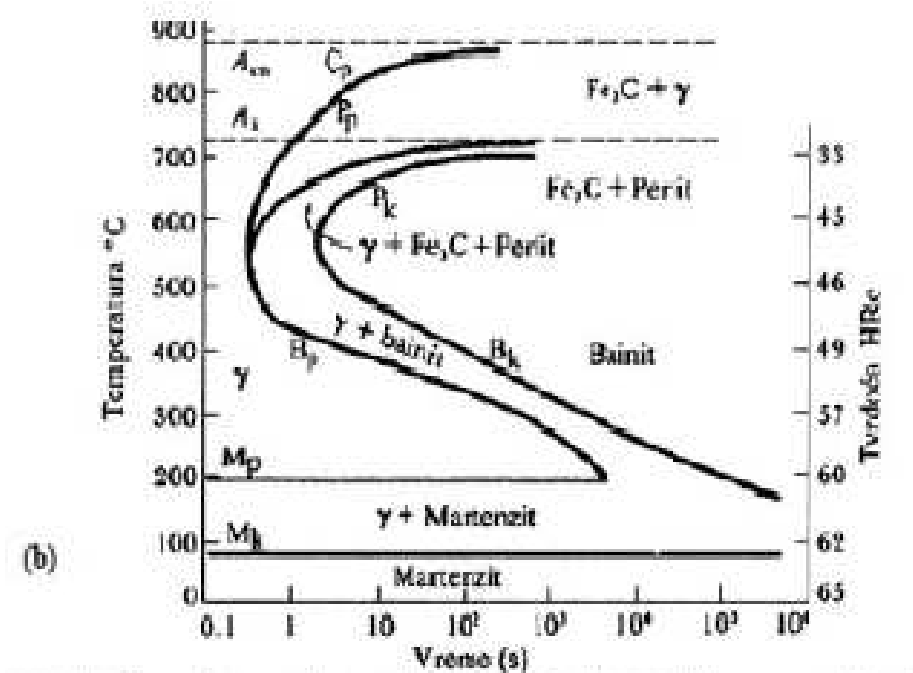
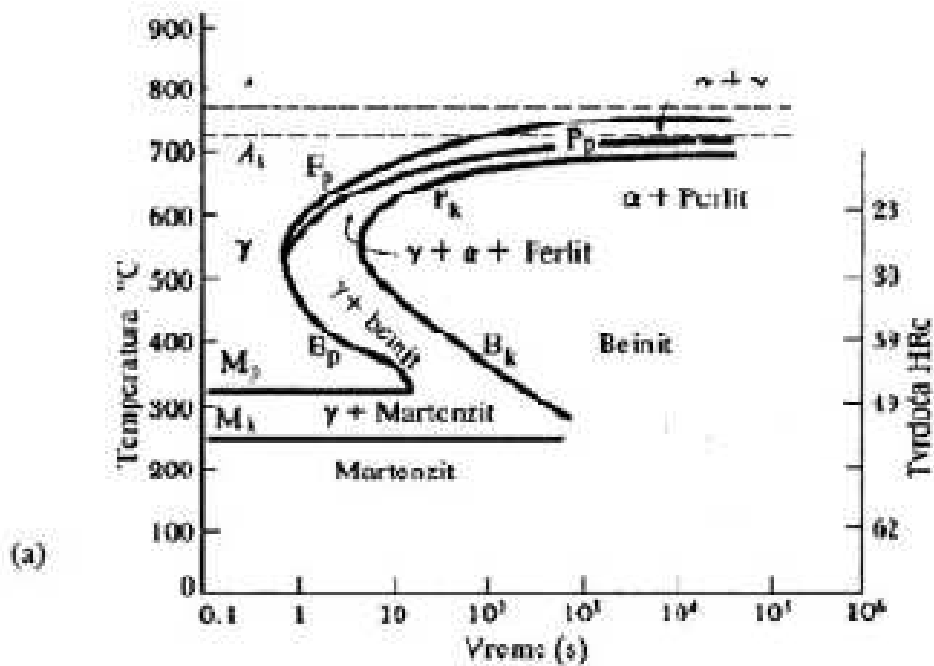
- $C_0 = C_{\text{eutektoid}}$
- Tri istorije...

Brzo hlađenje do:	Drža- nje:	Brzo hlađenje do:	Drža- nje:	Brzo hlađenje do:
350°C	10^4 s	T_{sobna}		
250°C	10^2 s	T_{sobna}		
650°C	20s	400°C	10^3 s	T_{sobna}

III slučaj



Dijagram izotermalnog razlaganja austenita ili TTT dijagram



- a) Dijagram izotermalnog razlaganja austenita ili TTT dijagram za podeutektoidni čelik
- b) Dijagram izotermalnog razlaganja austenita za nadeutektoidni čelik

Mehaničke osobine Fe-C sistem (1)

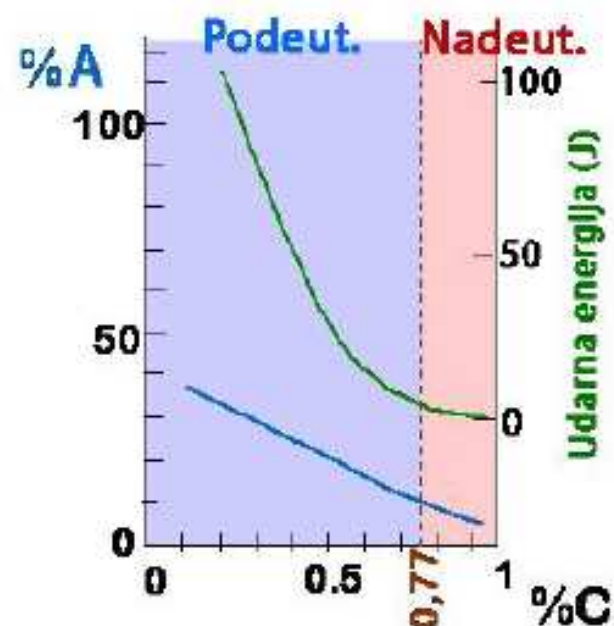
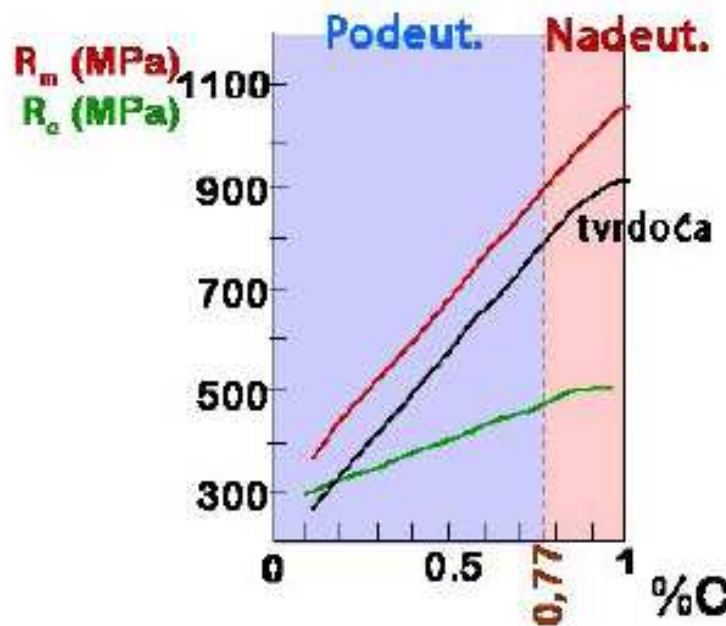
- Uticaj %C



$C_0 < 0,77\%C$
Podeutektoid



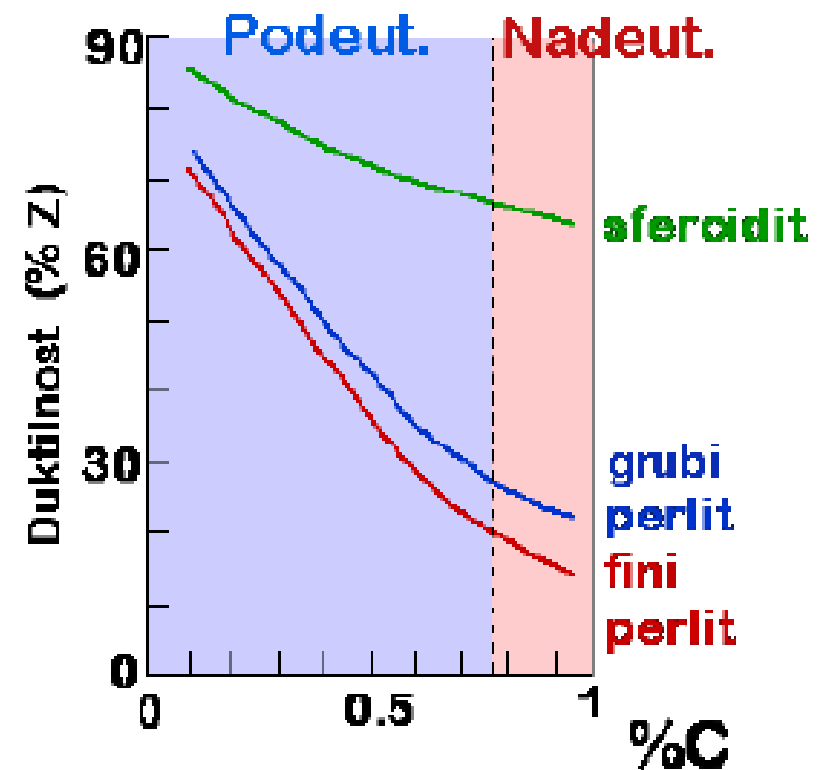
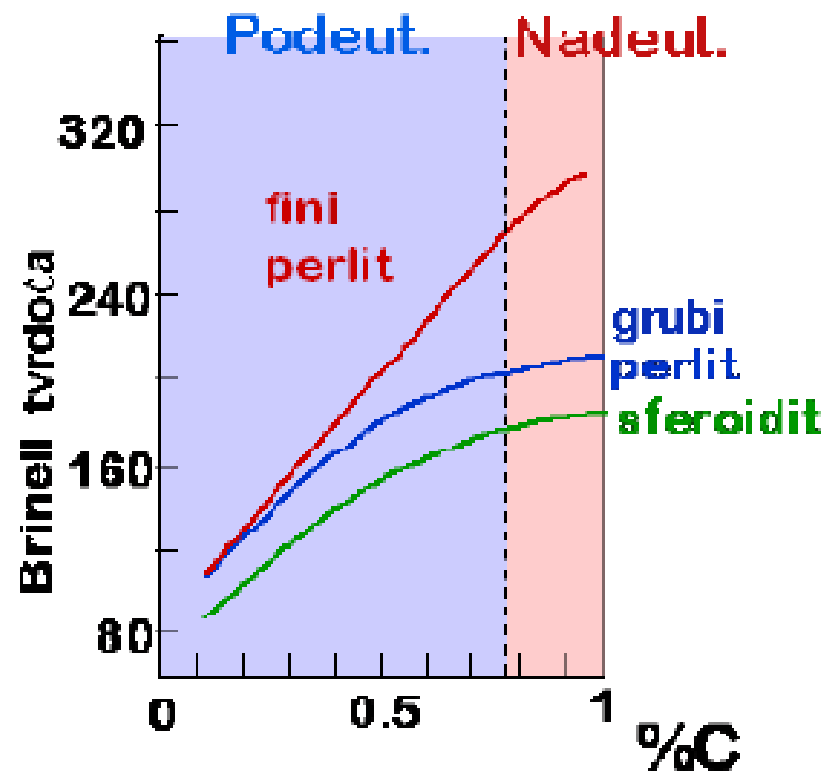
$C_0 > 0,77\%C$
Nadeutektoid



- Veći %C: R_m i R_e rastu, A opada.

Mehaničke osobine Fe-C sistem (2)

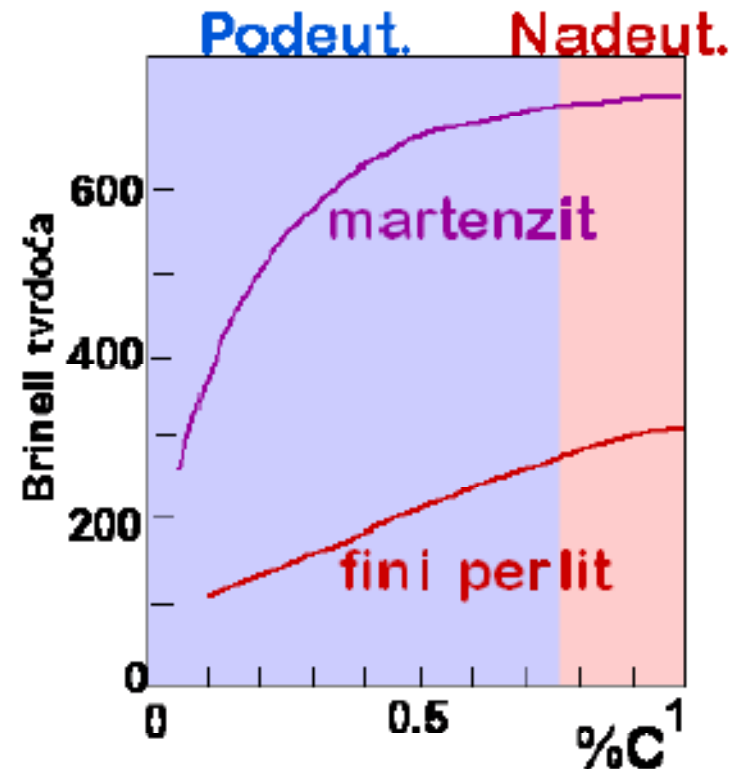
- Fini perlit, grubi perlit i sferoidit



- Tvrdoća: fini > grubi > sferoidit
- %Z: fini < grubi < sferoidit

Mehaničke osobine Fe-C sistem (3)

- Fini perlit i martenzit:



- Tvrdoća: fini perlit \ll martenzit

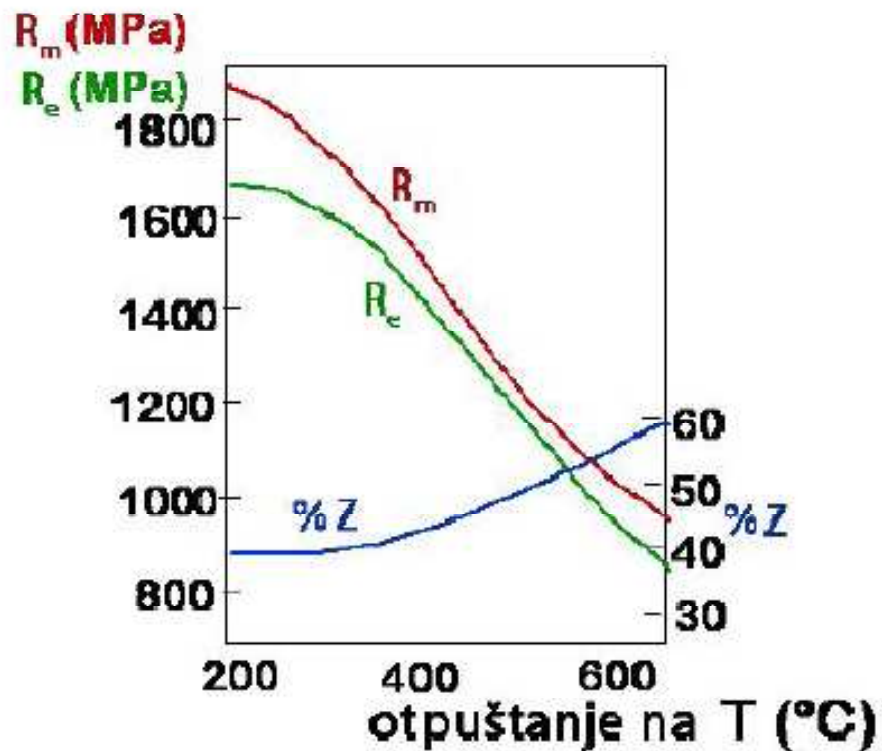
OTPUŠTANJE MARTENZITA

- Struktura dobijena hladjenjem, brzinama većim od kritične jeste martenzit i zaostali austenit.
- Struktura martenzita je krta i veoma tvrda, što ograničava oblast primene.
- Zaostali naponi uneti u procesu hladjenja imaju efekat slabljenja.
- Prelaz u stabilno stanje mora biti praćen transformacijom martenzita i zaostalog austenita u feritno-cementitnu strukturu.
- Plastičnost i žilavost martenzita može se povećati, a unutrašnji naponi ukloniti naknadnim zagrevanjem-OTPUŠTANJEM.
- Karakter i brzina transformacije martenzita i zaostalog austenita uslovljeni su temperaturama zagrevanja pri otpuštanju.

OTPUŠTANJE MARTENZITA

- Pri zagrevanju (otpuštanju) kaljenog čelika uočavaju se četiri oblasti temperatura transformacije:
- Prva transformacija obavlja se na temperaturama do 200°C
- Druga transformacija –u temperaturnom intervalu od 200-300°C,
- Treća- u intervalu od 400 do 600°C

OTPUŠTANJE MARTENZITA



- nastaju izuzetno male Fe_3C čestice okružene sa α
- opadaju R_m i R_e , ali raste %Z

Razlaganje martenzita (I-prva transformacija pri otpuštanju)

- na temperaturama do 200°C
- Smanjuje se zapremina što je u vezi sa promenama u tetragonalnoj rešetki martenzita.
- Rezultat razlaganja martenzita na temperaturi **do 200°C** naziva se **otpušteni martenzit** koji se sastoji od prezasićenog α -čvrstog rastvora i ϵ -karbida

Transformacija zaostalog austenita II

transformacija pri otpuštanju

- U temperaturnom intervalu od 200 do 300°C nastavlja se razlaganje martenzita tako što se sadržaj ugljenika u njemu smanjuje.
- Istovremeno se transformiše zaostali austenit u donji beinit.
- Smanjenjem sadržaja ugljenika u čvrstom rastvoru tetragonalnost rešetke postaje neznatna.

Uklanjanje unutrašnjih napona i transformacija karbida- III

transformacija pri otpuštanju

- U temperaturnom intervalu od 300 do 400°C potpuno se završava proces izdvajanja ugljenika iz α -čvrstog rastvora (martenzita)
- Izdvajanje feritne rešetke i karbida sa istovremenom transformacijom ε -karbida u cementit Fe_3C .
- MENJA SE OBLIK I VELIČINA KARBIDNIH ČESTICA OD LAMELARNOG KA SFERNOM!
- OTPUŠTENI TRUSTIT JE REZULTAT REAKCIJE.

Ukrupnjavanje karbida IV transformacija pri otpuštanju

- U temperaturnom intervalu od 400 do 600°C dolazi do ukрупnjavanja zrna cementita ($\sim 1\mu\text{m}$).
- Dobijena struktura naziva se otpušteni sorbit.

Uticaj temperature otpuštanja na mehanička svojstva čelika Č1730

