

Mašinski materijali 3

- *prvo malo ponavljanje...*

Polimorfija Fe

Železo (Fe) se, u f-ji od temperature, u čvrstom stanju javlja u 2 modifikacije:

- **α (i δ)** železo, sa zapreminski centriranom kubnom rešetkom (KZC)
- **γ** železo, sa površinski centriranom kubnom rešetkom (KPC).

➤ α železo (α -Fe):

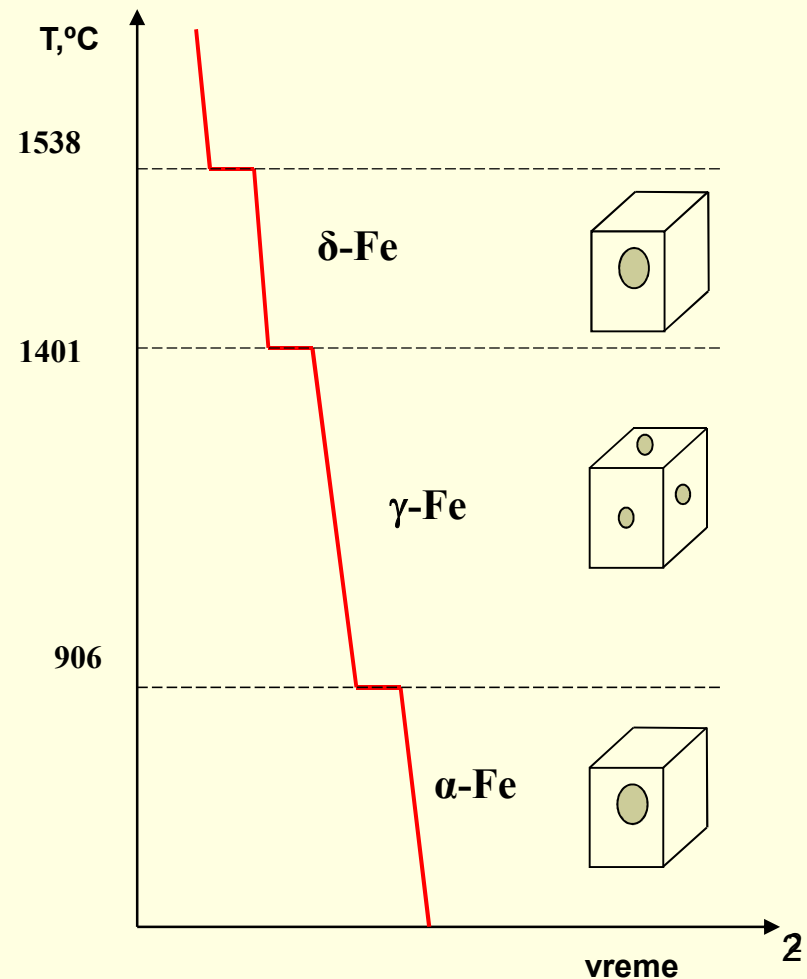
- KZC;
- $T=20-906\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- fizičke osobine (magnetičnost):
 - $T=20-769\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$ feromagnetično α -Fe,
 - $T=769-906\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$ paramagnetično β -Fe.(α -Fe, β -Fe = ZCKR)

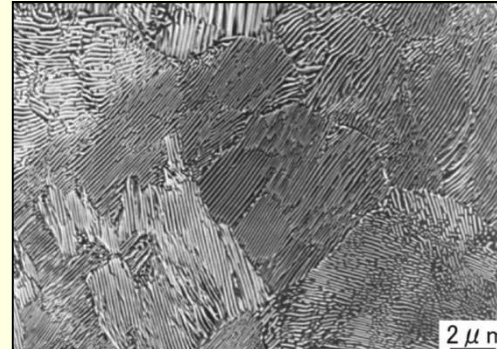
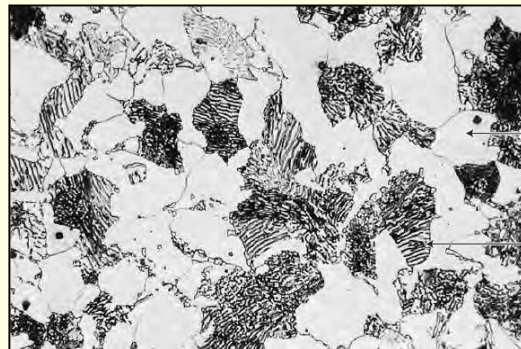
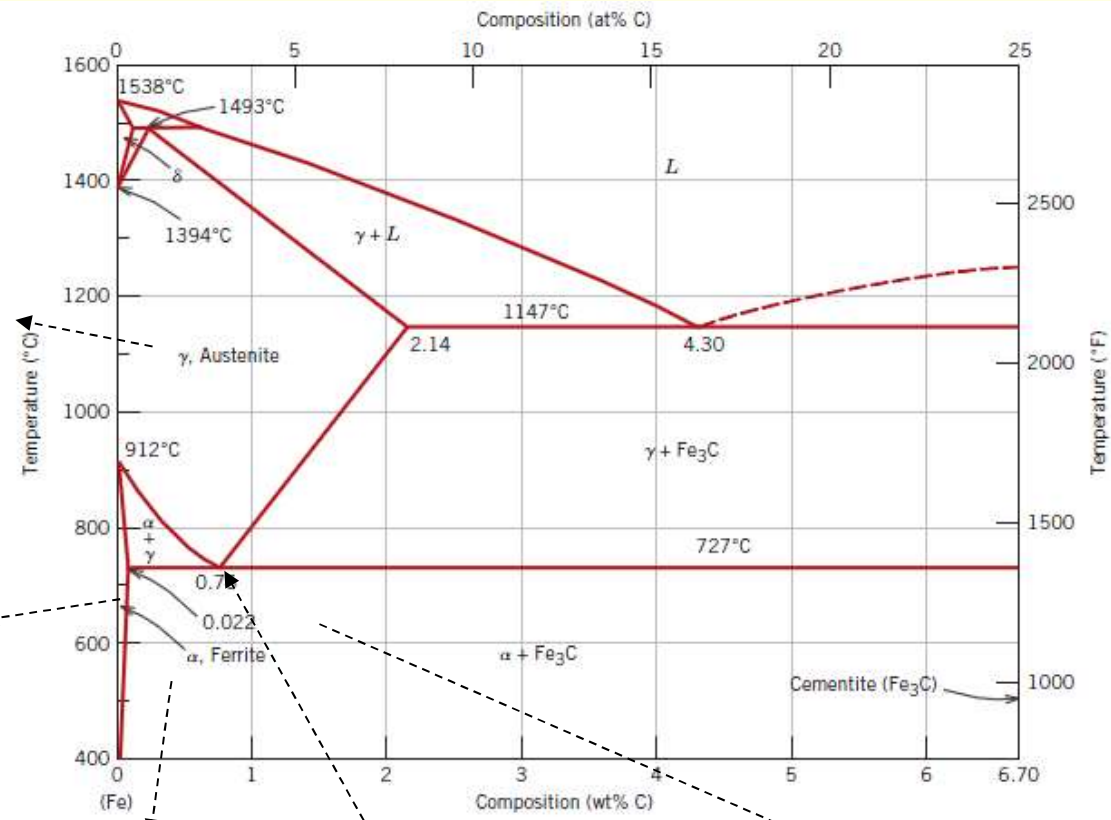
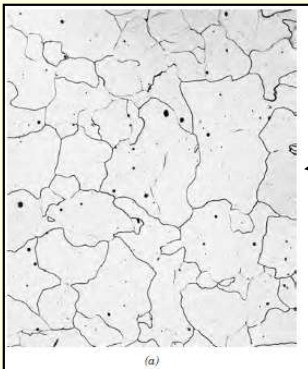
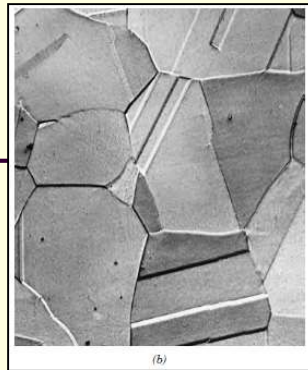
➤ γ železo (γ -Fe):

- KPC;
- $T=906-1401\text{ }^{\circ}\text{C}$.

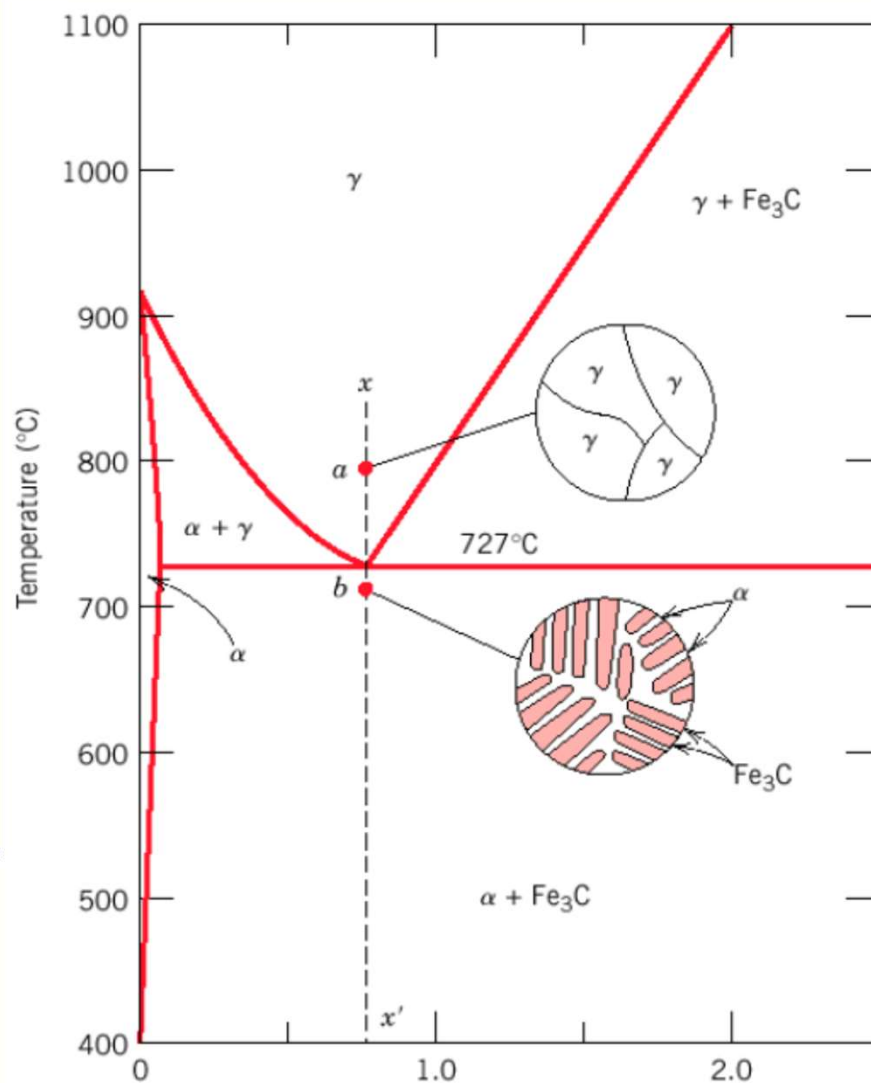
➤ δ železo (δ -Fe):

- KZC;
- $T=1401-1538\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_{top}).
- značajno za visoko legirane čelike;
 - stabilnost na visokim T.

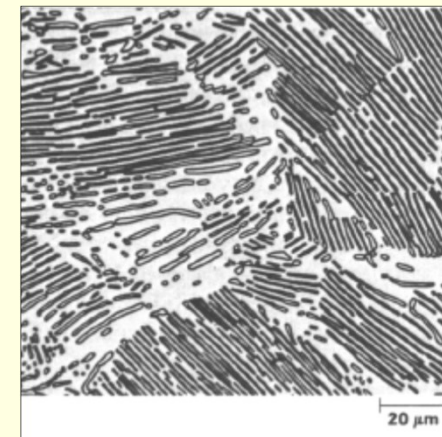
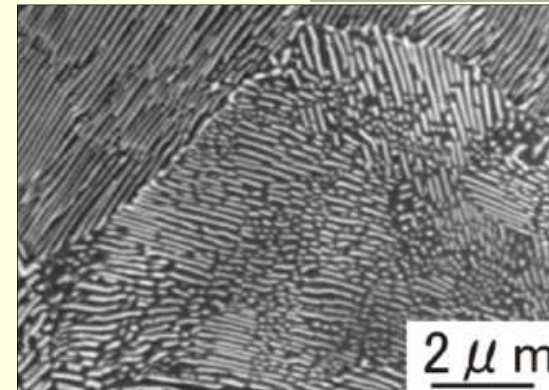
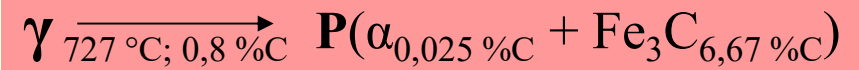




EUTEKTOIDNI ČELICI

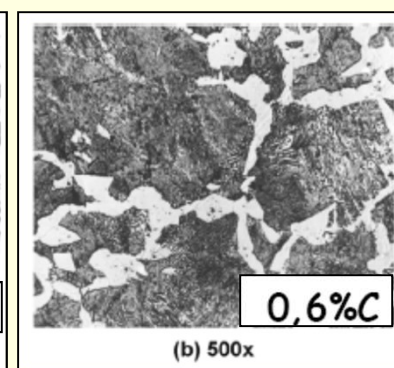
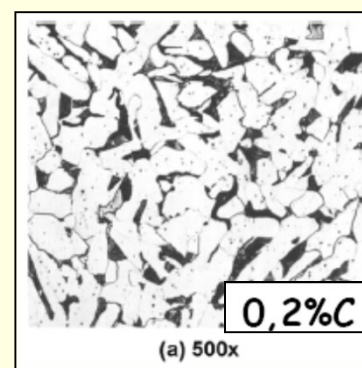
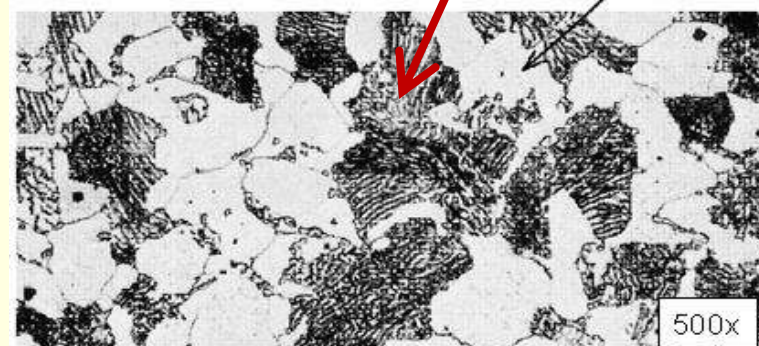
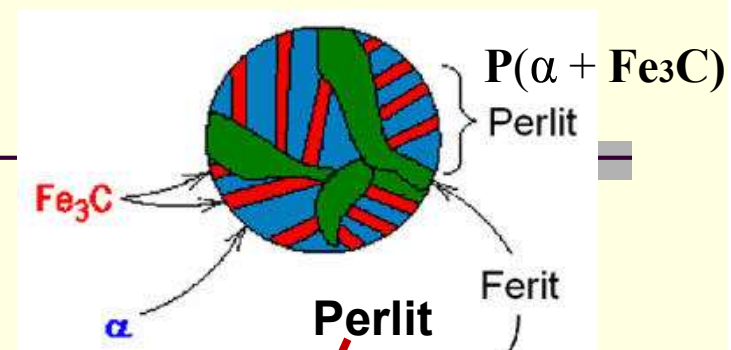
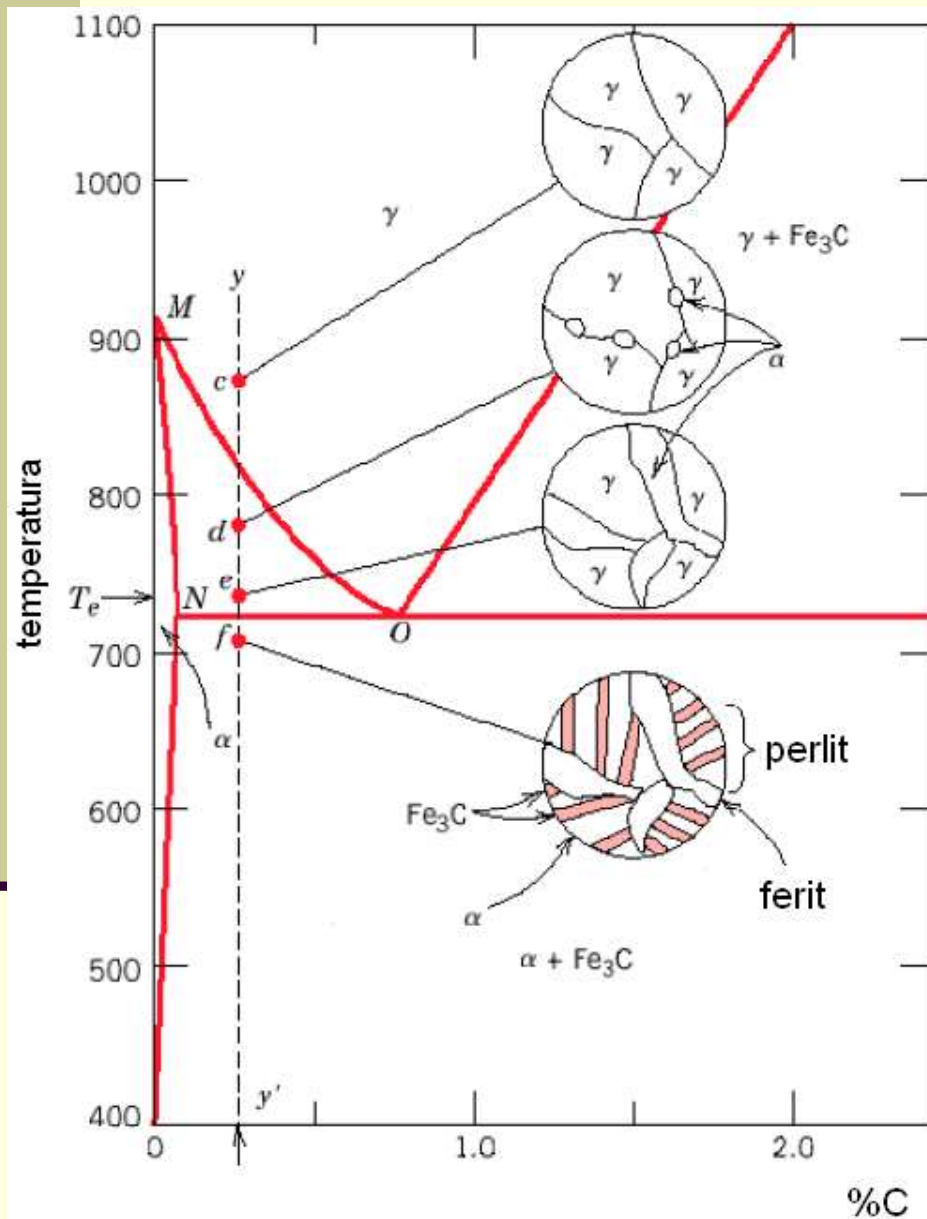


PERLIT



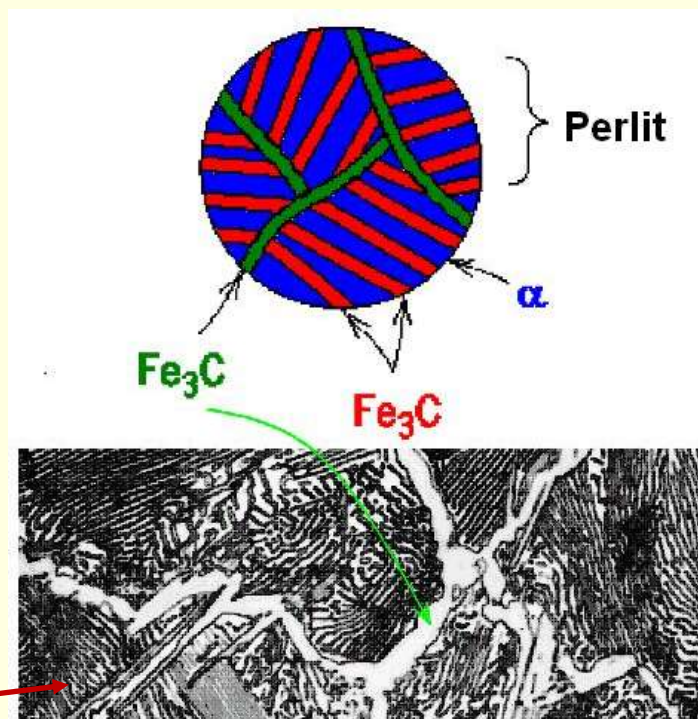
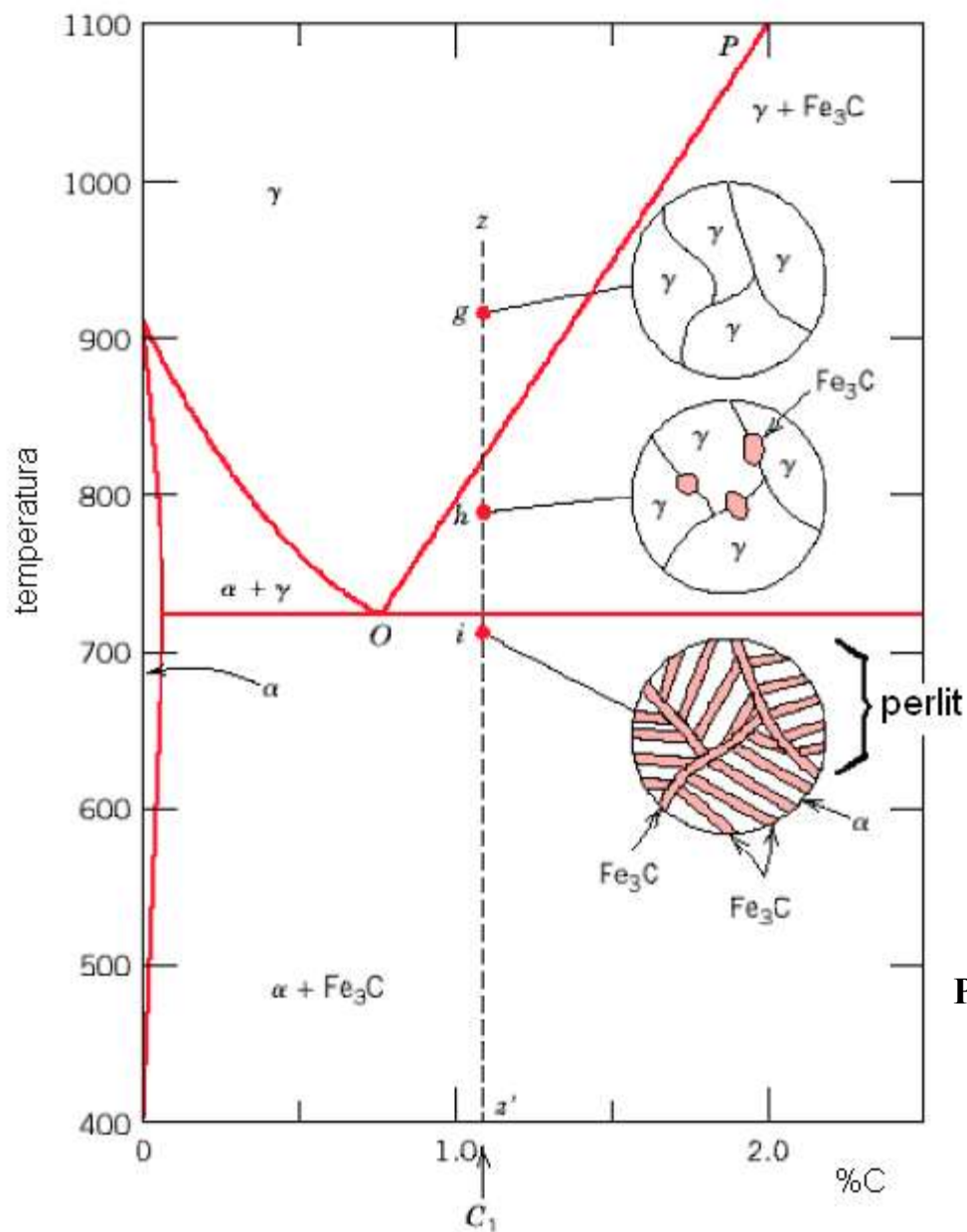
Mikrostruktura perlita

PODEUTEKTOIDNI ČELICI



Mikrostrukture podeutektoidnih čelika

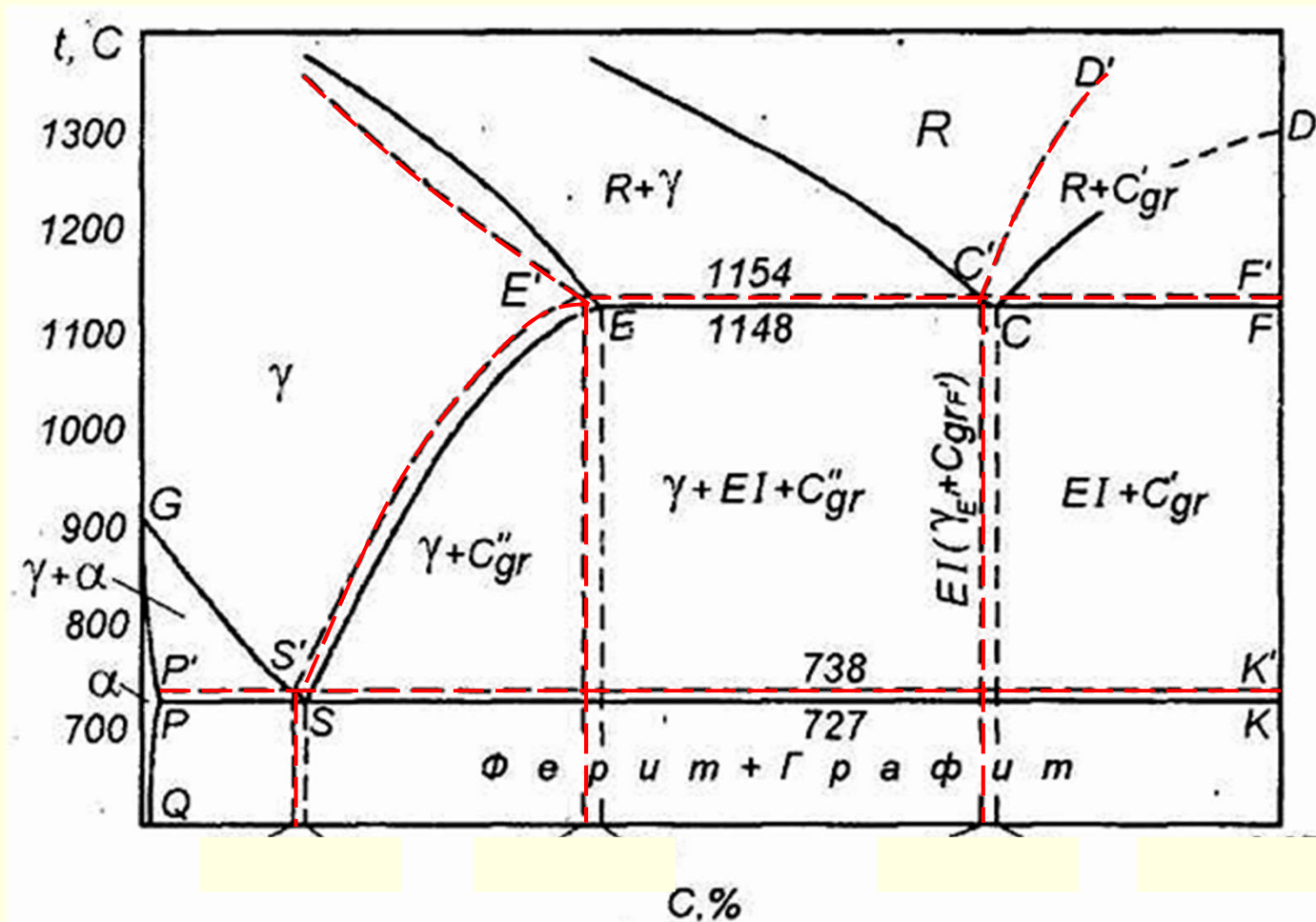
NADEUTEKTOIDNI ČELICI



Mikrostruktura nadeutektoidnog čelika

Stabilni dijagram stanja (Fe-C)

Tačka	E'	C'	S'
Sadržaj ugljenika - %	2,08	4,26	0,68
Temperatura - °C	1154	1154	738

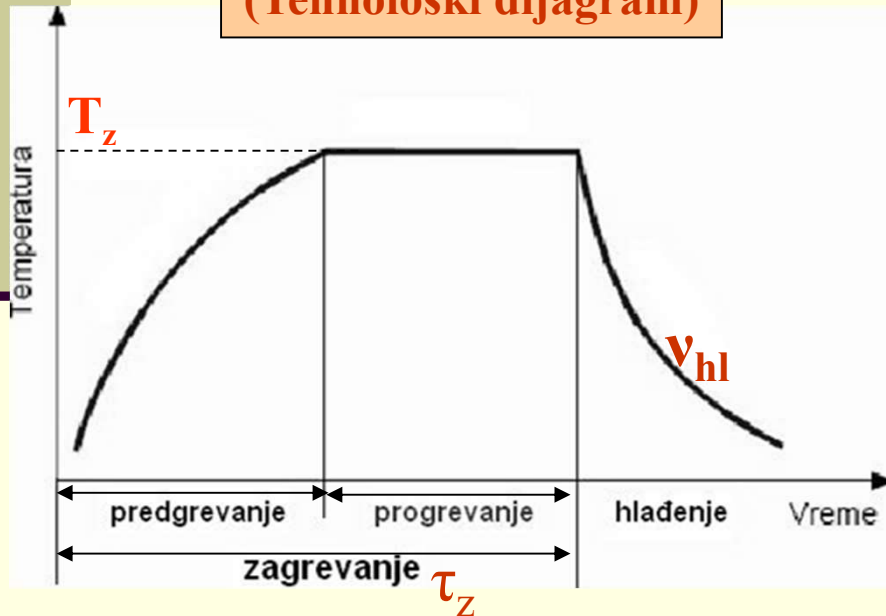


Termička obrada (TO) je tehnološki proces koji se sastoji iz:

1. **Zagrevanja** legure do određene temperature (predgrevanje),
2. **Držanja na datoj temperaturi** određeno vreme (progrevanje), i
3. **Hladjenja**, potrebnom brzinom hlađenja (v_{hl}), do sobne temperature.

Cilj TO je **promena** svojstava legura, i to faznim i strukturnim promenama u čvrstom stanju.

**Dijagram režima TO
(Tehnološki dijagram)**



Režimi TO su definisani sa **3 parametra**:

1. **Temperatura zagrevanja (T_z)**
2. **Vreme zagrevanja (τ_z)**
3. **Vreme hlađ. (τ_{hl}) ili brzina hlađenja (v_{hl}).**

Podela TO čelika:

1. Žarenje BEZ fazne transformacije.

- Rekristalizaciono žarenje i
- Žarenje radi uklanjanja zaostalih unutraš. napona

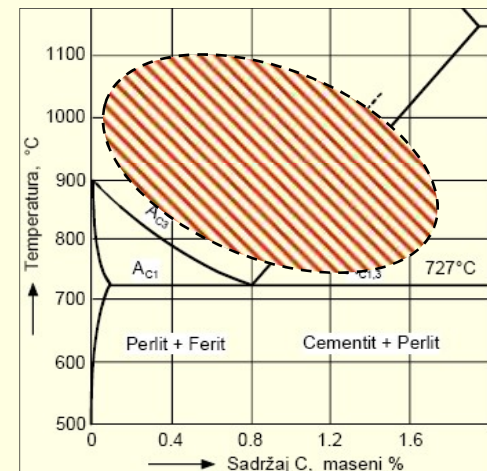
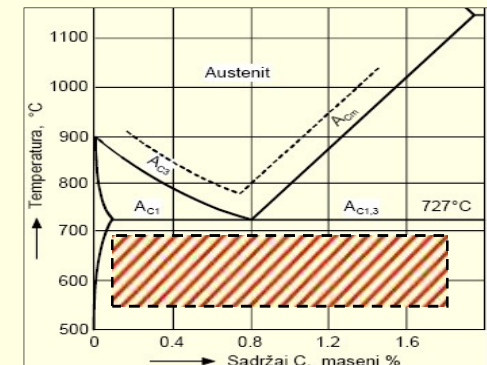
2. Žarenje SA faznom transformacijom.

- Meko žarenje (sferoidizacija),
- Normalizaciono žarenje (normalizacija),
- Potpuno žarenje i
- Difuzionno žarenje (homogenizacija).

3. Kaljenje

- površinsko
- zapreminsko.

4. Otpuštanje (nisko, srednje i visoko).



ŽARENJE čelika generalno

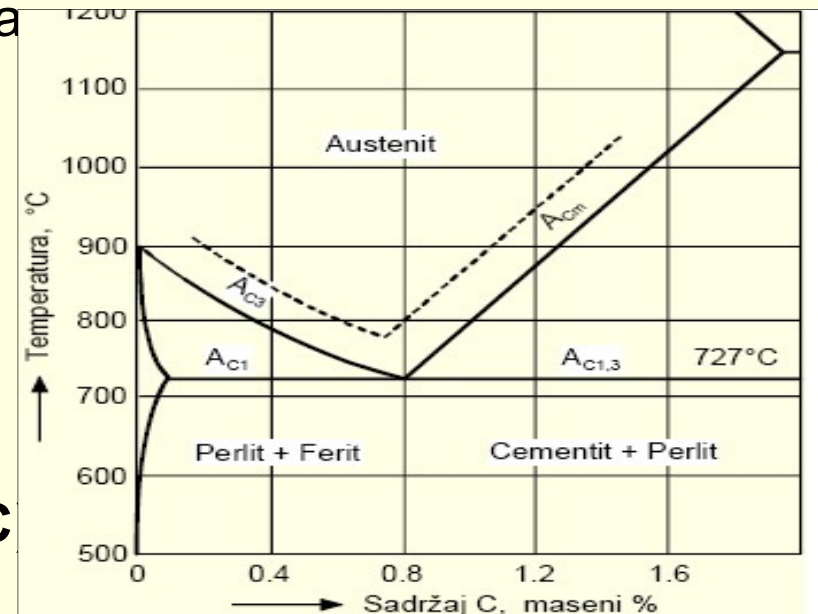
Žarenjem se postiže uspostavljanje strukturne ravnoteže koja je poremećena nekim prethodnim postupkom termičke ili mehaničke obrade.

Cilj žarenja je da se:

- popravi obradljivost čelika,
- homogenizuje neujednačena struktura
- uklone unutrašnji naponi,
- smanji tvrdoća,
- poveća plastičnost i žilavost, itd.

Posle žarenja se dobija:

- perlitno-feritna struktura (**P+ α**);
- perlitna struktura (**P**);
- perlitno-cementitna struktura (**P+Fe₃C**)



1. Žarenje BEZ fazne transformacije

1.1) REKRISTALIZACIONO ŽARENJE (prethodno plastično deformisano na hladno)

Parametri režima rekristalizacije:

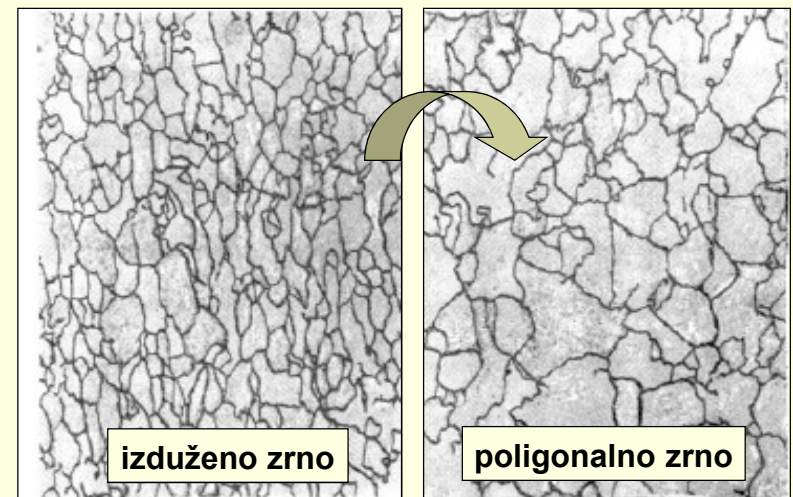
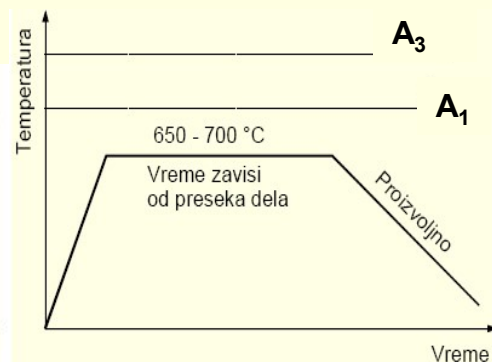
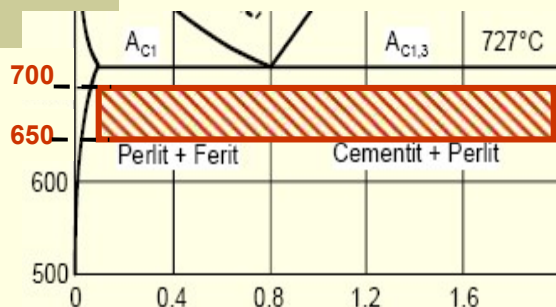
1. **Zagrevanje** legure do $T > T_{\text{rekris.}}$ (**650-700°C**);
2. **Držanje** na toj temperaturi (**kratkotrajno** kod tankih preseka; a **veoma dugo** kod debel preseka → ujednačeno progrevanje i rekristalizacija po celom preseku);
3. **Hladjenje** proizvoljnom brzinom (najčešće na vazduhu).

$T_{\text{rekris.}}$ metala i legura zavisi od temperature topljenja (T_t).

Niskouglični čelici imaju $T_r \approx 650^\circ\text{C}$, što predstavlja granicu prerade na toplo i hladno.

Cilj rekristalizacije je:

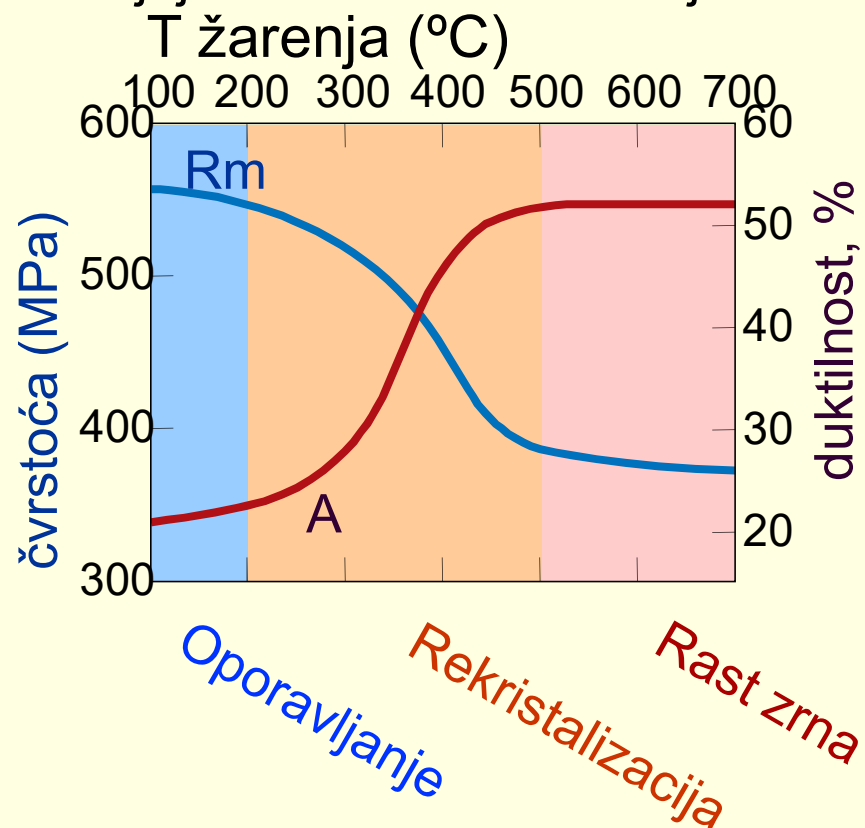
- otklanjanje posledica deformisanja na hladno (kod niskouglič.Č);
- promena oblika zrna (izdužena → poligonalna zrna, a struktura ($\alpha + P$) ostaje ista);
- omogućava se dalja prerada presovanjem, valjanjem i vučenjem.



Rekristalizaciono žarenje

Procesi tokom zagrevanja posle hladne deformacije

- npr 1 h TO na $T_{\text{žarenja}}$ dovodi do značajnog smanjenja R_m i R_{eH} i povećanja $A\%$.
- efekat hladne deformacije se poništava!
- procesi koji se odvijaju tokom rekristalizacije:

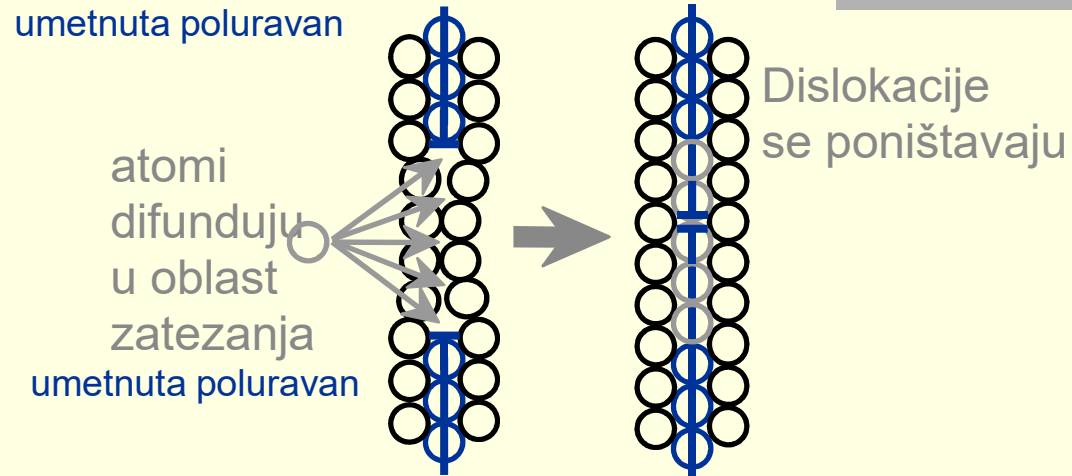


Rekristalizaciono žarenje

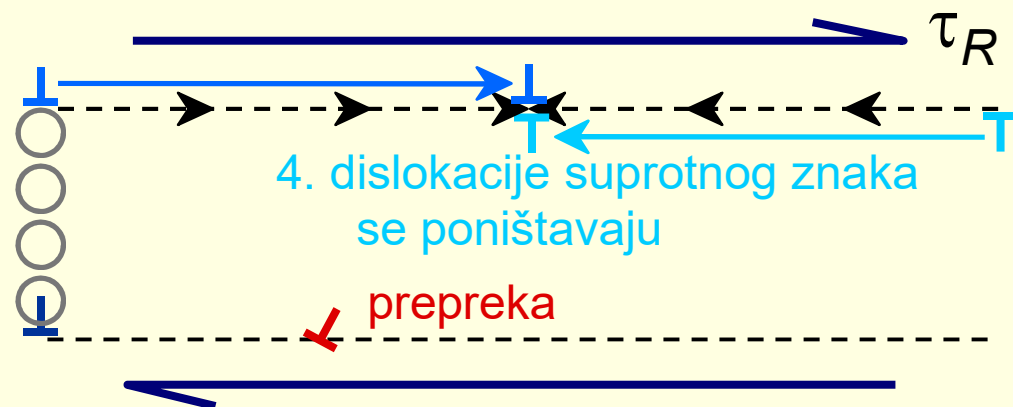
Oporavljanje

Zbog zagrevanja opada gustina dislokacija – one se poništavaju.

- 1 način
kao rezultat
difuzije



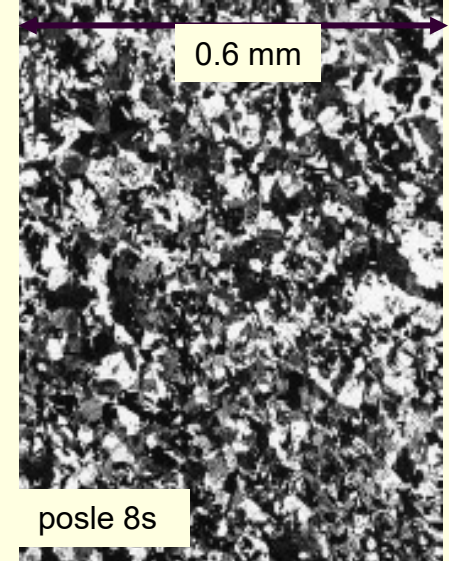
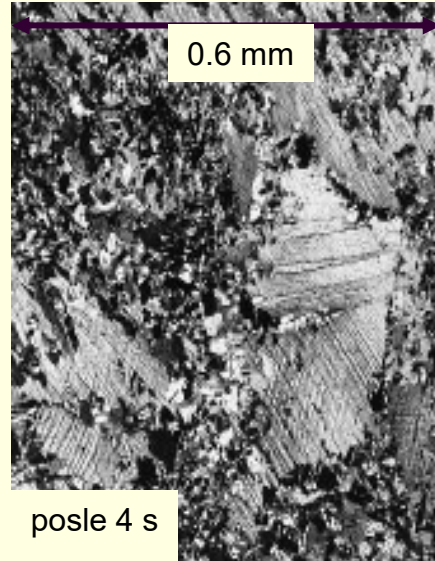
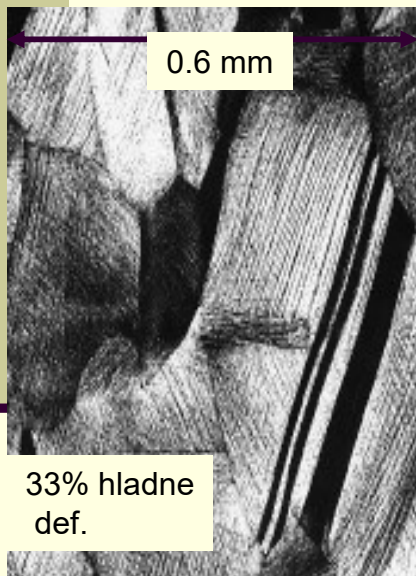
- 2 način
3. "Uspinjanje" disl.
na novu ravan i dalje
kretanje
2. sivi atomi difunduju
mehanizmom praznina
i disl. se premesti tj
uspinje
1. blokirana dislokacija



Rekristalizaciono žarenje

Rekristalizacija

- Tokom rekristalizacije se formiraju nova zrna:
 - nova zrna imaju malu gustinu dislokacija
 - zrna su mala
 - nastaju na račun hladno deformisanih zrna.

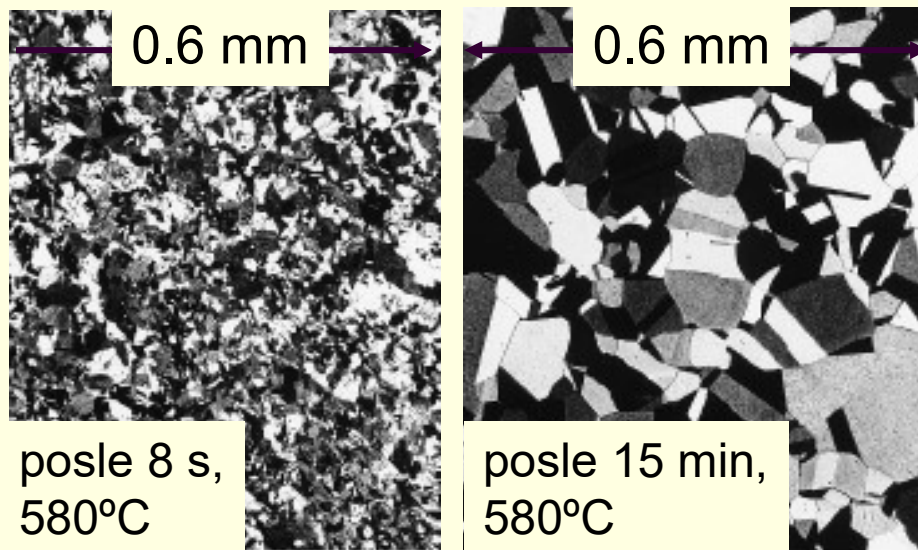


Materijal: mesing

Rekristalizaciono žarenje

Rast zrna

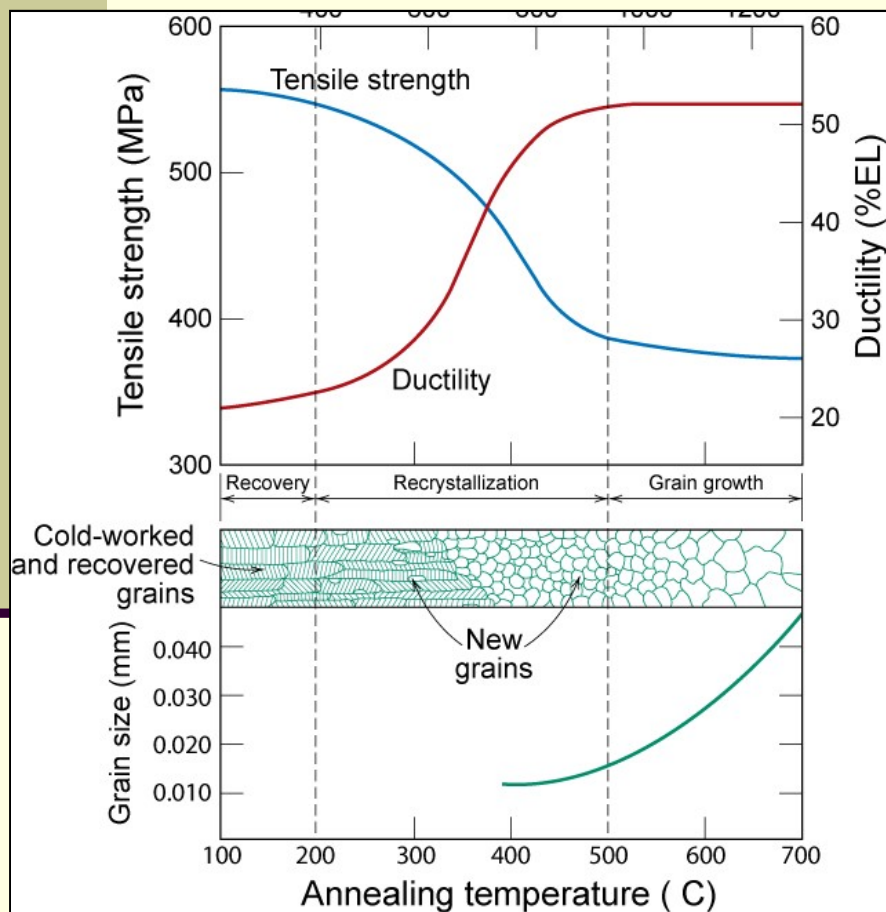
- Tokom dužeg vremena zagrevanja, velika zrna rastu na račun malih.
- Razlog – sa smanjenjem dužine granica zrna smanjuje se energija sistema.



- Empirijska relacija:

prečnik zrna u trenutku t. $n \sim 2$ $d^n - d_o^n = Kt$ koef. koji zavisi od T i materijala. proteklo vreme

Rekristalizaciono žarenje



T_R = temperatura rekristalizacije = najveća brzina promene osobina

- $T_R \approx 0.3-0.6 T_t$ (K)
- Čisti metali imaju nižu T_R zbog lakog kretanja dislokacija
- Za tehnički čiste metale $T_R \approx 0.3-0.4 \cdot T_t$, a
- za legure tipa čvrstog rastvora $T_R \approx 0.6 \cdot T_t$;
- Zbog difuzije, vreme žarenja i T_R su u korelaciji
 - kraće vreme žarenja => viša T_R
 - veći % deformacije => niža T_R

1.2) Žarenje radi uklanjanja zaostalih unutrašnjih (zaostalih) napona

Unutrašnji naponi nastaju usled:

- procesa plastične deformacije,
- mašinske obrade,
- nejednakog zagrevanja/hlađenja, npr. kod livenja, zavarivanja,...
- fazne transformacije - kada polazna i krajnja struktura imaju različite gustine

Takođe:

- Zaostali naponi mogu da izazovu krivljenje elementa ili čak lom
- Temperatura na kojoj se izvodi TO za uklanjanje zaostalih napona omogućuje da se zagrevanjem smanji napon tečenja materijala (opada sa porastom T) i materijal se tečenjem prilagodi naponskom polju i relaksira napone.
- T je obično niska da bi poništila efekat hladne deformacije
- Generalno, zatez.karakter zaostalih napona je nepovoljan, dok je pritisni povoljan sa aspekta nastanka prslina.

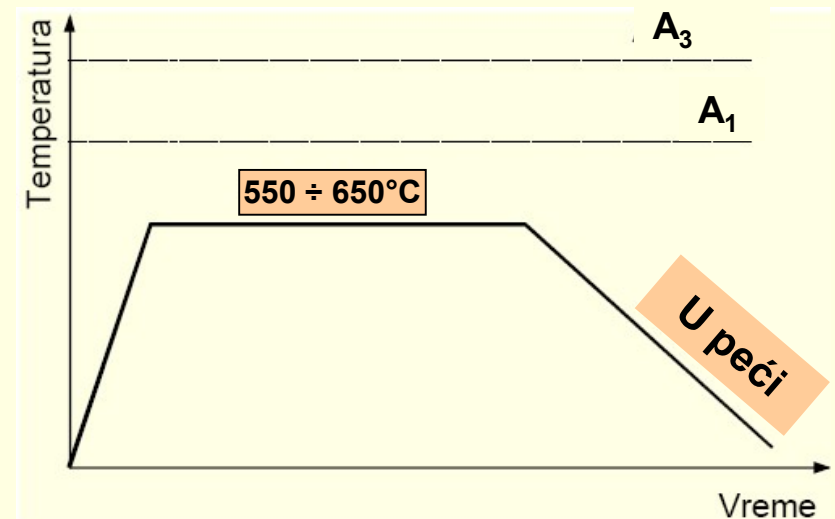
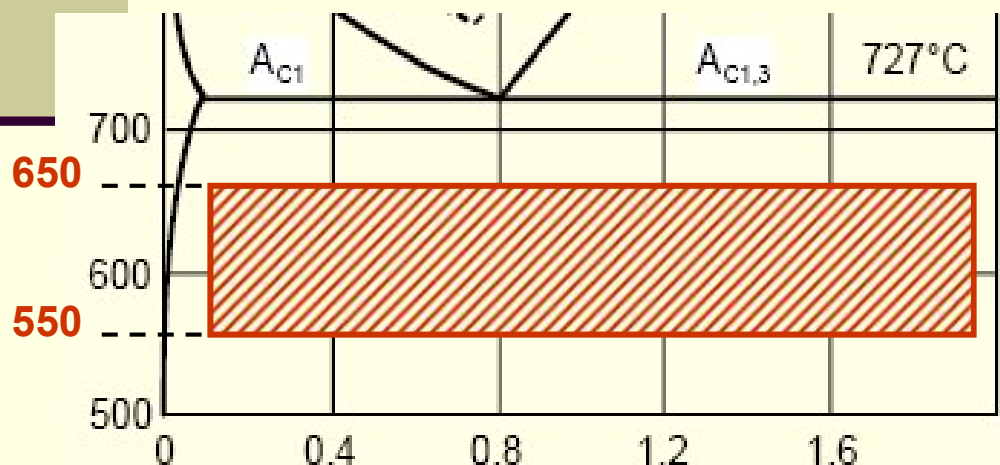
1.2) Žarenje radi uklanjanja zaostalih unutrašnjih (zaostalih) napona

Faze kod legura Fe:

1. **Lagano zagrevanje** do temperature **ispod** linije A_1 ($550 \div 650^\circ\text{C}$),
2. **Zadržavanje** na toj temperaturi, i
3. **Sporo i dugotrajno** hladjenje **u peći**.

Otpuštanje unutrašnjih napona se odigrava pri temperaturama:

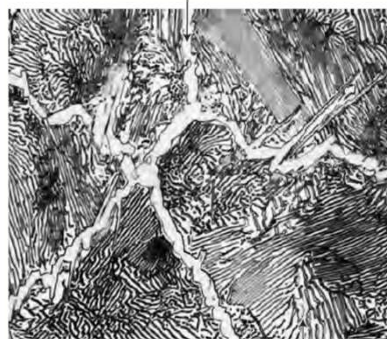
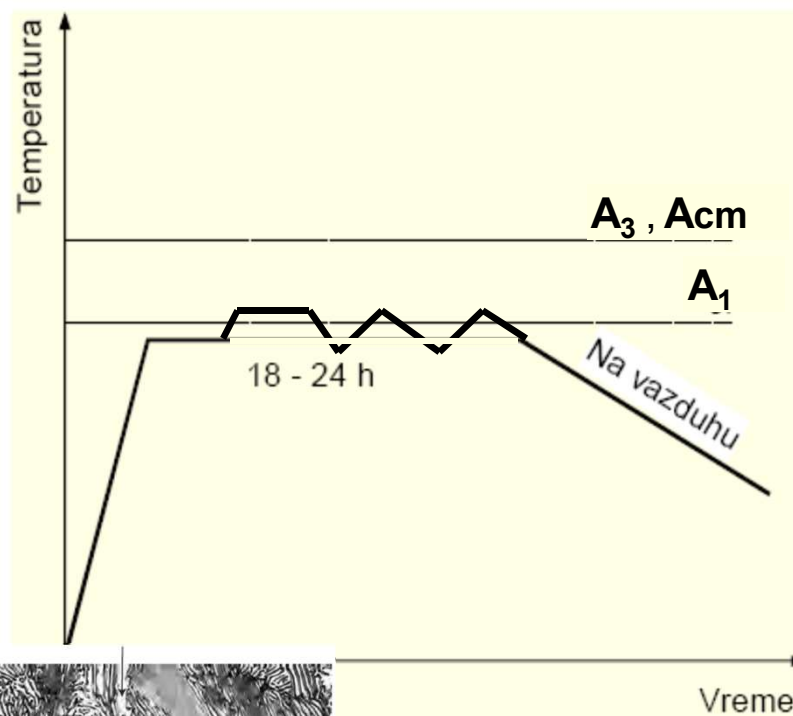
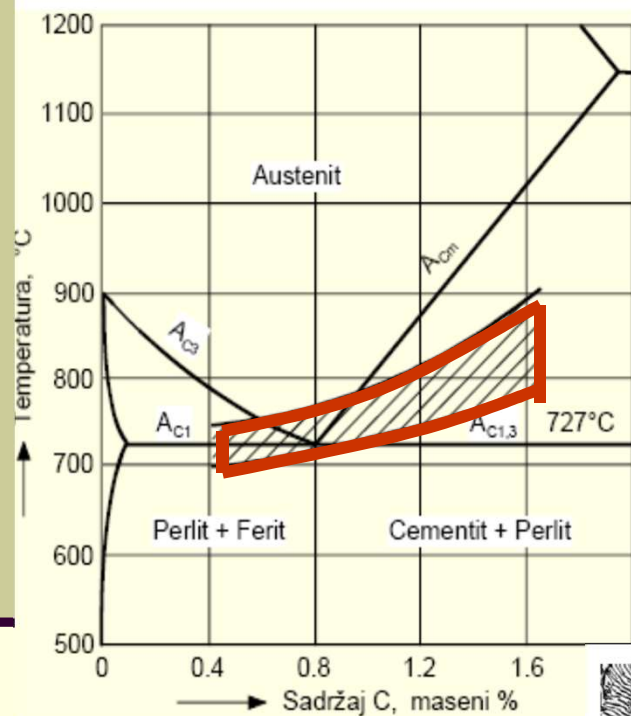
- za čelične **odlivke** i odlivke izrađene od livenog gvoždja $\rightarrow 550 \div 650^\circ\text{C}$;
- za čelične delove obradjene plastičnom deformacijom **na hladno** $\rightarrow T - (250 \div 300)^\circ\text{C}$;
- kod mernih i kontrolnih alata, da bi se postigla neophodna dimenziona stabilnost $\rightarrow 150^\circ\text{C}$ (tzv. stabilizaciono otpuštanje).



2.1 Sferoidizacija -žarenje sa / bez fazne transformacije

- Srednje i visoko ugljenični čelici zbog tvrde i grube strukture , mogu teško da se obrađuju zbog toga se lamelle cementita prevode u sfere
- Načini izvođenja TO
 - zagrevanjem odmah ispod A1 i držanje na oko 700°C/15-20h
 - cikliranje oko A1 $\pm 50^{\circ}\text{C}$
- Brzina sferoidizacije zavisi od finoće perlita – što je **finiji** to se lakše odvija
- Prethodna hladna deformacija **ubrzava** sferoidizaciju

2.1) Sferoidizacija ili MEKO ŽARENJE



2.2) Normalizaciono žarenje (normalizacija)

- Normalizacija se koristi da se dobije ujednačeno sitno zrno
- Generalno, normalizacija se primenjuje da se ukloni krupnozrna struktura dobijena u postupcima obrade u toplom stanju (livenje, kovanje, valjanje, zavarivanje i dr.).
- Često se izvodi posle homogenizacije da bi se usitnilo zrno
- Izvodi se npr posle livenja velikih komada (čak po 2 puta za redom kao kod 15H1M1FL odlivaka velike debljine)
- Često je priprema za kaljenje - kod nadeutektoid.Č, usitnjava se Fe_3C mreža \rightarrow HB i Rm rastu ("priprema" za kaljenje).
- **Cilj normalizacije je uklanjanje krupnozrne strukture i dobijanje sitnozrne i ravnomerne strukture;**

2.2) Normalizaciono žarenje (normalizacija)

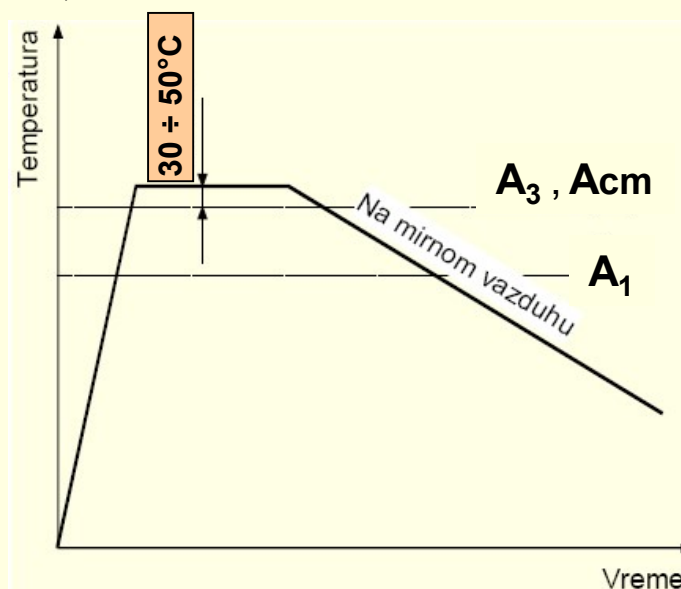
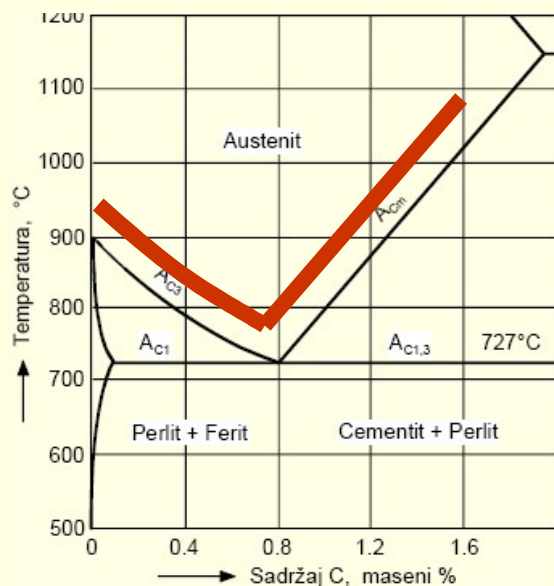
Parametri režima normalizacije:

1. Zagrevanje čelika do:

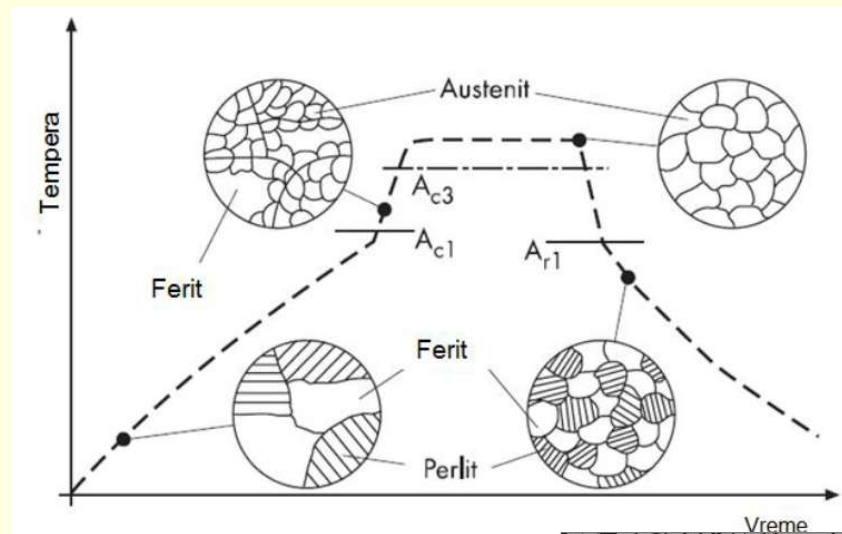
- iznad A_3 ($30 \div 50^\circ\text{C}$) za podeutektoidne Č, tj. iznad A_{cm} ($30 \div 50^\circ\text{C}$) za nadeutektoid Č;

2. Progrevanje (držanje) na toj temperaturi, i

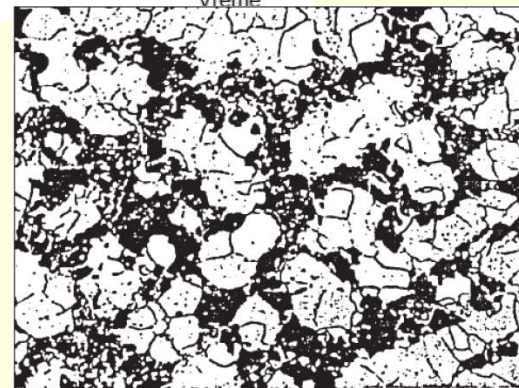
3. Hladjenje na mirnom vazduhu.



2.2) Normalizaciono žarenje (normalizacija)



posle livenja



posle normalizacije

2.3) Potpuno žarenje

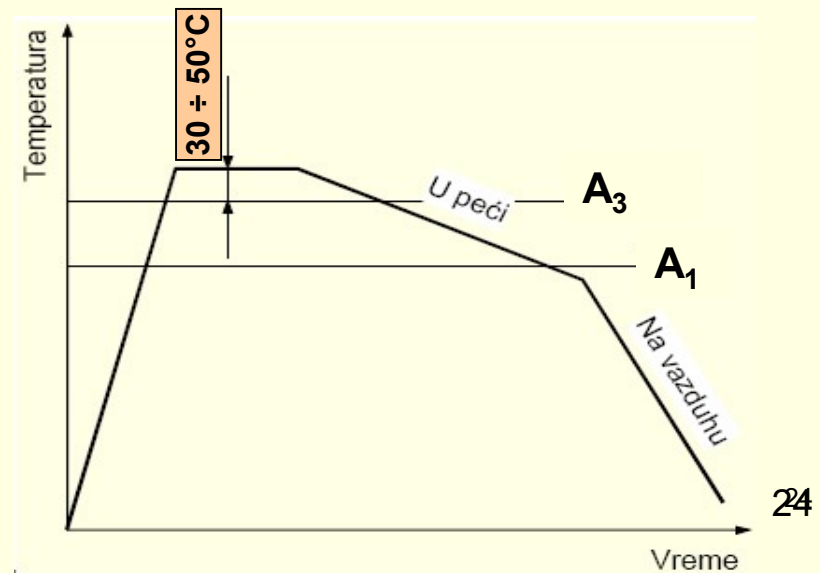
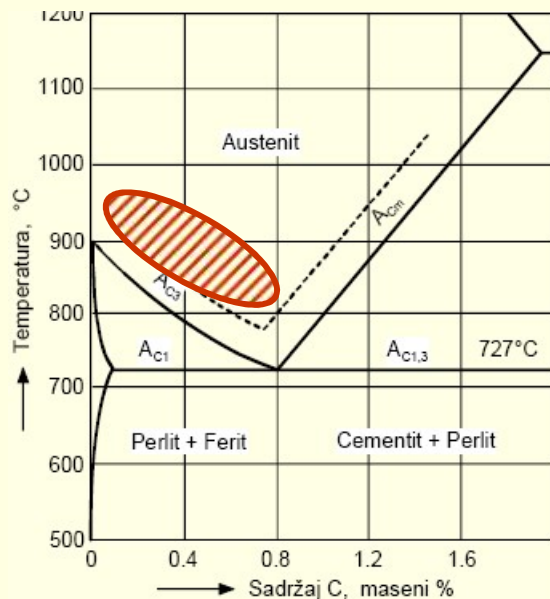
Parametri režima potpunog žarenja:

1. **Zagrevanje** čelika do austenitnog područja ($30 \div 50^\circ\text{C}$ iznad linije A_3),
2. **Držanje** na toj temperaturi, i
3. **Veoma sporo** hladjenje (1. u peći do $500 \div 600^\circ\text{C}$, a zatim najčešće na vazduhu).

Primenjuje se kod **podeutektoidnih čelika**, gde se sporim hlađenjem, dobija struktura male tvrdoće, velike plastičnosti i dobre obradljivosti.

Cilj potpunog žarenja je:

- ukrupnjavanje zrna i bolja svojstva obradljivosti;
- smanjuje se tvrdoća i žilavost, a povećava plastičnost u cilju bolje obradljivosti rezanjem.



2.4) Difuziono žarenje (homogenizacija)

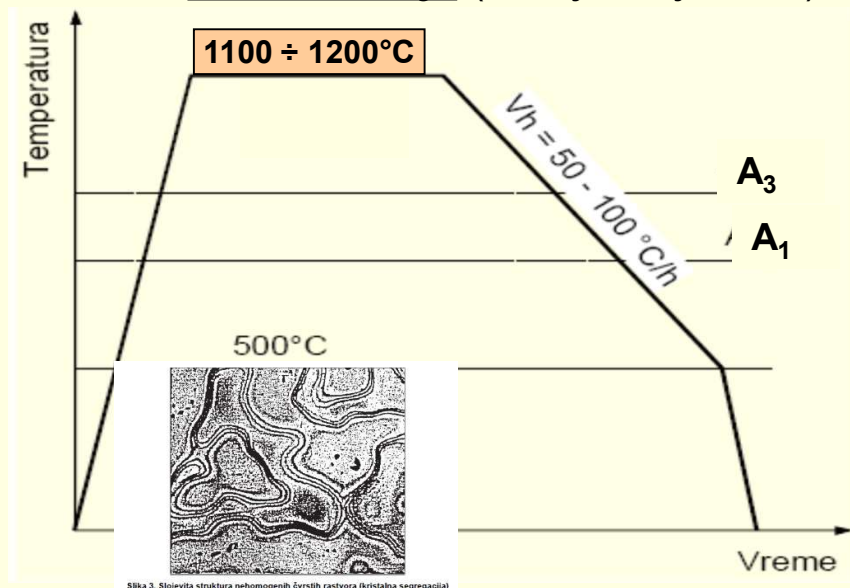
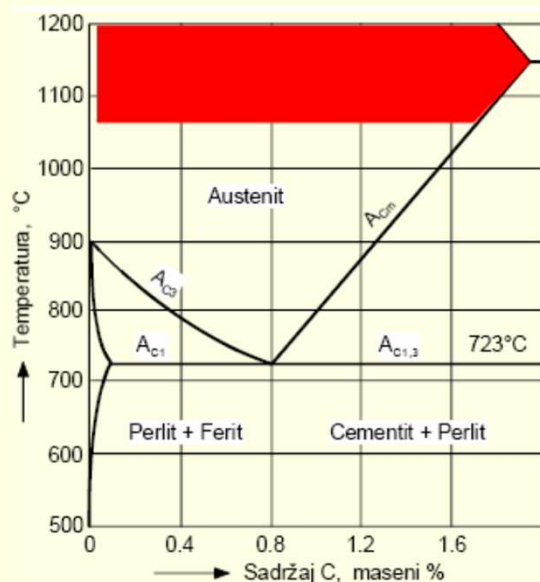
Cilj homogenizacije je:

- izjednačavanje hemijskog sastava u zrnu;
- poboljšanje mikrostrukture koja umesto dendritne postaje homogena;
- poboljšanje sposobnosti za obradu plastičnim deformisanjem na toplo.

Parametri režima homogenizacije:

1. **Zagrevanje Č** (visoko u γ -području: **1100÷1200°C**, malo ispod solidus linije-**A₄**)
2. **Dugotrajno progrevanje** na toj temperaturi (**80÷100 h**) i
3. **Dugo i sporo hladjenje** (**u peći**).

Dobija se krupnozrna α +P struktura → za poboljšanje mehaničkih osobina struktura se mo usitniti → posle homogenizacije, obično se radi normalizacija (usitnjavanje zrna)!



Slika 3. Slojevitá struktura nehomogenih čvrstih rastvora (kristalna segregacija)

3. KALJENJE ČELIKA

Parametri režima kaljenja :

1. Zagrevanje čelika:

- 30÷50°C iznad A_3 za padeutektoidne Č, i 30÷50°C iznad A_1 za nadeutektoidne Č.

2. Progrevanje na toj temperaturi, i

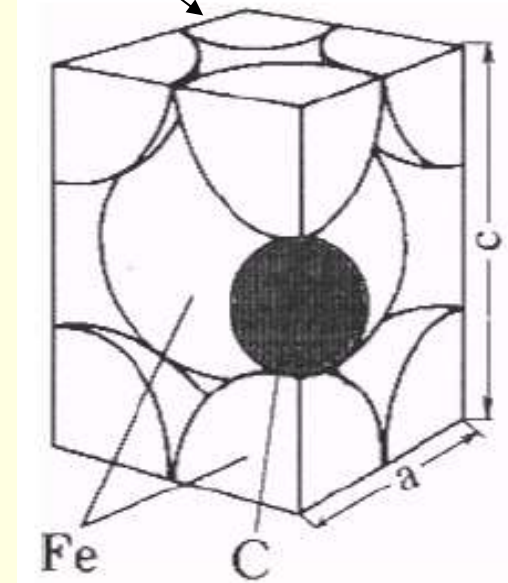
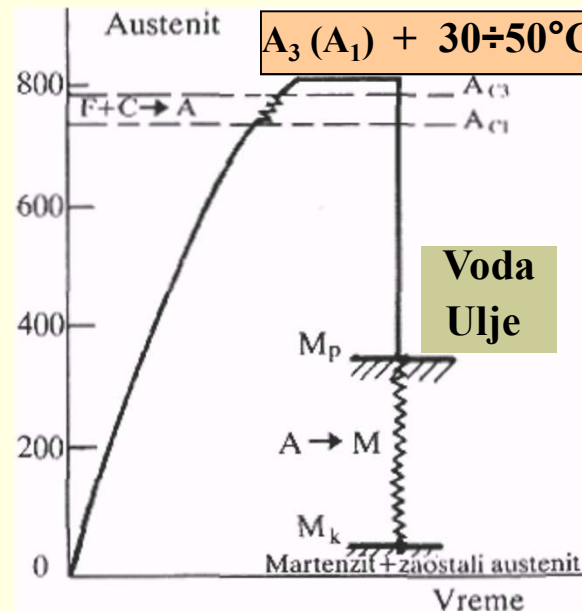
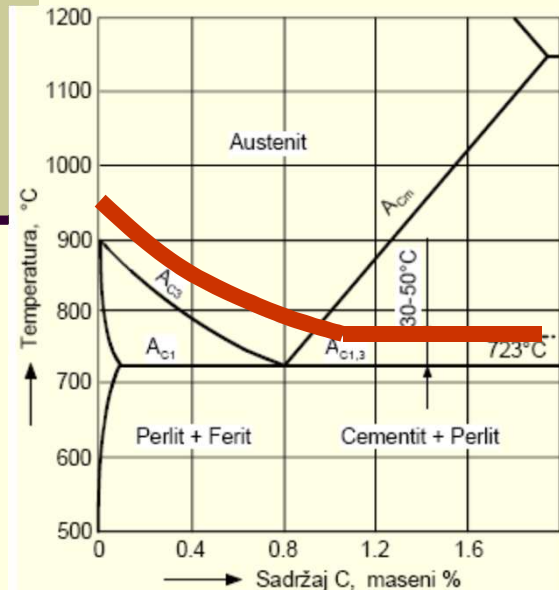
3. Hladjenje brzinom većom od kritične brzine hladjenja (V_k)

(konstrukc.Č→u H_2O ; alatni Č→u ulju/rastv.sol; legirani Č→na vazduhu).

• **Martenzit** = Prezasićeni čvrsti rastvor C u α -Fe, i ima tetragonalnu ZCKR.

• **Kritična brzina hlađenja** (V_k) je najmanja v_{hl} pri kojoj se dobija 100% martenz.struktura.

Cilj kaljenja je dobijanje martenzitne strukture, visoke HB i otpornosti na habanje.



4. OTPUŠTANJE

Martenzit je suviše krt da bi se čelični delovi sa takvom strukturom mogli uspešno primeniti u mašinstvu. Osim toga, martenzit odlikuje prisustvo znatnih unutrašnjih napona. Zato se uvek posle kaljenja, zarad smanjenja HB i Rm, porast KU i uklanjanja unutrašnjih napona, izvodi naknadno zagrevanje i sporo hladjenje → **OTPUŠTANJE**.

Parametri režima OTPUŠTANJA su:

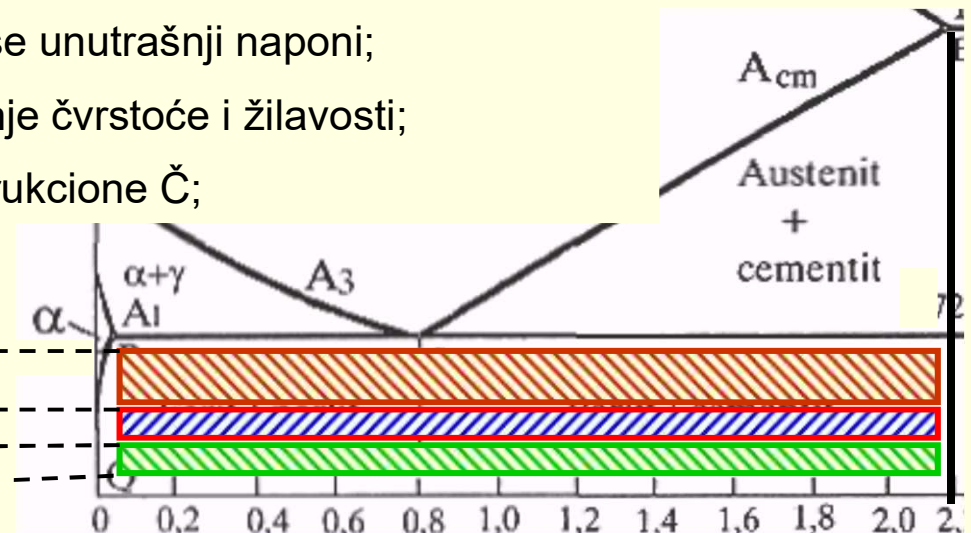
1. Naknadno zagrevanje do ispod kritične temperature A_1 ,
2. Držanje kraće vreme na toj temperaturi, i
3. Lagano hladjenje (npr., na mirnom vazduhu).

Zavisno od T_z razlikuju se:

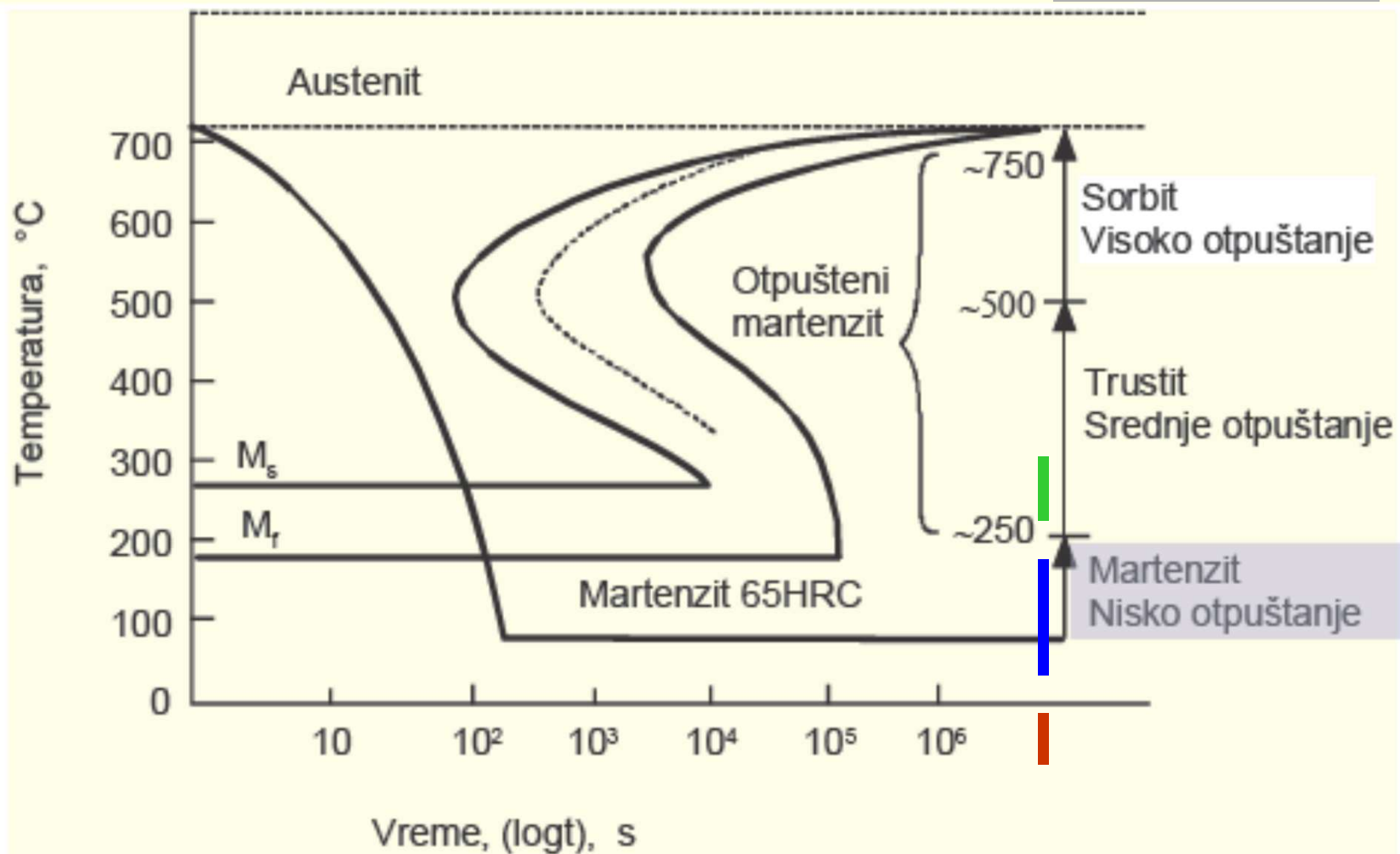
- **Nisko Otpuštanje**: 200-300°C; smanjuju se unutrašnji naponi;
- **Srednje Otpuštanje**: 300-500°C; povećanje čvrstoće i žilavosti;
- **Visoko Otpuštanje**: 500-700°C; za konstrukcije Č;

visoko
srednje
nisko

700
500
300
200



4. OTPUŠTANJE



POBOLJŠANJE = KALJENJE + VISOKO OTPUŠTANJE

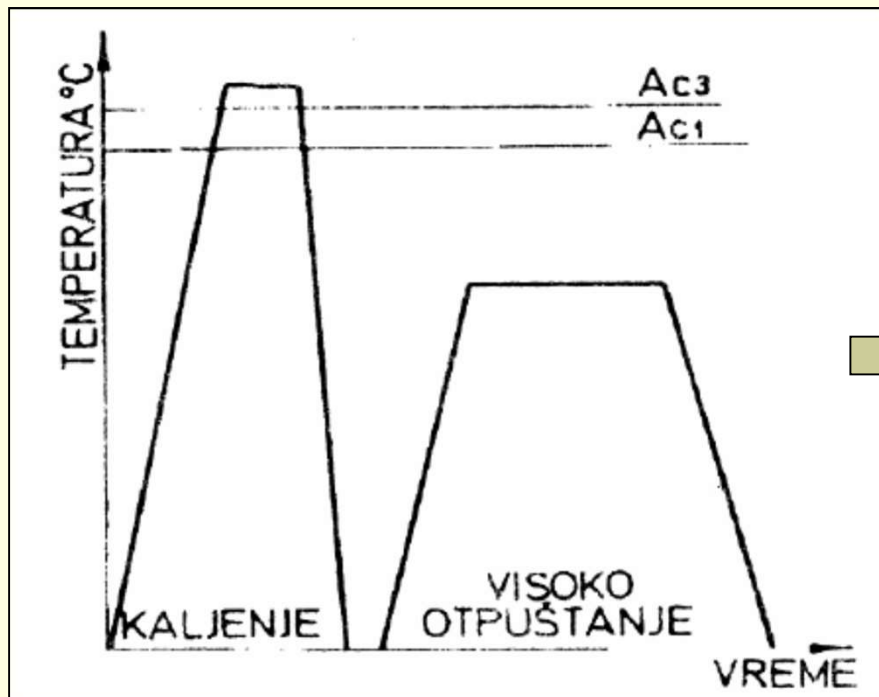
Kombinovani postupak **Kaljenja** + **Visokog Otpuštanje** naziva se = **POBOLJŠANJE**.

Kaljenje praćeno visokim otpuštanjem, istovremeno dovodi do poboljšanja skoro svih meh.karakteristika (R_e , K_U , $A\%$, $Z\%$).

Cilj poboljšanja je da se:

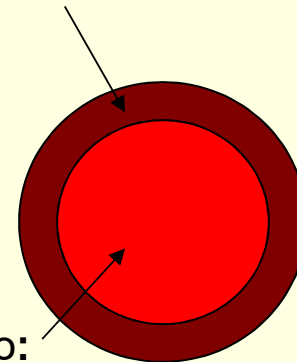
- u **jezgru** strukture **povećava žilavost** (sorbit), i
- **zadrži** površinska **tvrdoća**.

Konstrukcioni čelici se posle kaljenja podvrgavaju visokom otpuštanju (poboljšavaju se).



Površinski sloj: **visoka tvrdoća**

Jezgro:
velika žilavost

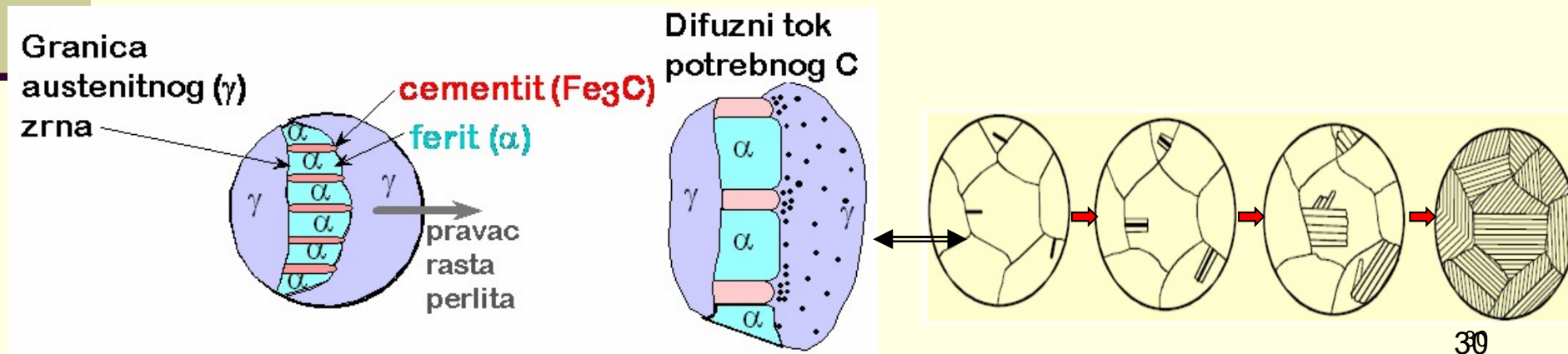


NERAVNOTEŽNE TRANSFORMACIJE AUSTENITA (γ)



Procesi tokom eutektoidne reakcije teku istovremeno:

1. promena rešetke Fe (KPC \rightarrow KZC).
2. difuzija C i stvaranje centara za izdvajanje Fe_3C .
3. rast cementnih lamela.

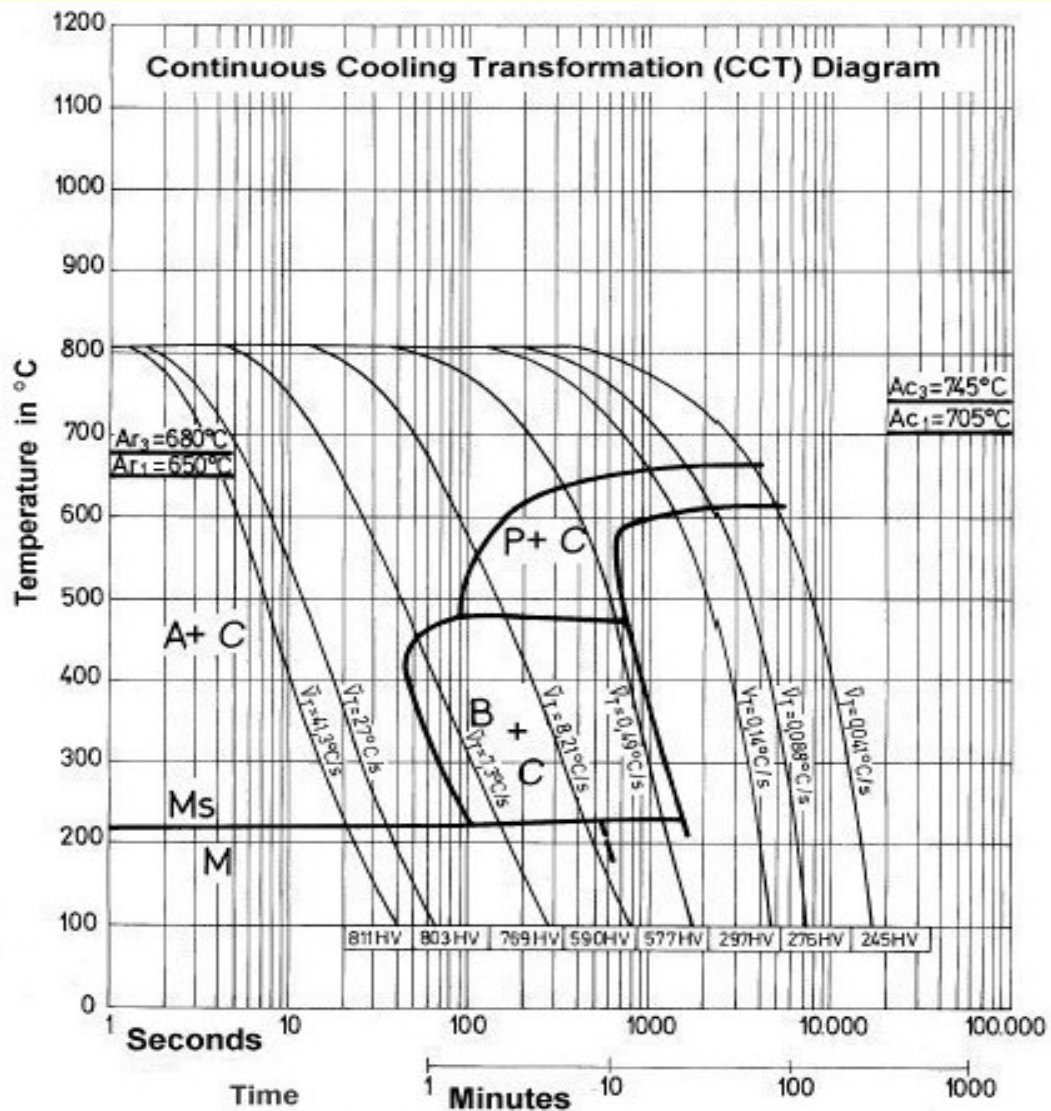


TRANSFORMACIJA AUSTENITA

- **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 može postići na dva načina:
 - kontinualnim hladjenjem
 - izotermnom transformacijom

CCT diagram (KH)

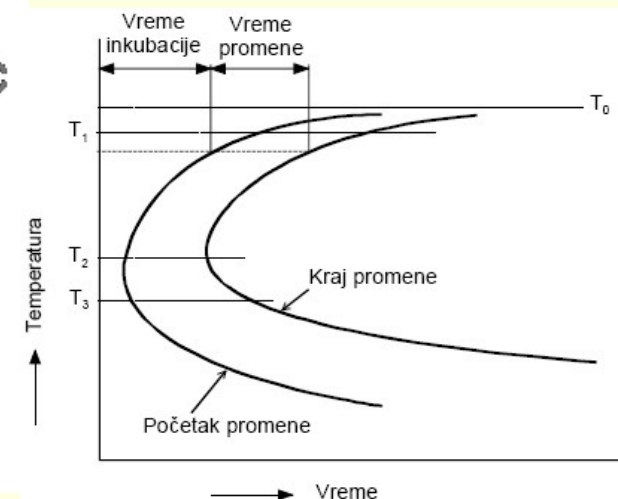
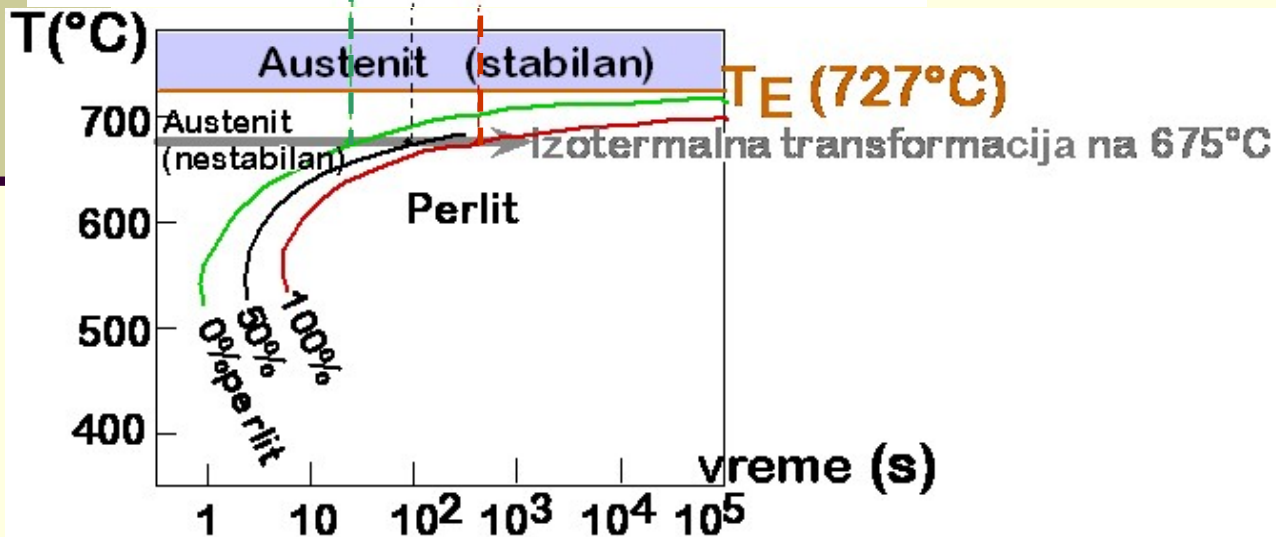
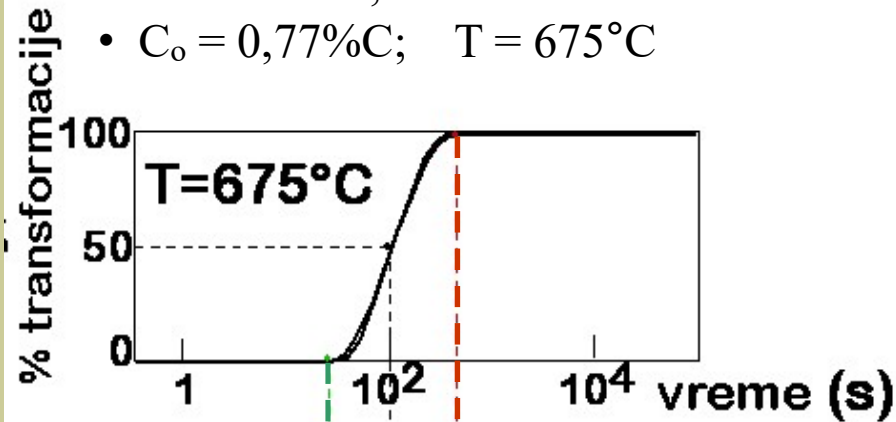
Continuous-Cooling-Transformation \equiv Dijagram KONTINUALNOG hlađenja γ



TTT dijagram (IR)

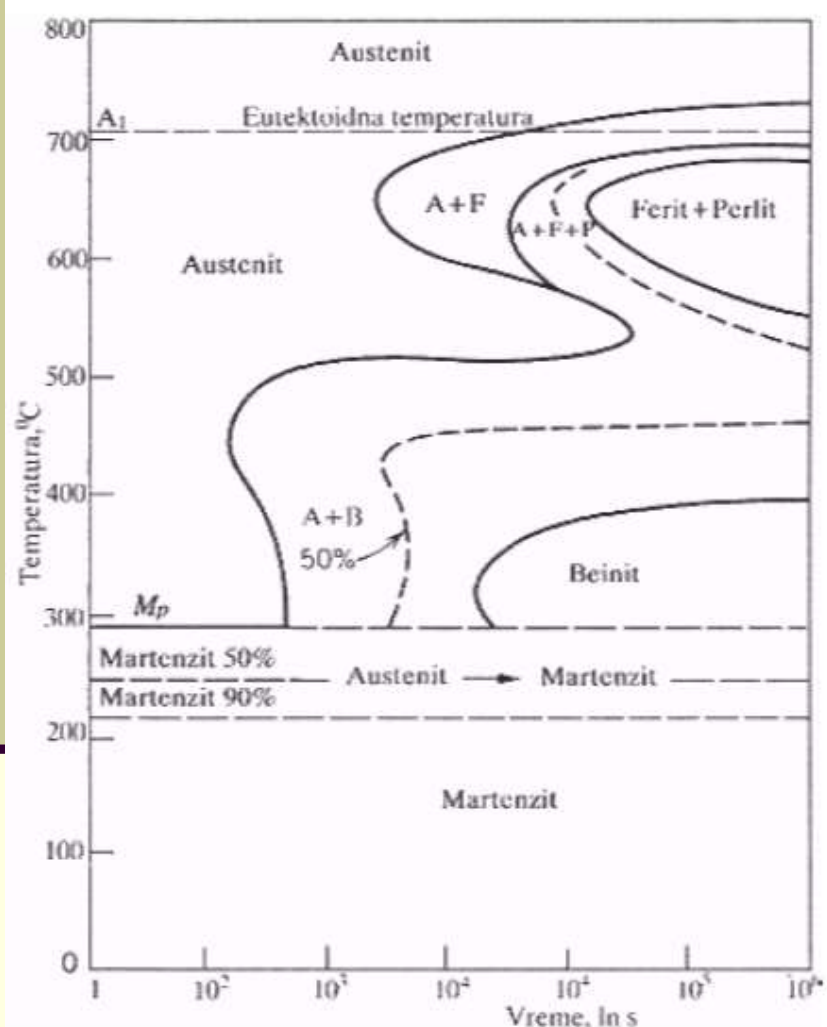
Time-Temperature-Transformation \equiv Dijagram **IZOTERMALNOG** razlaganja γ

- Fe-C sistem,
- $C_o = 0,77\%C$; $T = 675^\circ C$

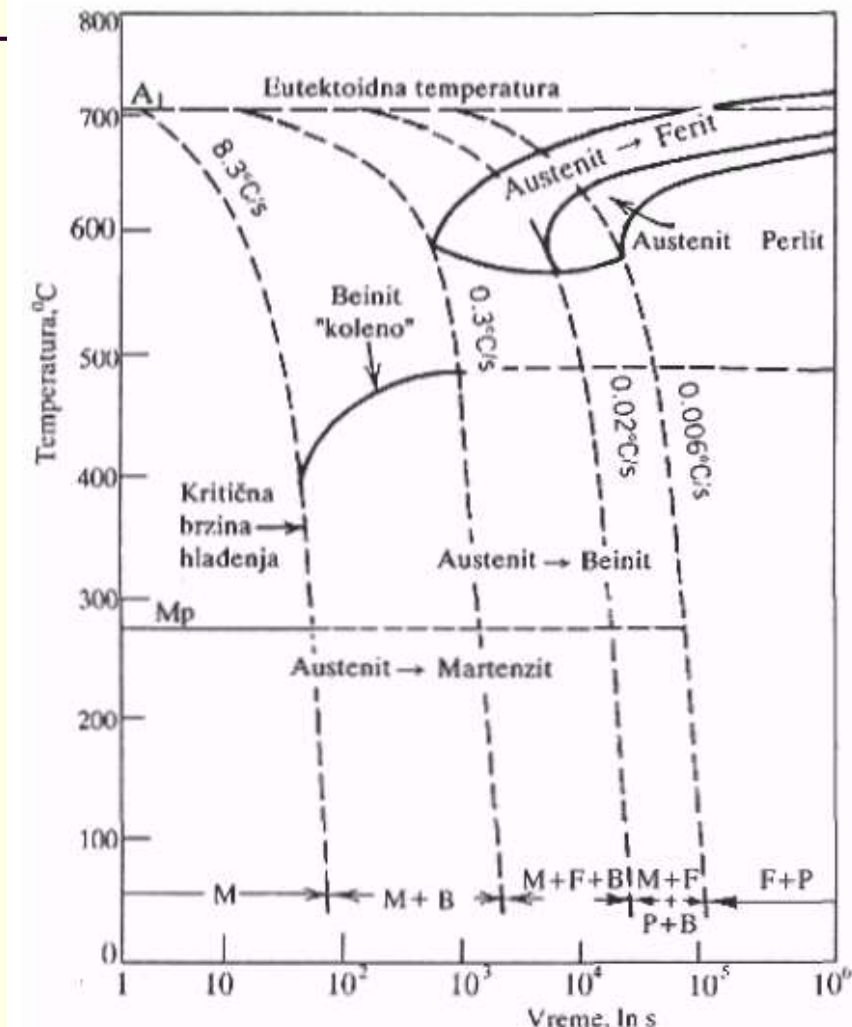


Uporedni prikaz TTT (IR) i CCT (KH) dijagrama za legirani (Cr, Mo) čelik

IR dijagram

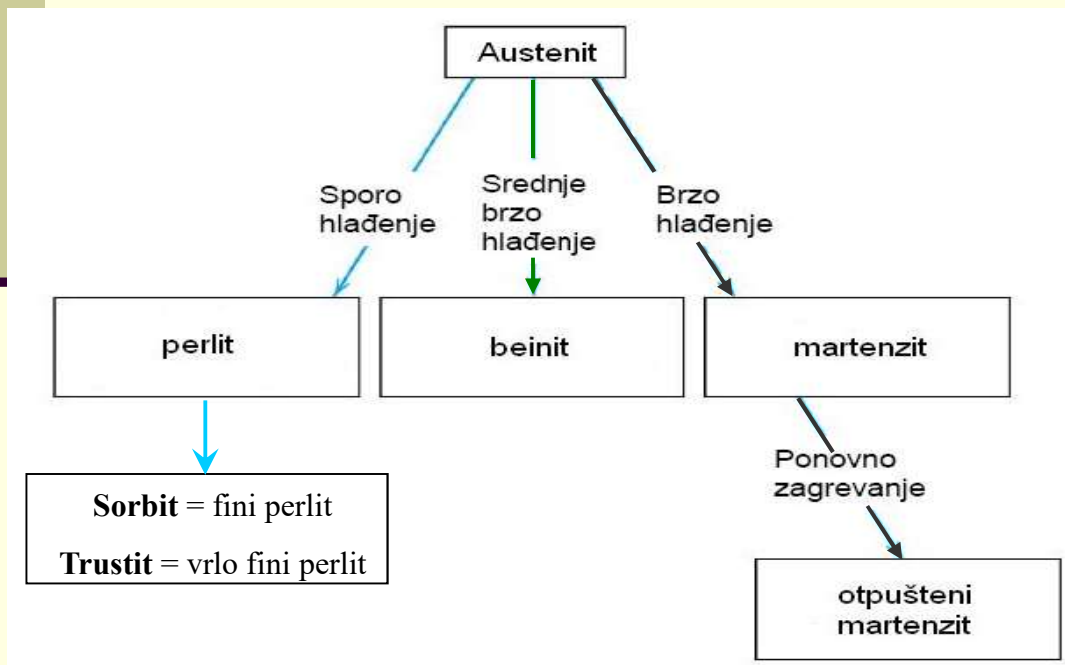


KH dijagram



transformacija austenita u zavisnosti od brzine hlađenja:

V_{hl} [°C/sec]	Struktura	Tvrdća [HB]	<u>Završene faze</u>	
			potpuno	delimično
do 50	Perlit	150	1, 2, 3	/
50 - 70	Sorbit	300	1, 2	3
70 - 100	Trustit	400	1, 2	/
100 - 150	Beinit	500	1	2
150 - 180	Martenzit	650	1	/

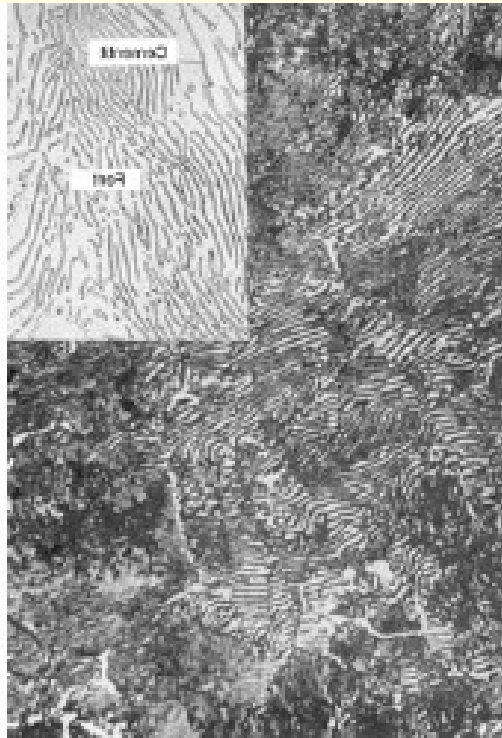


Napomena:

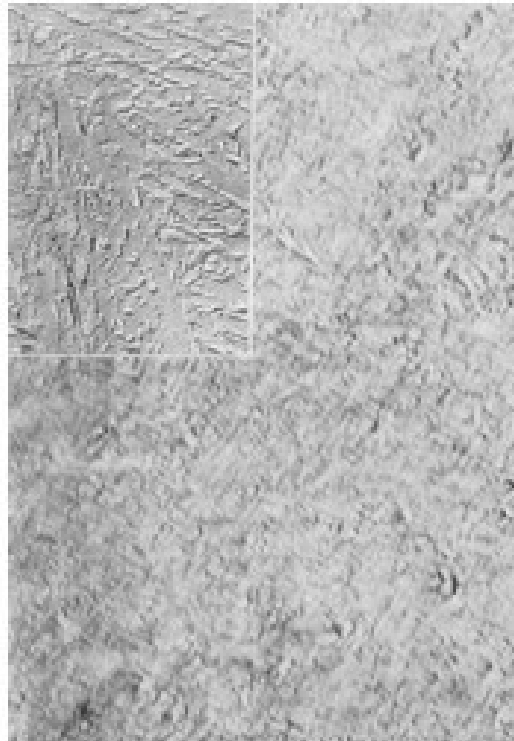
Fazne transformacije γ teku istovremeno:

1. promena rešetke Fe.
2. difuzija C.
3. rast cementita.

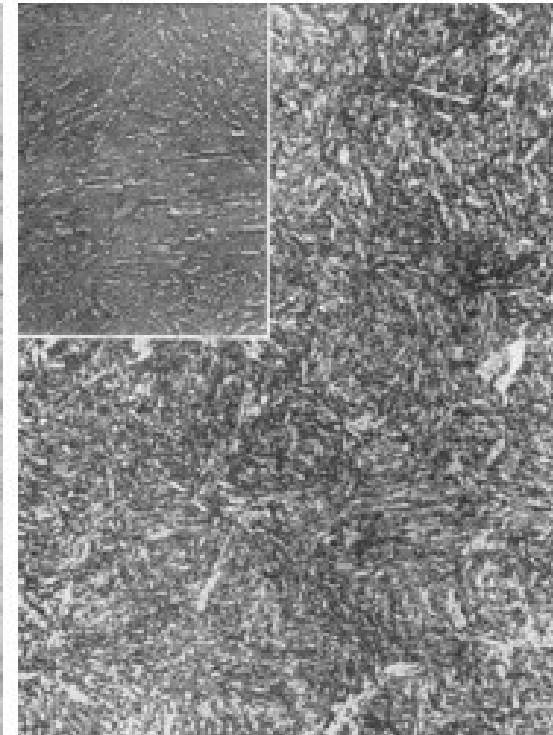
Perlit, Sorbit, Trustit



Perlit



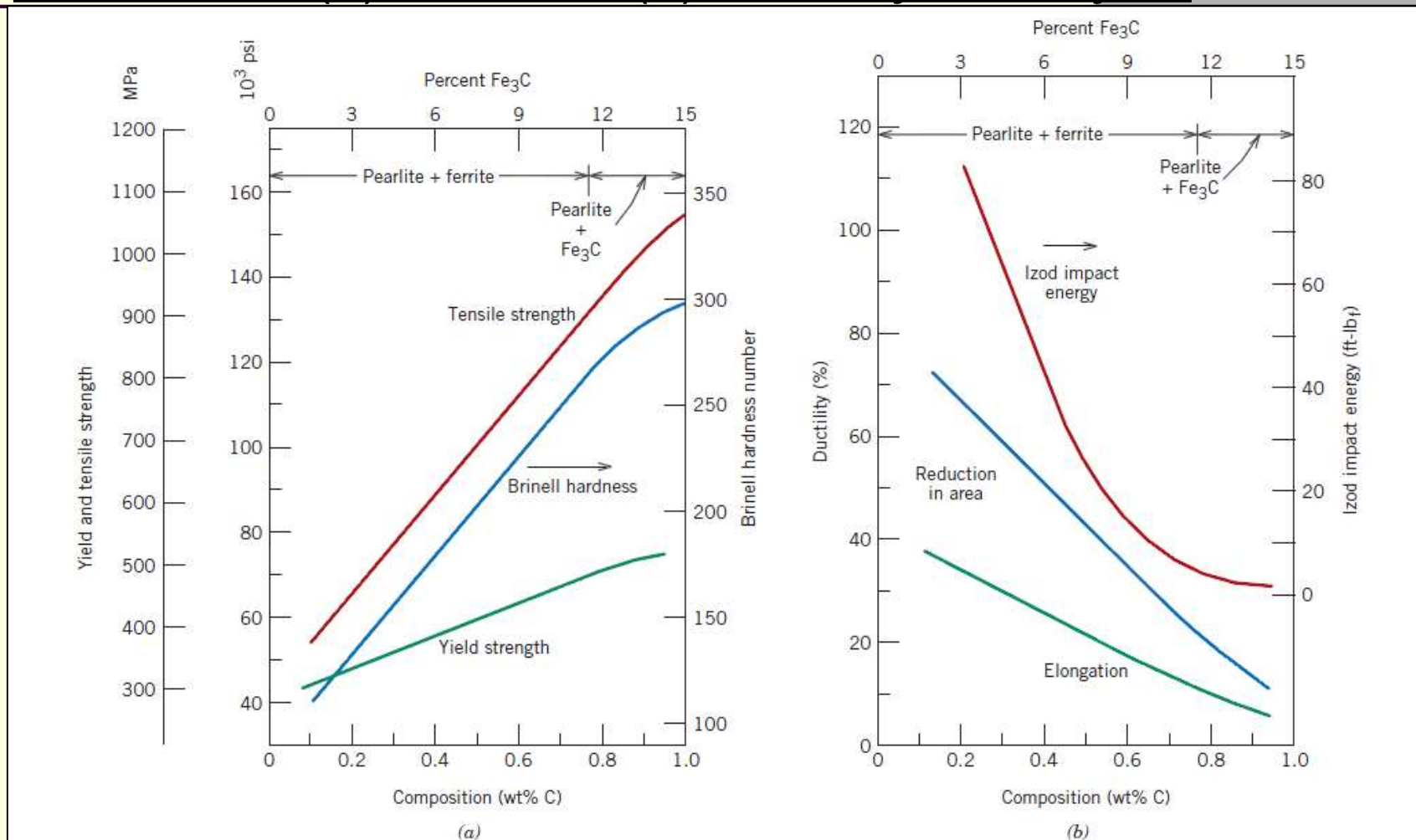
Sorbit



Trustit

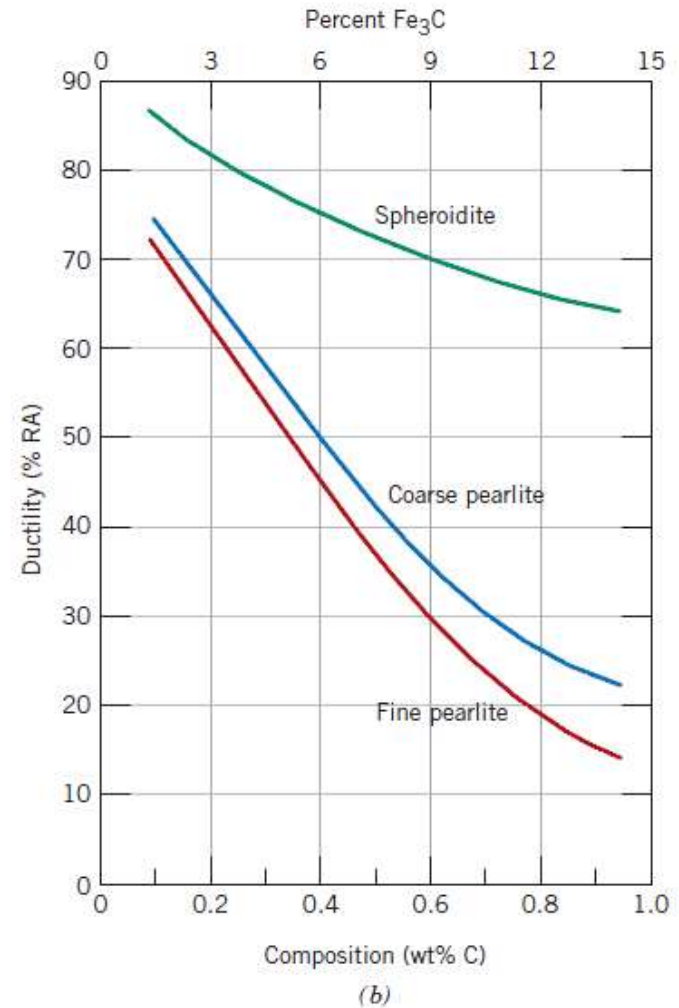
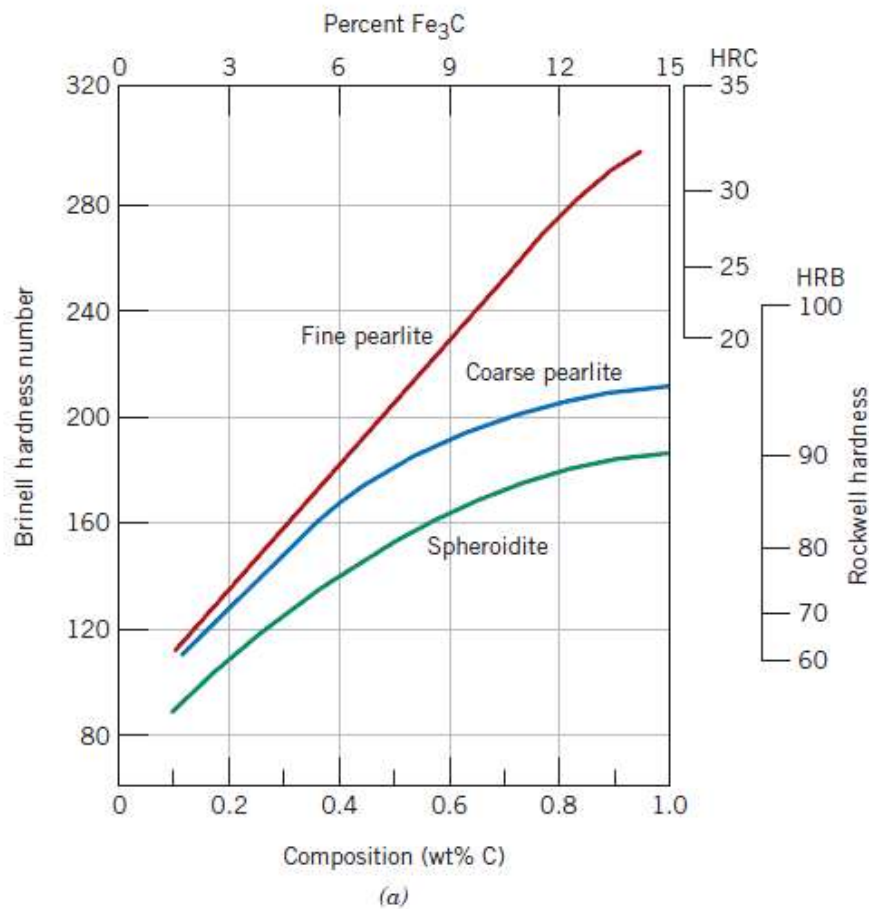
Mehaničke osobine u funkciji sadržaja C za fini perlit

Re, Rm, HB (a) i A, Z, KV (b) u funkciji sadržaja C

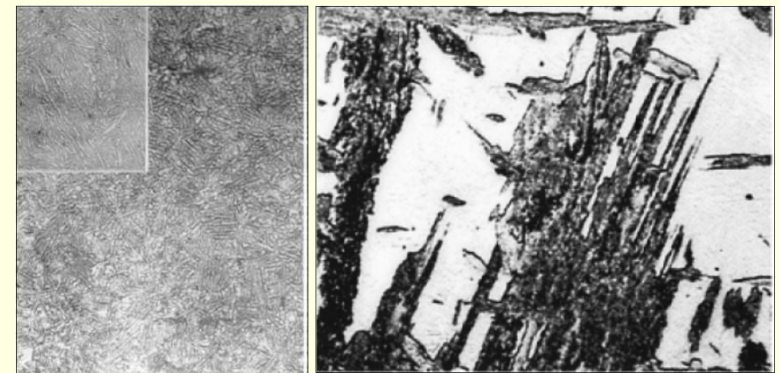
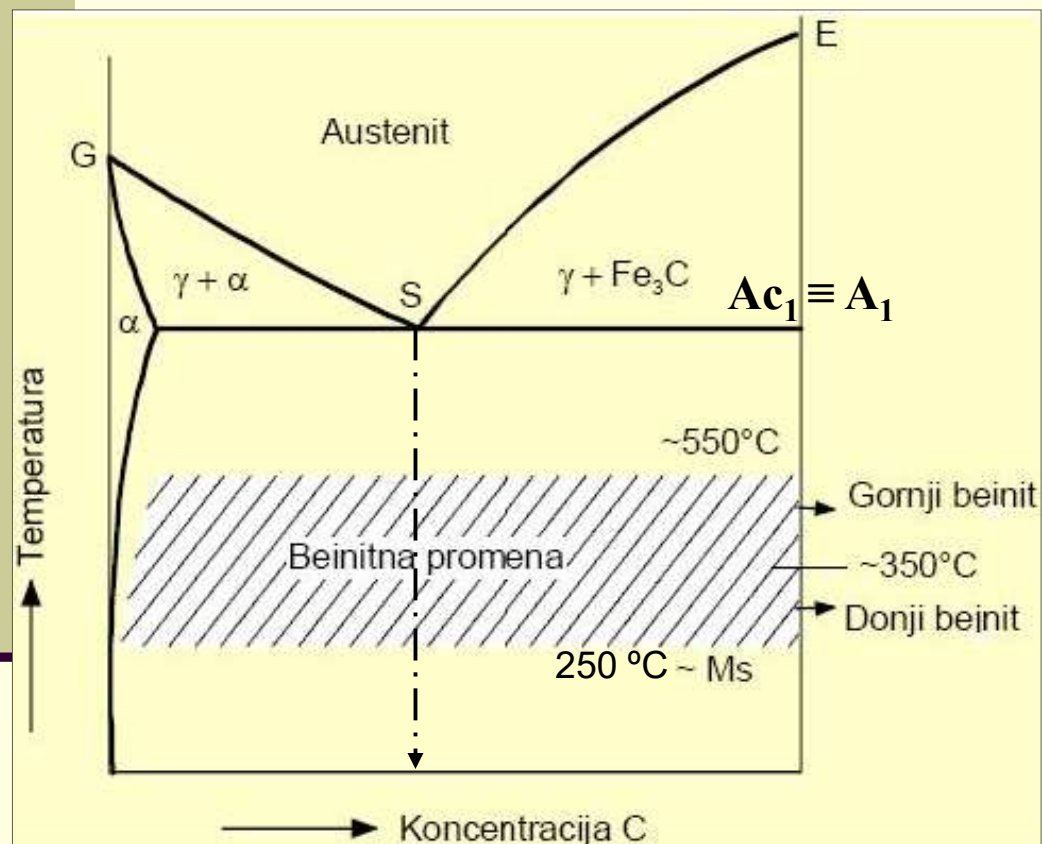


Mehaničke osobine u funkciji sadržaja C i vrste perlita

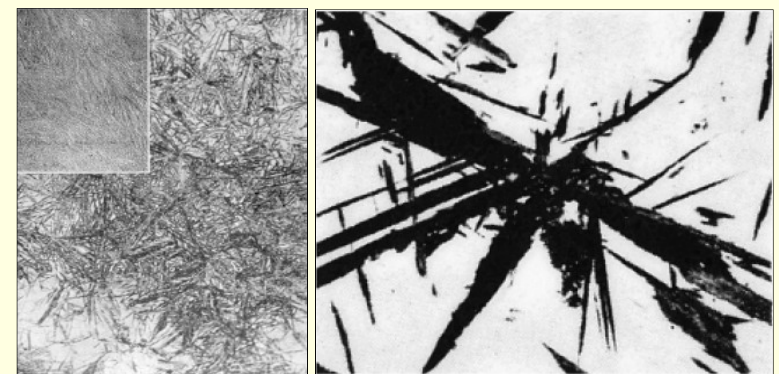
HB (a) i duktilnost (b)



2. Beinitna transformacija

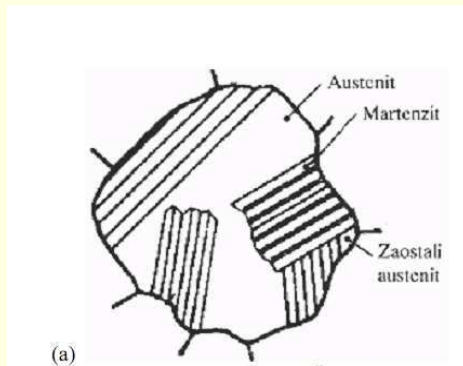


Gornji Beinit (perjasta struktura)

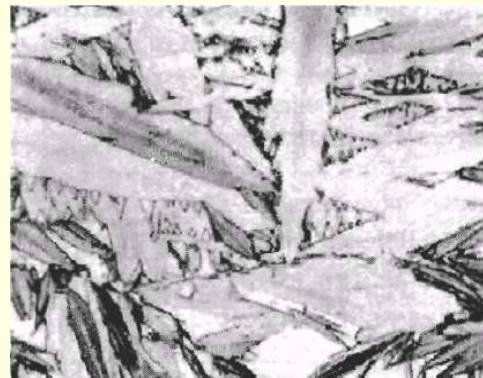
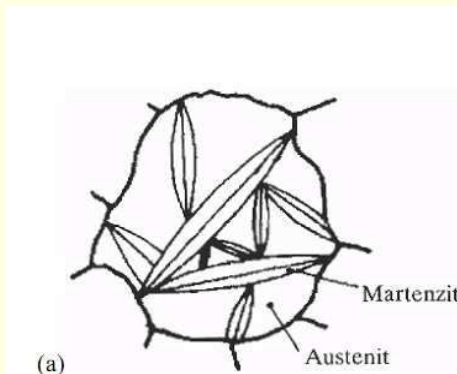


Donji Beinit (igličasta struktura)

Martenzitna transformacija- vrste martenzita

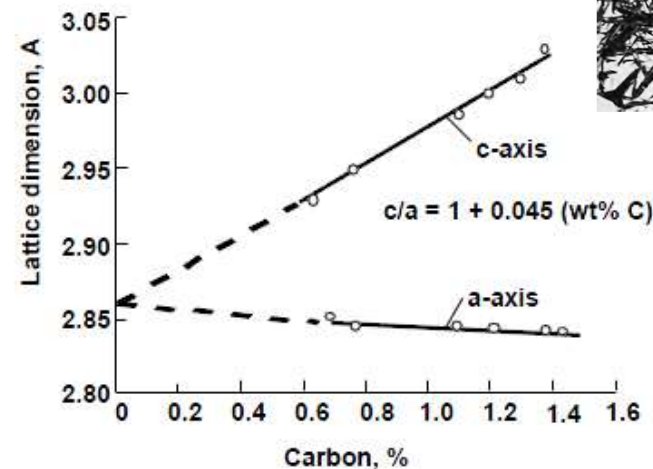
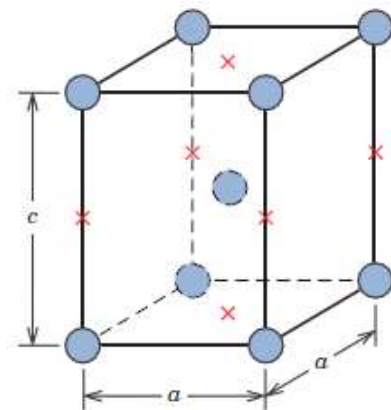


Mikrostruktura paketastog martenzita kod niskougledjenog čelika, uvećano $\times 800$.

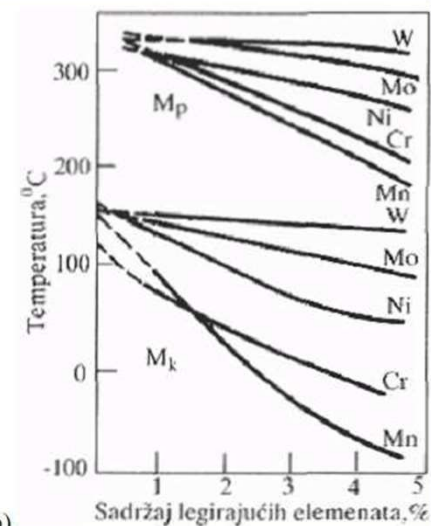
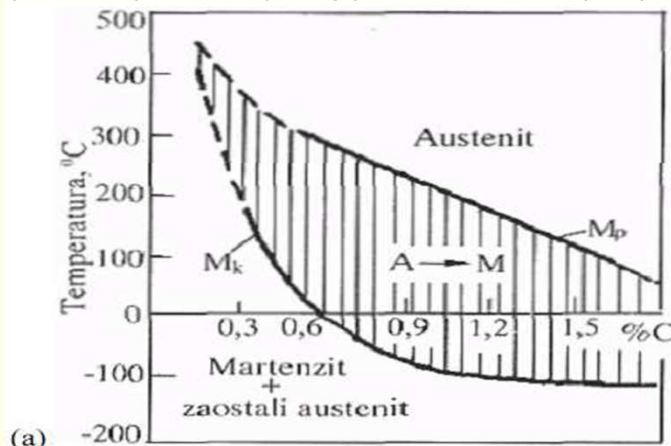


Pločasti kristali martenzita obrazuju se kod visokougledjenih čelika ($> 0,8\% \text{ C}$).

Tetragonalnost martenzita

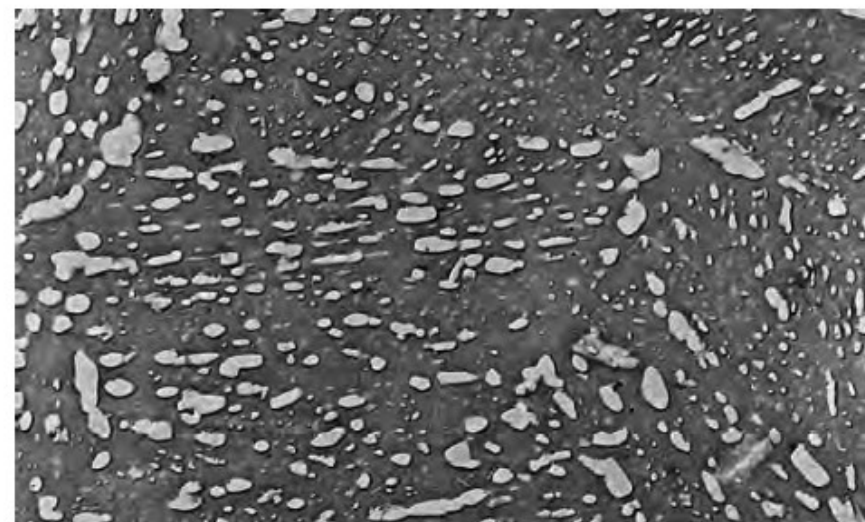
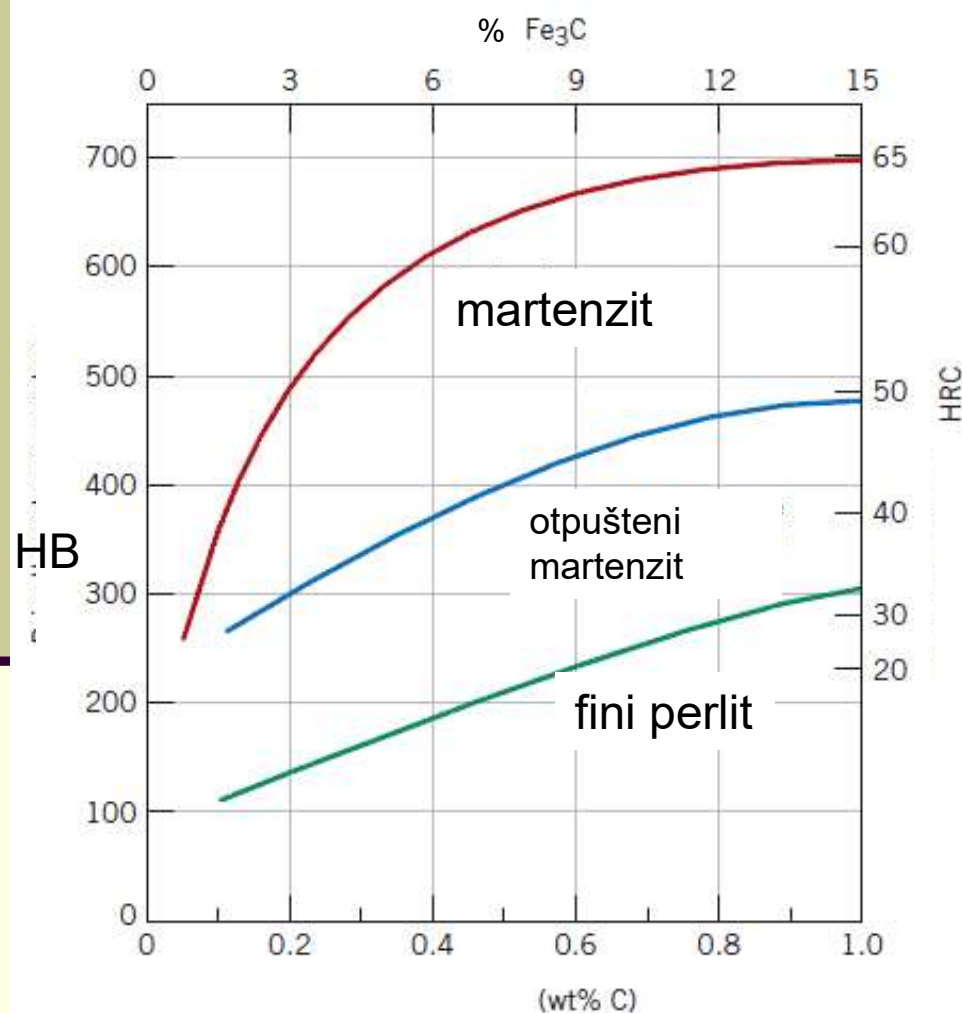


a) Uticaj sadržaja ugljenika na M_p (M_s) i M_k (M_f)



b) Uticaj legirajućih elemenata na M_p (M_s) i M_k (M_f)

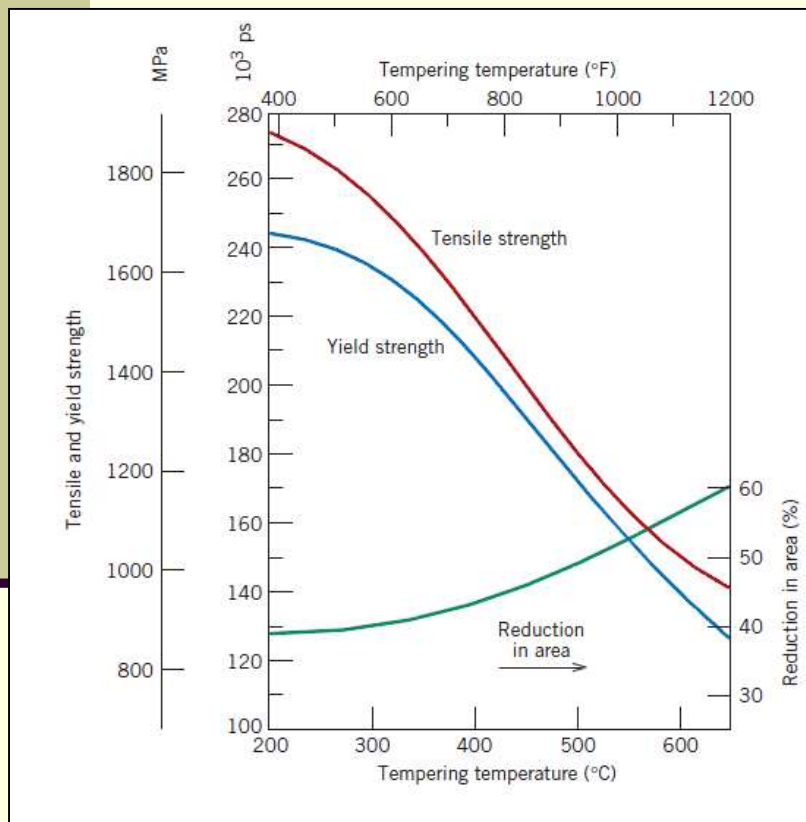
HB, HRC u funkciji sadržaja C i mikrostrukture



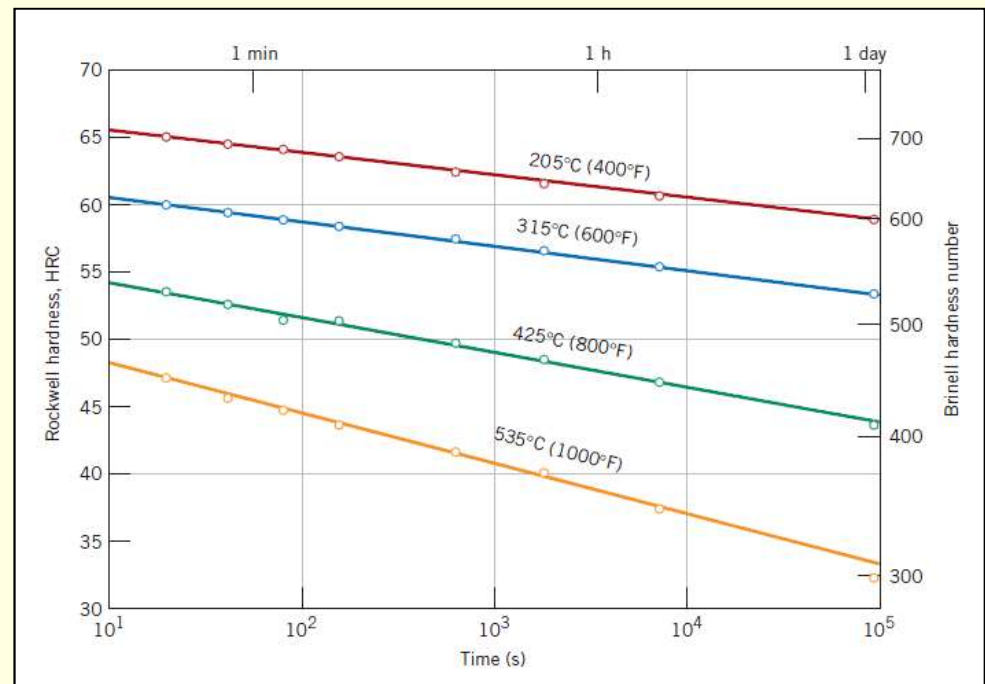
martenzit otpušten na 594°C
 α + Fe₃C čestice

Osobine otpuštenog martenzita

Martenzit (jedna faza) prelazi otpuštanjem u otpušteni martenzit (+ karbidi)



R_m, R_e, Z u funkciji
T otpuštanja martenzita



HRC u funkciji T i vremena otpuštanja
martenzita

Otpusna krtost

- Otpuštanje nekih čelika može da dovede do pada žilavosti što se naziva otpusna krtost – slabe granice zrna
- Ovaj fenomen se javlja kada se:
 - otpuštanje izvodi na T preko 575°C, praćeno sporim hlađenjem do sobne temperature ili
 - kada se otpuštanje izvodi u intervalu od 375-575°C
- Čelici skloni otpusnoj krtosti sadrže značajne količine Mn, Ni ili Cr ali i u tragovima Sb (antimon), P, As (arsen), Sn (kalaj).
- Prisustvo ovih elemenata pomera prelaznu temperaturu ka višim T, tako da na sobnoj T izazivaju krtost čelika

Otpusna krtost

- Prsline od otpusne krtosti su interkristalne i ona se kreću po granicama bivših austenitnih zrna (povoljno mesto za segregaciju)
- Otpusnu krtost izbegavamo:
 - kontrolom hemijskog sastava (čistoća)
 - brzim prolaskom kroz opseg 375-575°C tokom hlađenja ili
 - zagrevanjem na oko 600°C i brzim hlađenjem

Legirajući elementi kod legura Fe

- Legirajući elementi utiču na:
 - tačke transformacije,
 - kritičnu brzinu hlađenja,
 - rastvorljivost C,
 - brzinu difuzije,
 - magnetičnost,
 - mehaničke osobine,
 - itd.

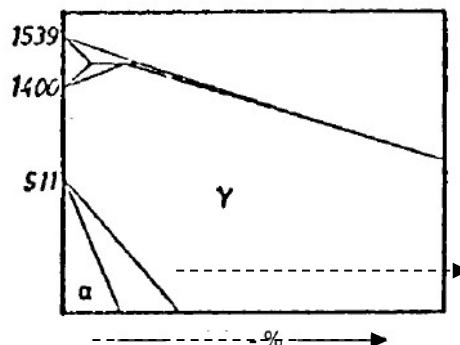
Legirajući elementi u čelicima

- Posebno značajna osobina legirajućeg elementa je doprinos obrazovanju ili stabilizaciji neke faze.
- Legirajući elementi su grupisani u one koji promovišu obrazovanje:
 - **austenita γ** : Ni, Co Mn, C, N, Cu (proširuju γ oblast)
 - **ferita α** : Cr, Al, Ti, Si, V, Mo, P, W, O, S, B, Zn, Nb, Ta (smanjuju γ oblast)
 - **karbide ili nitride** – Cr, Mo, V, Ti, Nb, Ta, W, Mn,...

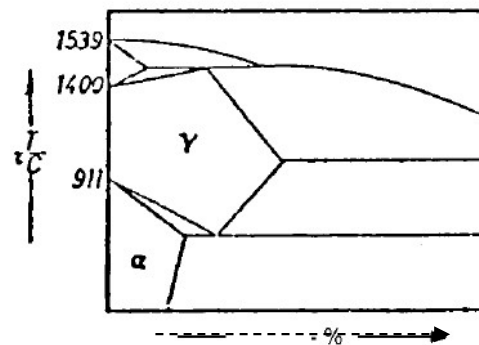
Legirajući elementi – menjaju dijagram stanja

austenito-
obrazujući γ : *Ni, Co, Mn* otvaraju γ oblast, dok je *C, N i Cu* je proširuju

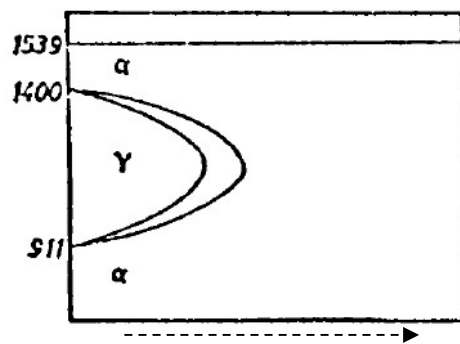
ferito-
obrazujući α : *Cr, Al, Ti, Si, V, Mo, P, W* zatvaraju γ oblast, dok je *O, S, B, Zn, Nb, Ta* dodatno sužavaju



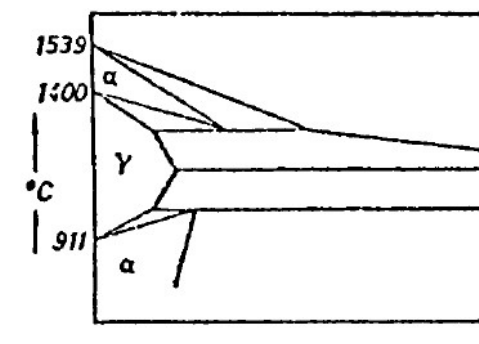
Ni, Co i Mn **otvaraju** γ oblast i ona nije ograničena



C, N i Cu **proširuju** γ oblast ali je ona ograničena



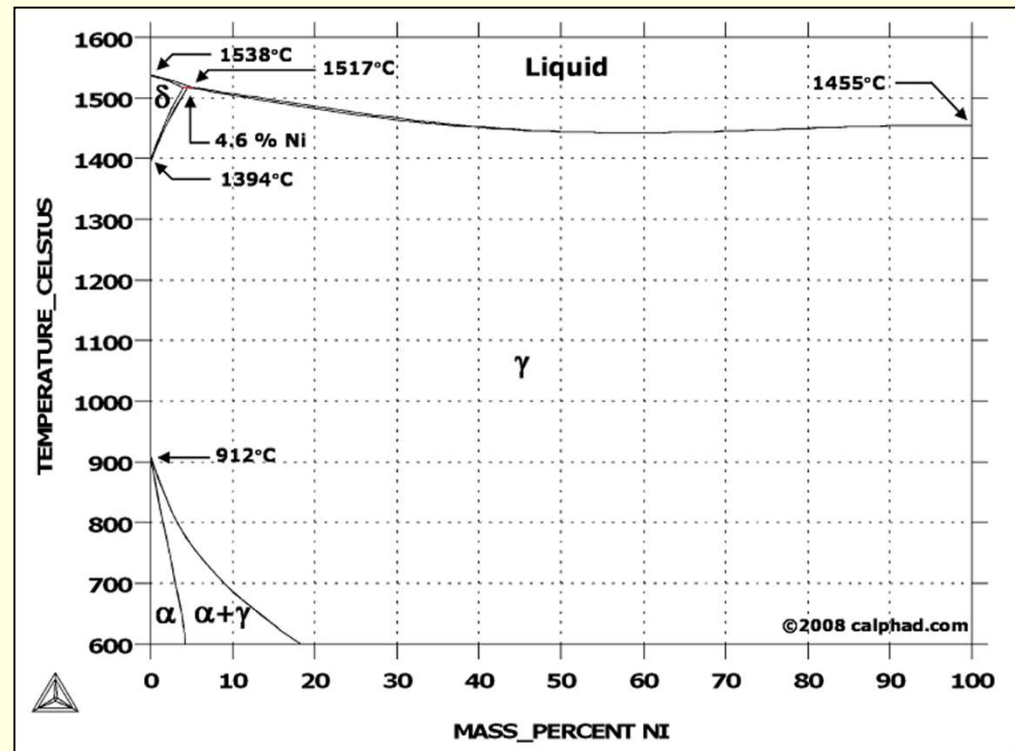
Cr, Al, Ti, Si, V, Mo, P, W **zatvaraju** γ oblast a α oblast nije ograničena



O, S, B, Zn, Nb, Ta, **sužavaju** γ oblast koja je ograničena

Primer: Austenito-obrazujući elementi

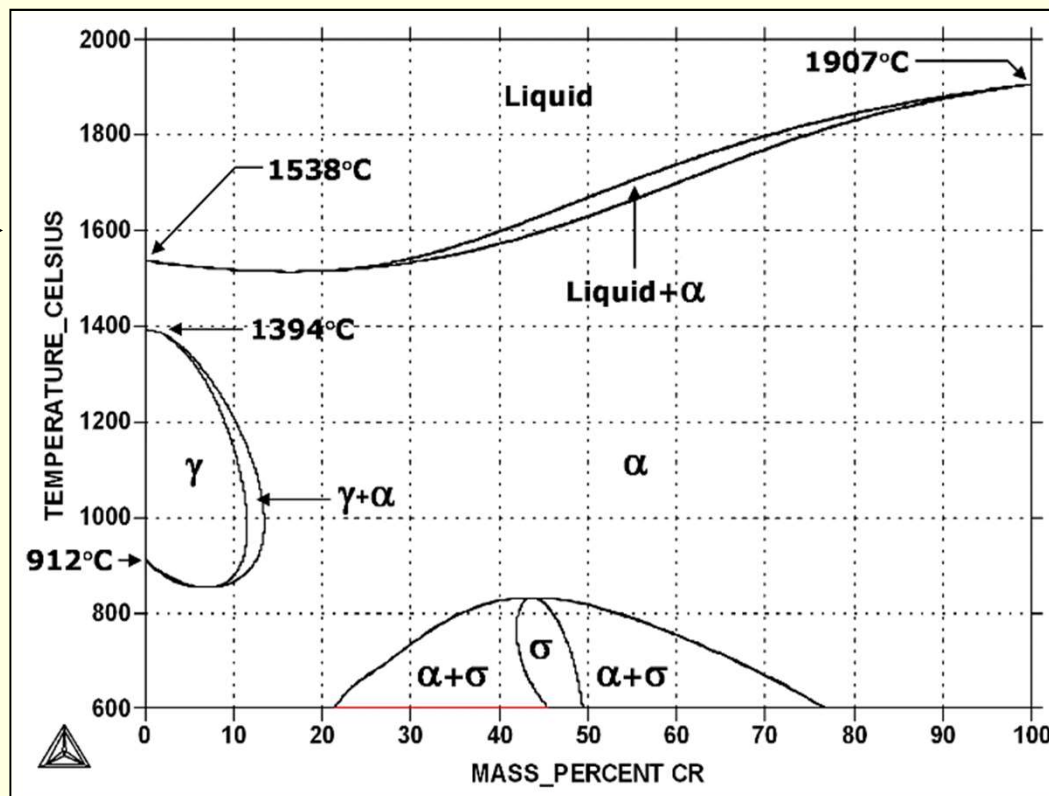
- Primer: austenitni čelik sa 18%Cr i 8%Ni.
- Primer: **Hadfieldov** čelik sa 13%Mn, 1,2%Cr i 1%C. U ovom čeliku u Mn i **C** stabilizuju austenit.



- **Dijagram Fe-Ni**, (legura sa 10%Ni postaje potpuno austenitna kada se zagreje na 700°C. Pri hlađenju se transformacija γ u α odvija na temperaturama 700-300°C).

Primer: Ferito-obrazujući elementi

- Najvažniji elementi u ovoj grupi su **Cr, Mo, W, Si, i Al**.
- Legure Fe-Cr u čvrstom stanju koje sadrže **više od 13%Cr** su feritne na svim temperaturama do početka topljenja.
- Feritni čelici koji se koriste za transformatorske limove. To je nisko ugljenični čelik sa oko 3%Si.



■ Dijagram Fe-Cr,

Odstupanja

- Uobičajeno je da se suprotni efekti legirajućih elemenata poništavaju, međutim postoje i odstupanja...
- Najbolji primer je hrom (Cr) – ako se u čelik koji sadrži Ni doda Cr u količini od oko 18% onda Cr pomaže da se stabilizuje γ faza (austenit) iako je Cr ferito-obrazujući element.
- Ova osobina je dovela do stvaranja klase vrlo poznatih austenitnih čelika (npr. 18Cr8Ni).

Karbido-obrazujući elementi

- Većina elemenata koji obrazuju karbide obrazuju i ferit.
- Svi karbidoobrazujući elementi su iz grupe prelaznih metala i imaju veći afinitet prema ugljeniku od Fe
- Afinitet elemenata prema ugljeniku raste u sledećem nizu: → Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Ta, Zr.
- Uvek je u nekoj modifikaciji prisutna KZC rešetka

Karbido-obrazujući elementi – legirani karbidi

- Neki karbidi ne sadrže željezo, kao što su Cr_7C_3 , W_2C , VC , Mo_2C .
- *Kompleksni karbidi* sadrže i željezo - na pr. $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$.
- Karbidi su obično označena kao M_6C , M_{23}C_6 i MC . Slovo M predstavlja sve atome metala.
- Tako M_6C može da predstavlja $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ ili $\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{C}$; M_{23}C_6 može da predstavlja Cr_{23}C_6 , a MC može da predstavlja VC .

Stabilizatori karbida

- Stabilitnost karbida zavisi od prisustva drugih elemenata u čeliku.
- Uticaj elemenata na stabilizaciju karbida:

Al	Cu	P	Si	Co	Ni	W	Mo	Mn	Cr	V	Ti	Nb	Ta
0	0	0	0	0.2	0.3	2	8	11.4	28		Rastuće		

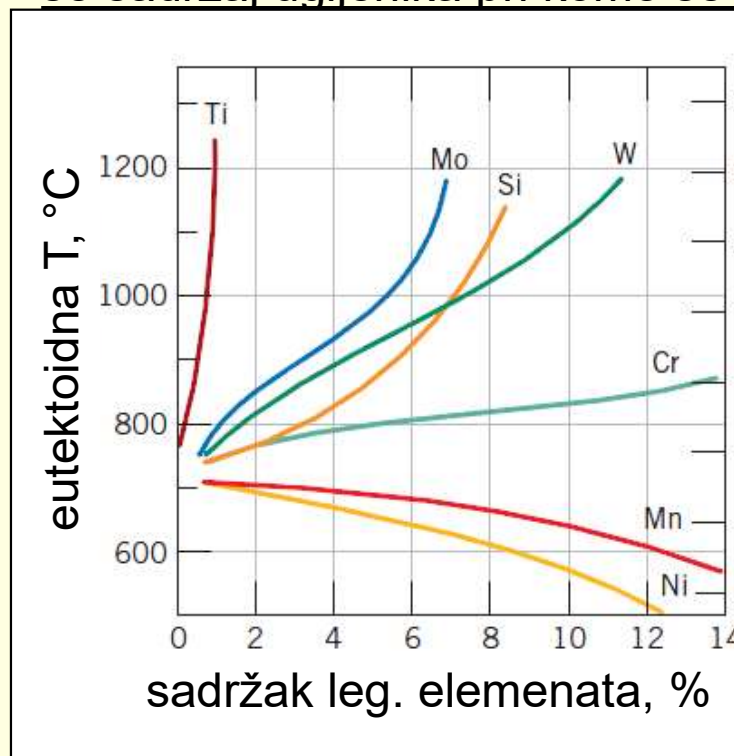
- Npr. **Mn**, koji je slab karbidoobrazujući element, relativno je jak stabilizator karbida.
- U praksi se **Cr najčešće koristi kao stabilizator karbida.**

Grafito obrazujući elementi

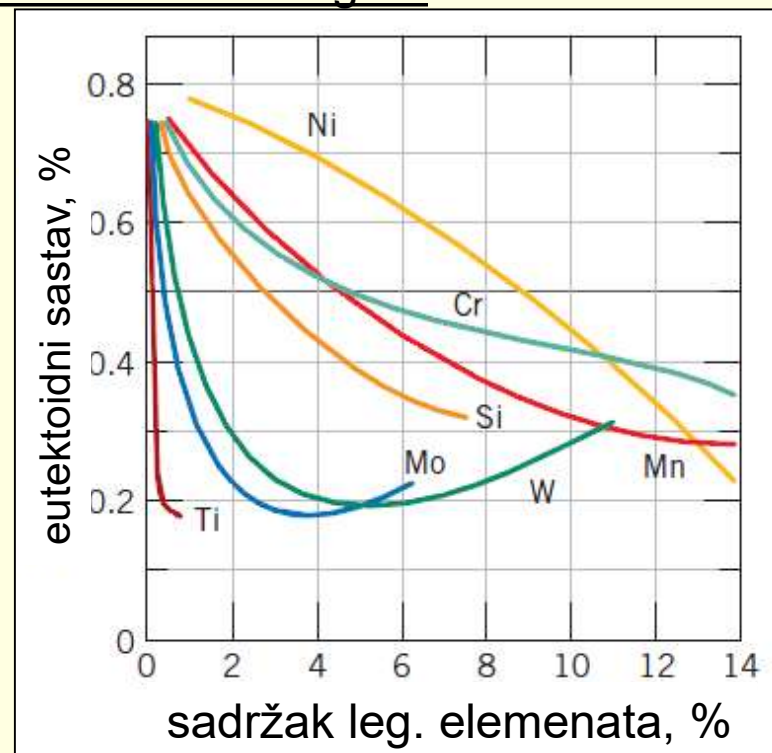
- Ni, Si, Al, Cu – imaju KPC rešetku
- Stvaraju takve uslove da ugljenik teži da se izdvoji u vidu grafita
- Obično su γ obrazujući elementi

Uticaj legirajućih elemenata na eutektoidnu tačku

- Temperaturu A1 **snižavaju** elementi koji obrazuju **austenit**, a **povećavaju** oni koji obrazuju **ferit**.
- Takođe, sa porastom ukupnog sadržaja većine legirajućih elemenata snižava se sadržaj ugljenika pri kome se formira eutektoidna legura

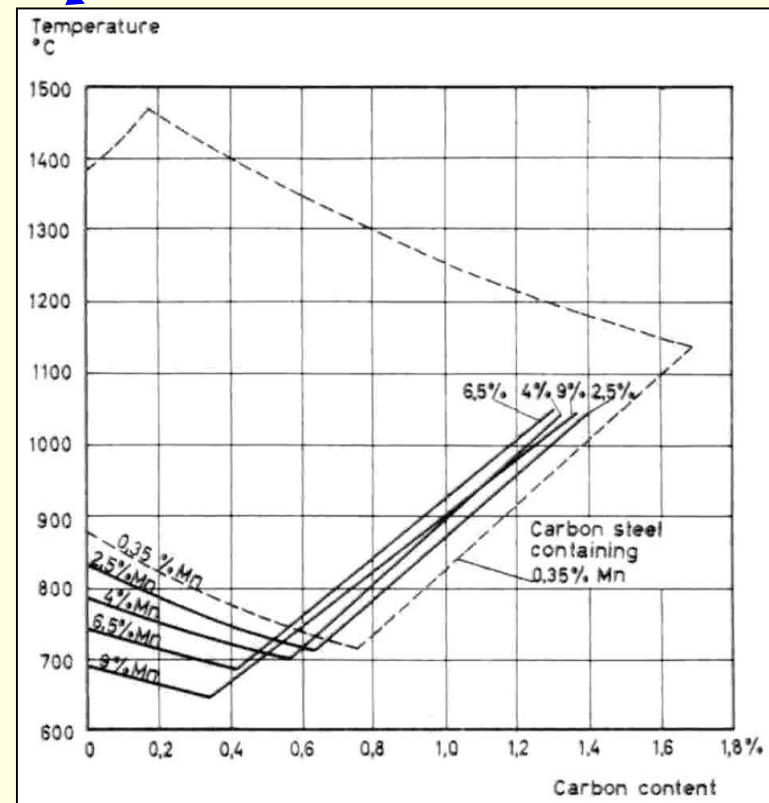
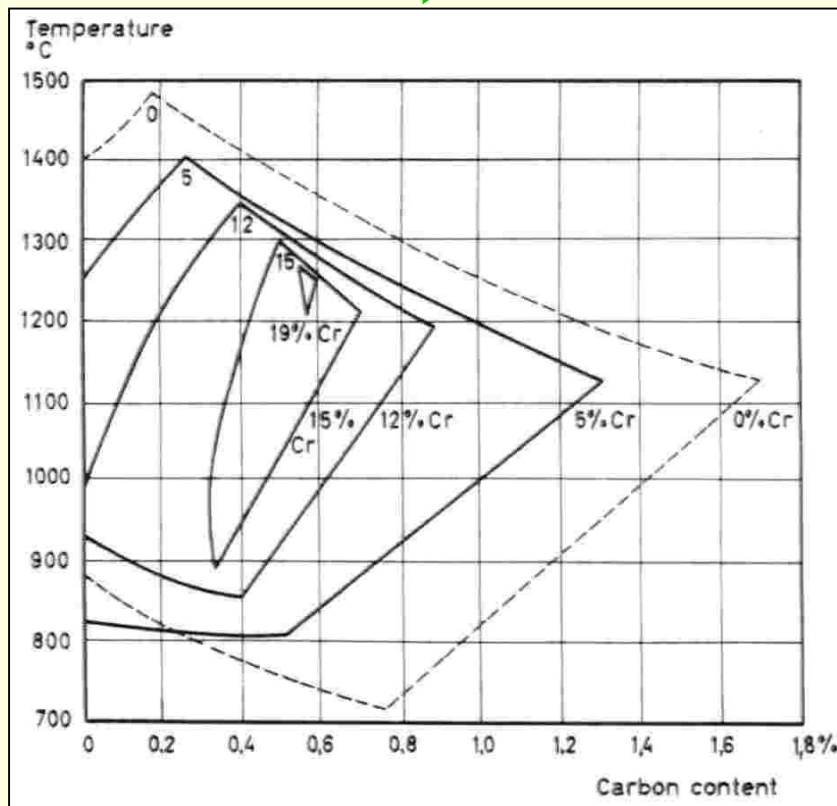


Uticaj sadržaja legirajućih elemenata na A1 temperaturu



Uticaj sadržaja legirajućih elemenata na ⁵⁶sastav eutektoidne legure

Uticaj sadržaja **Cr** i **Mn** na položaj eutektoidne tačke



sa porastom sadržaja legirajućih elemenata, eutektoidna legura se formira na nižem %C

Poemeranje A3 i A4 sa legiranjem

Podsećanje na karakteristične temperature železa:

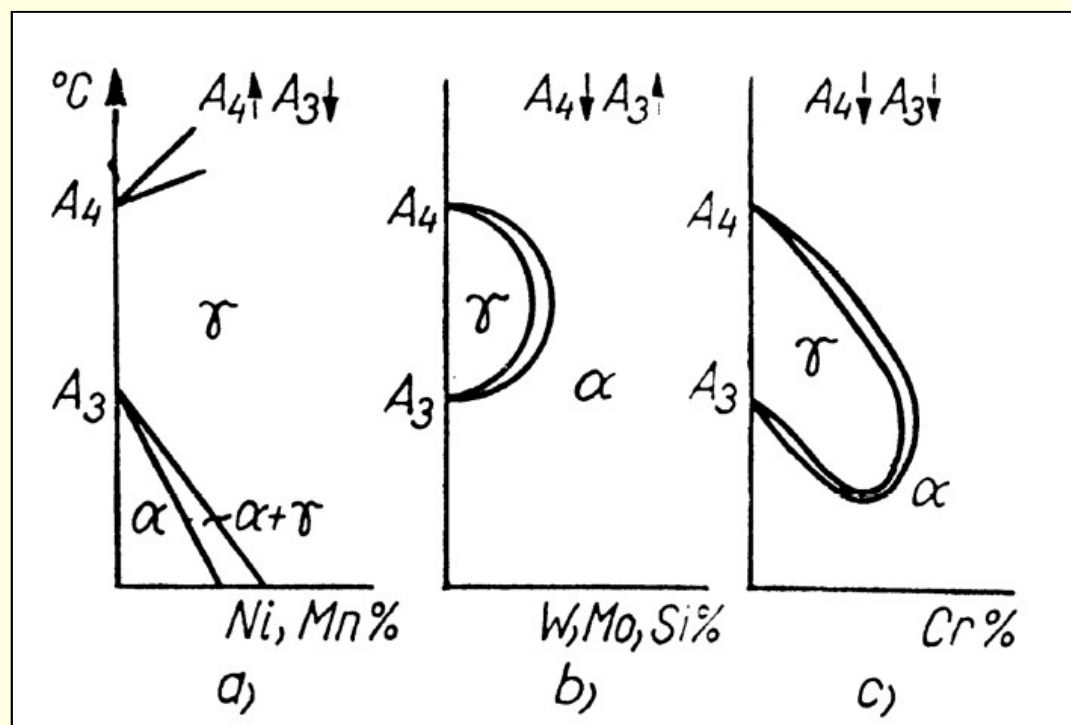
1536°C - δ

1392°C **A4** - $\gamma \rightarrow \delta$

911°C **A3** - $\alpha \rightarrow \gamma$

769°C **A2** - α magnetično \rightarrow α nemagnetično (β) – Kiri T

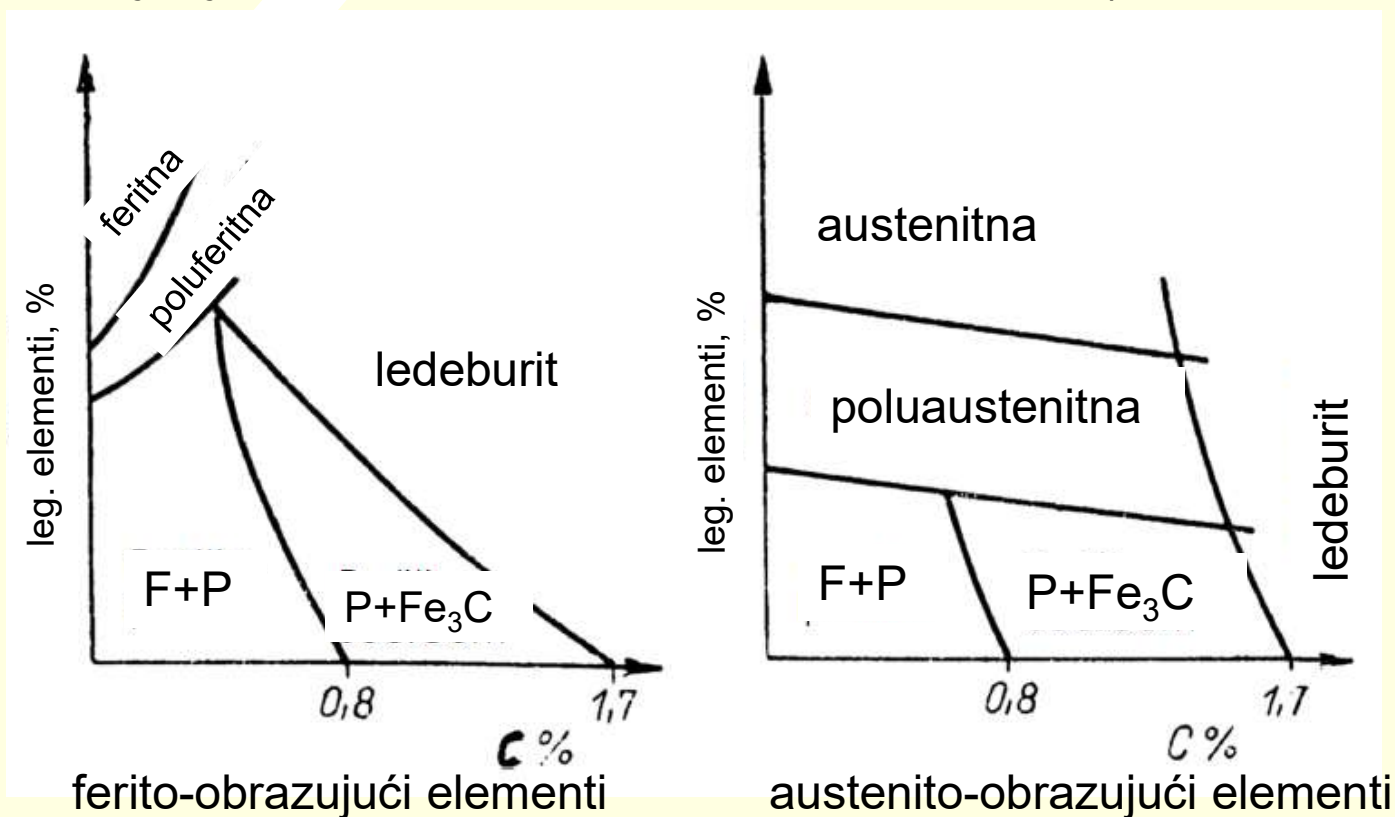
723°C – **A1** eutektoidna transformacija



Uticaj legirajućih elemenata na A4 i A3 temperature

Uticaj legirajućih elemenata na mikrostrukturu čelika

Ferito i austenito-obrazujući elementi utiču na finalnu mikrostrukturu (tako se javlja i struktura **ledeburita** u alatnim čelicima)

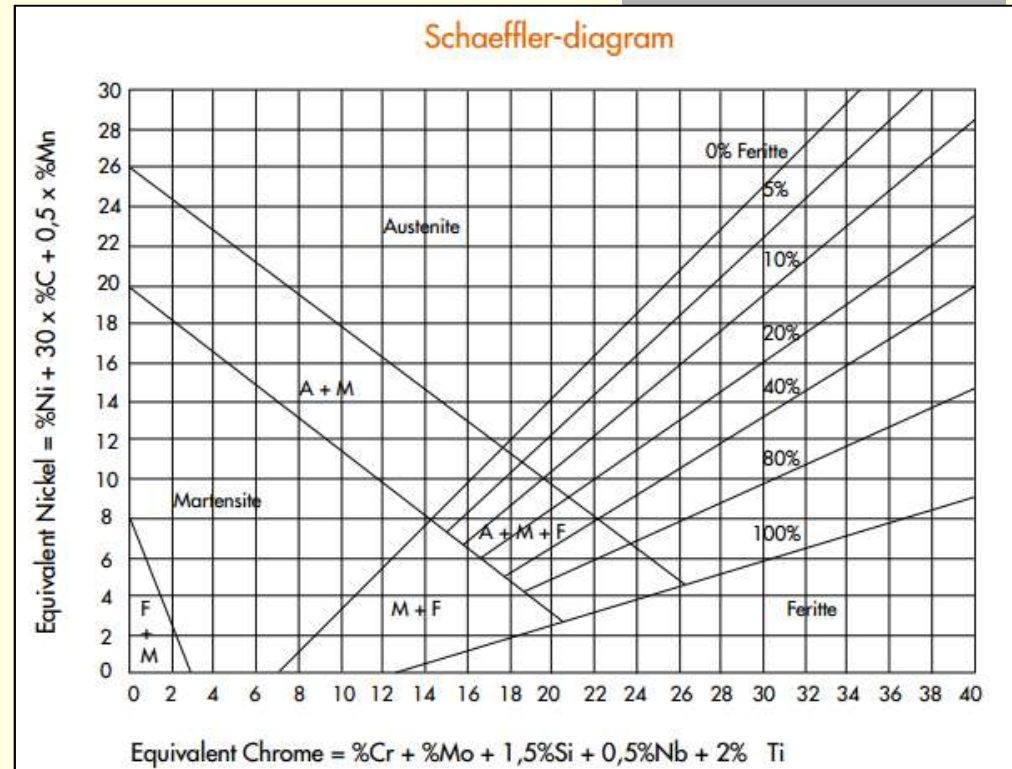


Šeflerov dijagram (Schäffler - De Long)

- Šeflerov dijagram je pogodan za prikaz uticaja hemijskog sastava dve grupe elementa (izražne preko ekvivalenata Cr i Ni) na dobijanje strukture pri brzom hlađenju sa 1050°C do sobne T.

- Vrlo važan za zavarivanje CrNi čelika sa do 0.12%C, ali

- ne može da prikaže udeo karbidne faze!



$$Cr_{eq} = (Cr) + 2(Si) + 1.5(Mo) + 5(V) + 5.5(Al) + 1.75(Nb) + 1.5(Ti) + 0.75(W)$$

$$Ni_{eq} = (Ni) + (Co) + 0.5(Mn) + 0.3(Cu) + 25(N) + 30(C)$$

Primer: Hadfild čelik sa 13% Mn je austenitni zbog visokog sadržaja ugljenika. Ako se ugljenik smanji na oko 0,20% čelik postaje martenzitni.

Uticaj legiranja na rast zrna

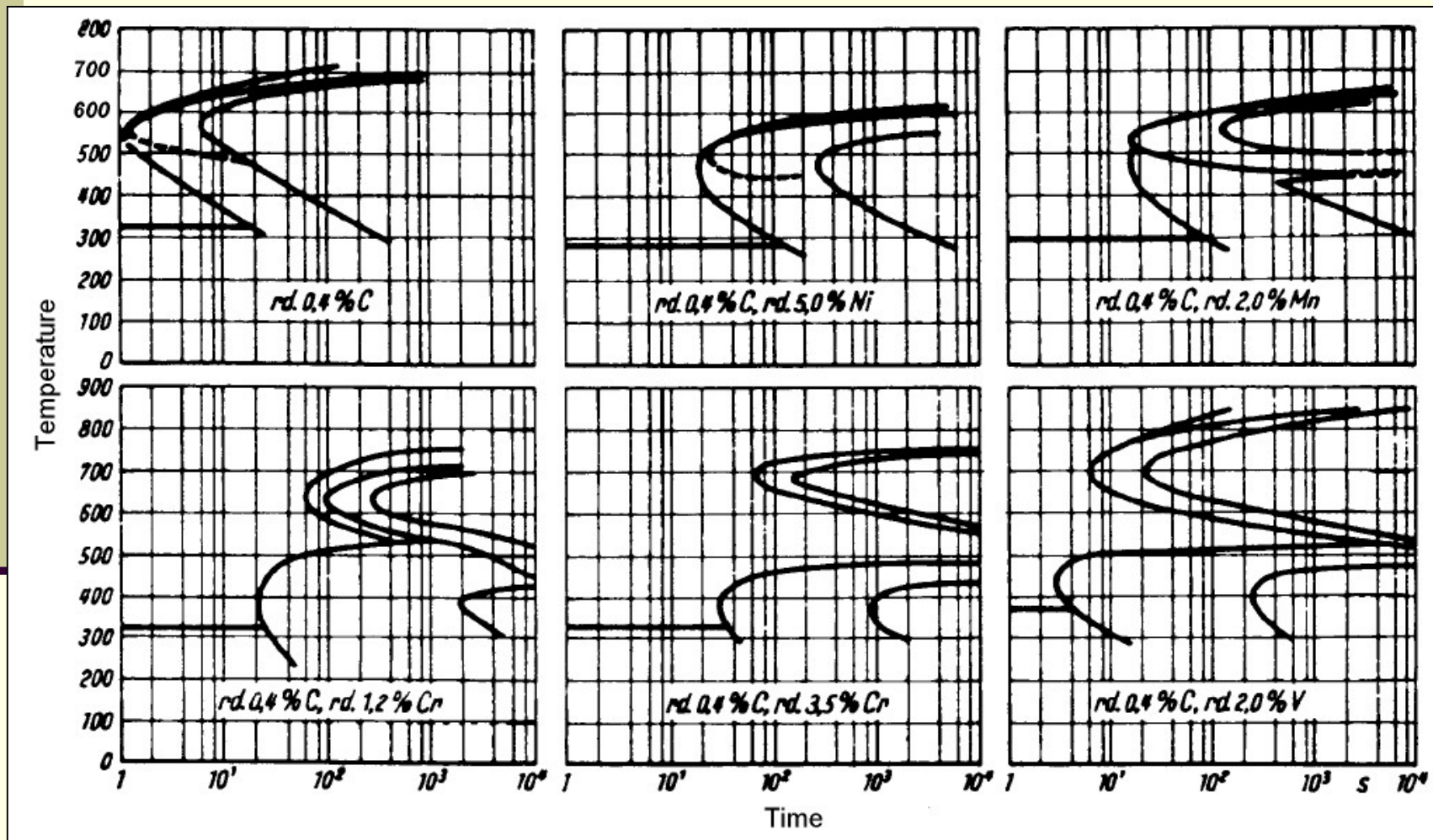
- Rafinirajući efekat imaju Ti, V, Nb, Al, Zr jer formiraju **fine karbide, nitride i karbonitride na granicama zrna** koji sprečavaju migraciju granica (npr. V, koji dodat u malim količinama, oko 0,1%, sprečava rast zrna formiranjem karbida i nitrida)
- Kompleksni karbidi W i Mo takođe sprečavaju rast zrna.
- Al-N čestica, ograničava rast zrna na temperaturama koje se obično koriste u termičkoj obradi (finozrni čelici*).
- *Finozrni čelici kada se koriste za čelične konstrukcije i posude pod pritiskom poznati su kao "mikrolegirani" čelici.

Uticaj legirajućih elemenata na temperaturu martenzitne transformacije

- Svi legirajući elementi, **snižavaju** M_s i M_f temperaturu **izuzev Co i Al**.
- **Raste** sadržaj zaostalog austenita sa % leg. elemenata
- **Opada** kritična brzina hlađenja.
- **Raste prokaljivost**
- Kod većine čelika, koji sadrže više od 0,50%C, M_f leži ispod sobne temperature.
- To ukazuje da ovi čelici praktično uvek imaju nešto zaostalog austenita.
- Svi legirajući elementi osim Co usporavaju obrazovanje ferita i cementita, tj. krive transformacije u TTT dijagramu su pomerene **udesno**.

Uticaj leg. elemenata na izgled TTT dijagrama

Pri istom sadržaju C od 0,4% ostali legirajući elementi menjanju izgled krivih



Uticaj na temperaturu martenzitne transformacije

- *Uticaj legirajućih elemenata može da se vidi i iz izraza za određivanje M_s temperature. M_s može da se izračuna unoseći sadržaj svakog elementa (%). Jednačina važi samo ako su svi legirajući elementi potpuno rastvoreni u austenitu.*

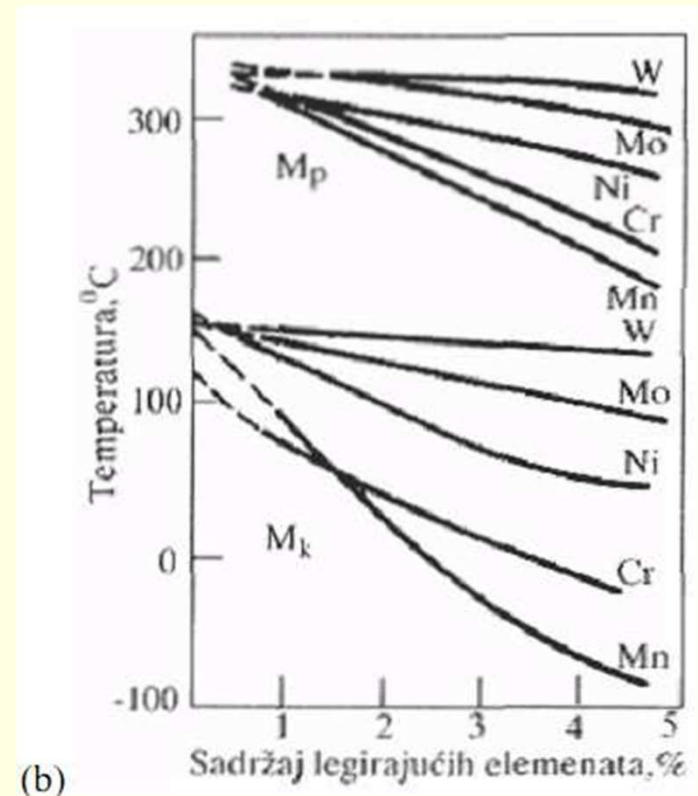
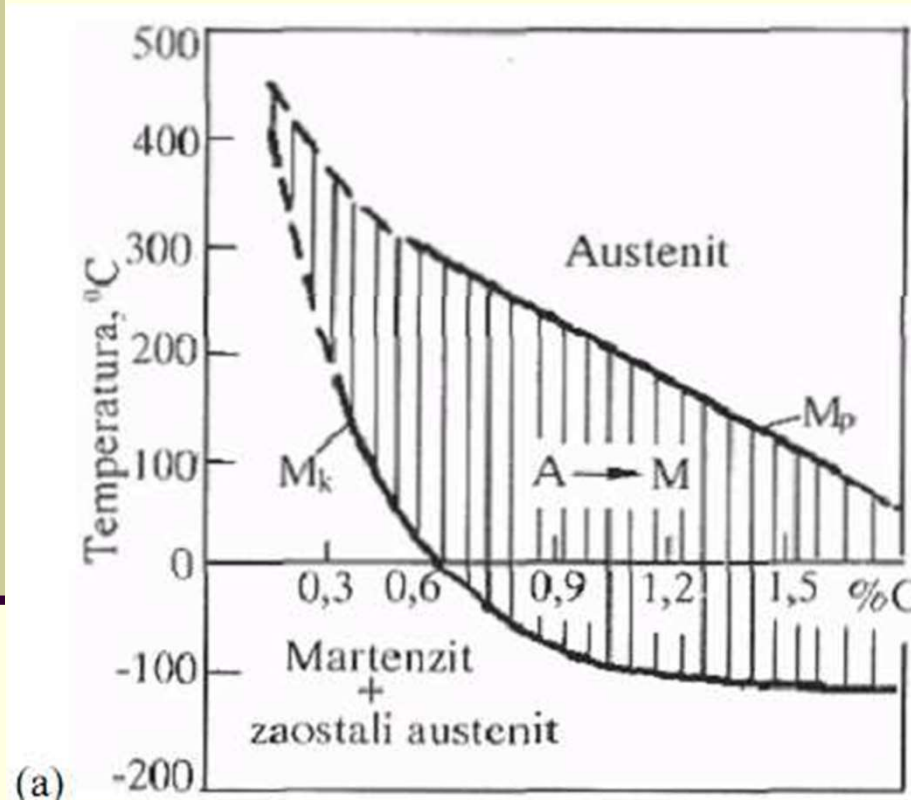
$$M_s = 561 - 474C - 33Mn - 17Ni - 17Cr - 21Mo$$

- Za visoko i srednje legirane čelike predložena je sledeća jednačina:

$$M_s = 550 - 350C - 40Mn - 17Ni - 20Cr - 10Mo - 8W - 35V - 10Cu + 15Co + 30Al$$

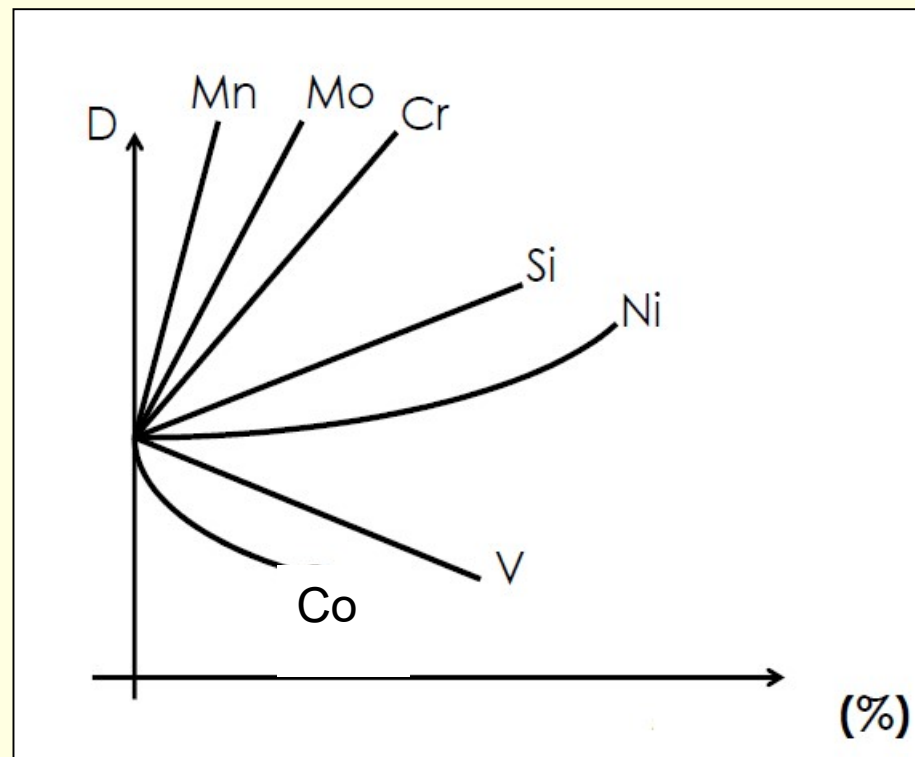
- **Ugljenik ima veći uticaj na M_s temperaturu od svih legirajućih elemenata.**

Uticaj legirajućih elemenata na temperaturu martenzitne transformacije



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

Efekat legirajućih lelemnata na prokaljivost po Dzomini metodi



Mn, Mo, Cr, Si i Ni povećavaju prokaljivost (dubinu sloja na kojoj se dostiže martenzit, dok npr V i Co snižavaju prokaljivost

■ Hvala na pažnji😊