Mašinski materijali 3

Gvožđa

Rude železa

- U prirodi se nalaze oksidne, sulfidne i karbonatne rude železa.
- **Najčešće se koriste oksidne rude železa:**
  - ***magnetit*** **(Fe_3O_4),**
  - ***hematit*** **(Fe_2O_3) i**
  - ***limonit*** **($2Fe_2O_3x3H_2O$) – nizak sadržaj Fe**
- **Sulfidne i karbonatne rude** se pre ubacivanja u visoku peć prženjem **prevode u oksid**.
- Rude železa redovno sadrže i **okside drugih metala**: silicijum-dioksid (SiO_2), glinica (Al_2O_3), kreč (CaO), magnezijum-oksid (MgO), itd., kao i jedinjenja **S** i **P** - **jalovina**.

Istorija dobijanja čelika i gvožđa

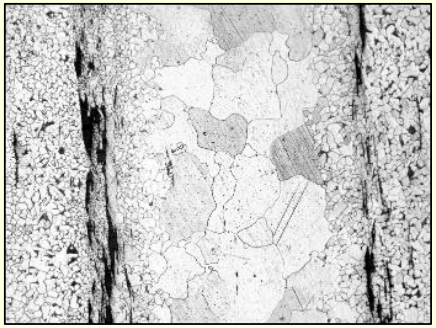
- Od najstarijih vremena (npr. 1800. i 1200. p.n.e. nalazišta u Indiji) se koristilo železo Fe
- U sklopu procesa dobijanja Cu iz rude bakra, jedan od sporednih proizvoda je bilo i **železo**
- Ruda železa se dodavala da bi pokupila jalovinu i posle livenja se izdvajala u vidu sunđeraste mase - šljake koja sadrži veću količinu Fe
- Dugotrajnim kovanjem sunđerastog železa moglo je da se dobije čisto železo, ali zbog niskih mehaničkih osobina nije imalo tehnološkog značaja
- Tek otkrićem da se dodatkom ugljenika iz npr. uglja povećava čvrstoća otkovaka zaživela je potreba za upotrebom legura Fe.

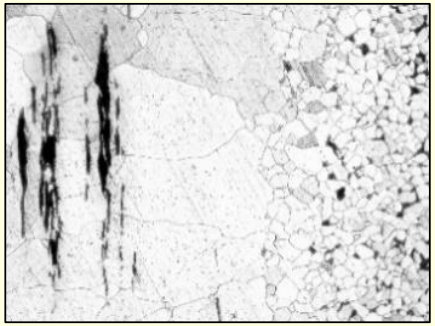
Istorija dobijanja čelika i gvožđa

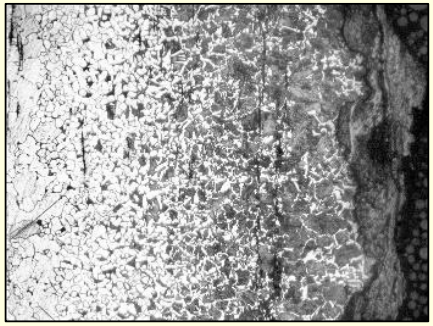
- Prvobitno, pre osvajanja modernih tehnologija livenja, legure koje najviše podsećaju na današnji čelik su dobijane u nekoliko faza.
- Ruda železa i ugalj su zagrevani u pećima malih dimenzija (tipa plitkih ložišta) u koje je uduvavan vazduh.
- Reakcijom ugljenika iz uglja i vazduha dobija se ugljen monoksid, koji u nastavku redukuje železo iz rude na oko 800°C.
- Pošto se u plitkim ložištima postizala relativno niska niska temperatura, nije moglo da bude ostvareno topljenje legure železa sa višim sadržajem ugljenika.
- Umesto legure železa, dobijan je proizvod od troske koja se topi na oko 1100°C i koja, dok ističe, sakuplja čestice železa, formirajući odlivak koji je kasnije odlazio na kovanje.
- Proizvod je bio **sunđerasto gvožđe**, nalik današnjim gvožđima sa puno šljake koje se dugotrajnim kovanjem oblikovalo i oslobađalo od nečistoća
- Druga opcija je bila da se dugotrajnim zadržavanjem gvožđa u tečnom stanju omogući difuzija i segregacija ugljenika u određnim oblastima

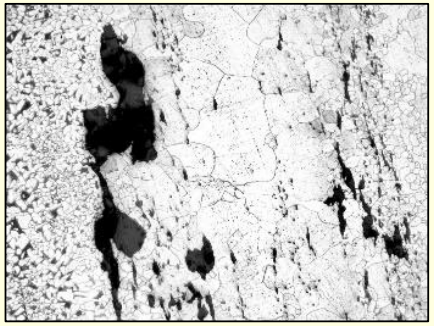
Istorija dobijanja čelika i gvožđa

- Zupčanik srednjevekovnog toranjnskog satnog mehanizma









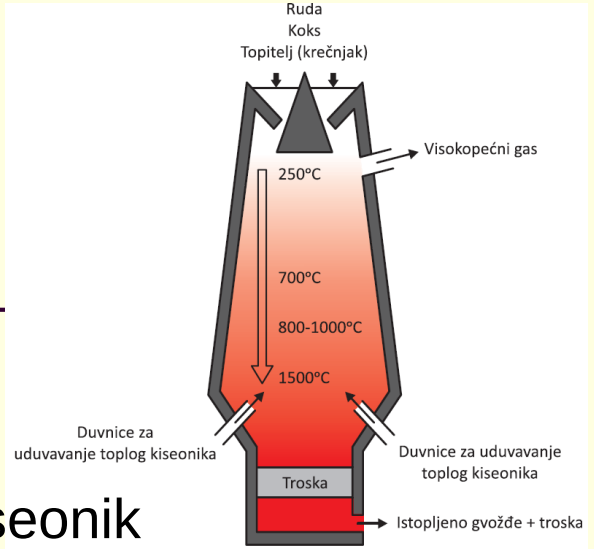
п.п. средина 25x п.п. средина 50x п.п. површина 50x у.п. површина 50x

Ферит неуједначене величине зрна као последица израде. Издужени укључци од ковања. Обогаћен површински слој угљеником у коме се појављује и перлитна фаза. Деформисане шупљине од ливења.

Istorija dobijanja čelika i gvožđa

- Kovanjem se izbacivao ugljenik iz legure. Što je proces kovanja bio duži, finalni proizvod je imao manje ugljenika, odnosno čistiju feritnu strukturu.
- Kako je napredovala tehnika dobijanja legura železa građene su više peći u kojima je mogla da se razvije temperatura topljenja gvožđa sa oko 2% ugljenika od oko 1150°C.
- Proizvod je bio tipa današnjih legura koje nazivamo gvožđa, koja su krta i od kojih su mogli da se prave samo odlivci. Tek od 15. veka, napredovanjem tehnologije livenja, ovi proizvodi su mogli da se koriste za kovanje.
- Prva visoka peće je napravljena u Nemačkoj u 12. veku
- U Srbiji je zabeleženo postojanje visoke peći od 14-15. veka

Savremeno dobijanje sirovine za preradu u gvožđe i čelik



Slika 2.2. Šematski prikaz visoke peći

- **<u>Osnovne sirovine</u>** za visoke peći su:
  - rude železa
  - koks – služi za *redukciju rude* tj. oduzima kiseonik (*dezoksidacija)*
  - topitelji - prevode sastojke iz jalovine u lako topljivu **trosku,** npr krečnjak ($CaCO_3$) ili pesak, kvarc (SiO_2).
- U visokoj peći ruda železa se redukuje u metal.
- Na temperaturama 1150-1250 °C počinje obrazovanje prvih kapi tečnog gvožđa.
- **Proizvodi** visoke peći su:
  - *rastopljeno gvožđe, (3÷5%C; 0,2÷2%Si; 0,2÷3%Mn; 0,1÷2%P; 0,02 ÷ 0,06%S)*
  - *tečna troska i*
  - *visokopećni gas*.

Oni nisu finalni proizvodi, već se koriste kao sirovine za dalju preradu.

Dobijanje sirovine za preradu u čelik i gvožđe

- Rastopljeno gvožđe u zavisnosti od hemijskog sastava i brzine očvršćavanja služi kao sirovina za preradu u čelik ili livena gvožđa.
- Sirovo gvožđe se prethodno tretira u cilju smanjenja sadržaja neželjenih elemenata S, P i Si.
  - Hemijski sastav gvožđa za preradu u čelik je: **2-4% C**, 0,9-1,4% Si, 0,5-1,5% Mn, do 0,25% P i do 0,12% S,
- **Gvožđe za preradu u čelik** najčešće se dobijaju bržim hlađenjem koje se postiže livenjem u *metalne kalupe*, pri čemu je ugljenik izdvojen u vidu *cementita.*

Livena gvožđa

- Livena gvožđa se dobijaju **pretapanjem** sirovog gvožđa (uz dodatak starog gvožđa)
- Gvožđa imaju **nisku plastičnost i malu otpornost prema udaru**.
- Dobra svojstava su:
  - livkost,
  - široki opsega čvrstoće i tvrdoće,
  - u većini slučajeva dobra obradivosti rezanjem, i
  - niska cena.

Livena gvožđa

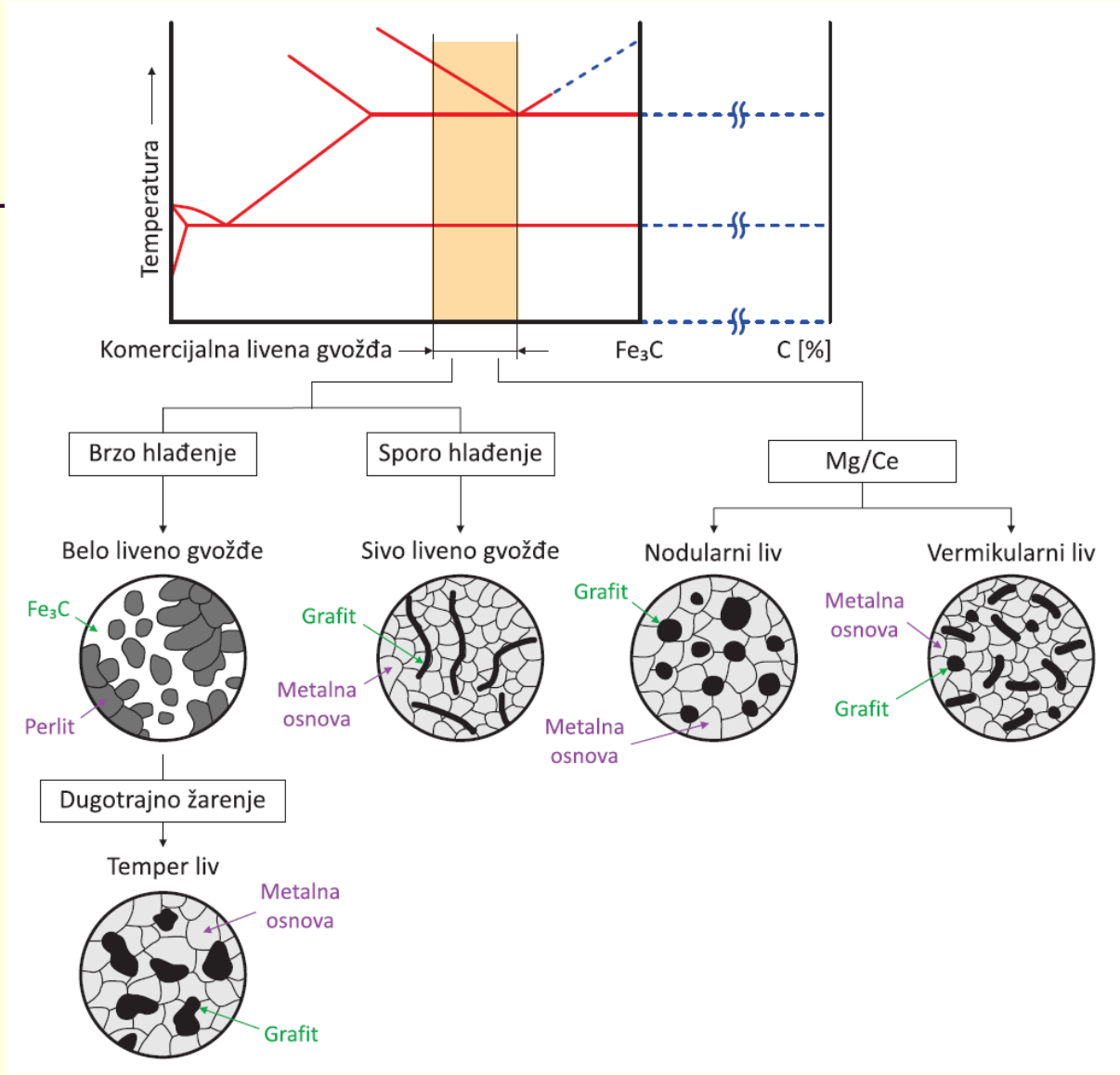
- Ako je potrebno popraviti neka svojstva, npr. otpornost prema habanju i koroziji, **livena gvožđa se dodatno legiraju.**

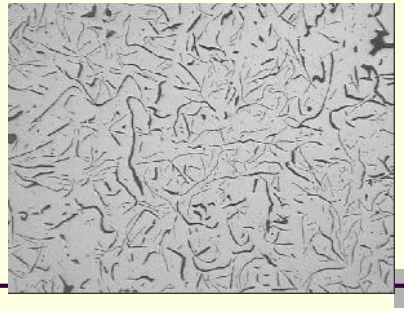
- Prednosti livenih gvožđa u odnosu na čelike su:
  - bolja svojstva livenja,
  - niža temperatura topljenja za 300-400°C i
  - niža cena.

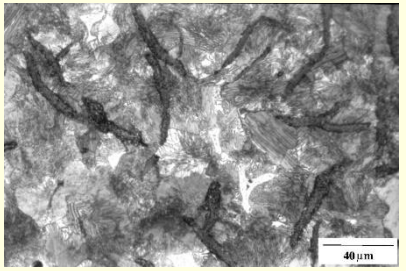
- Struktura livenog gvožđa prvenstveno zavisi od:
  - hemijskog sastava i
  - brzine hlađenja odlivaka.

Klasifikacija gvožđa

- Livena gvožđa se dele prema **obliku grafita i brzini hlađenja** na:
  1. Sivo liveno gvožđe -**sivi liv**
  2. Belo liveno gvožđe – **beli liv**
  3. **Temper liv**
  4. **Vermikularni liv**
  5. **Nodularni liv**
  6. ADI materijali (Austempered Ductile Iron - termički obrađeni nodularni liv)







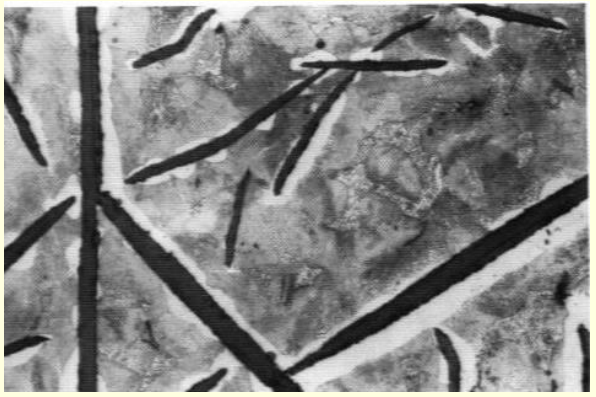
Sivi liv

- “Višak” ugljenika preko 2,11% se pojavljuje u obliku grafita
- Sadrže Si (do 3 %) koji uz sporo hlađenje izaziva inokulaciju grafita.
- Grafit je u obliku lamela
- Lamele nepovoljno utiču na svojstva liva, a prvenstveno na žilavost.

npr. Rm: 200-400MPa; A<0,5%

- **Usitnjavanjem** lamela zatezna čvrstoća i žilavost liva se povećavaju.

feritna osnova sa lamelama grafita (tamno)



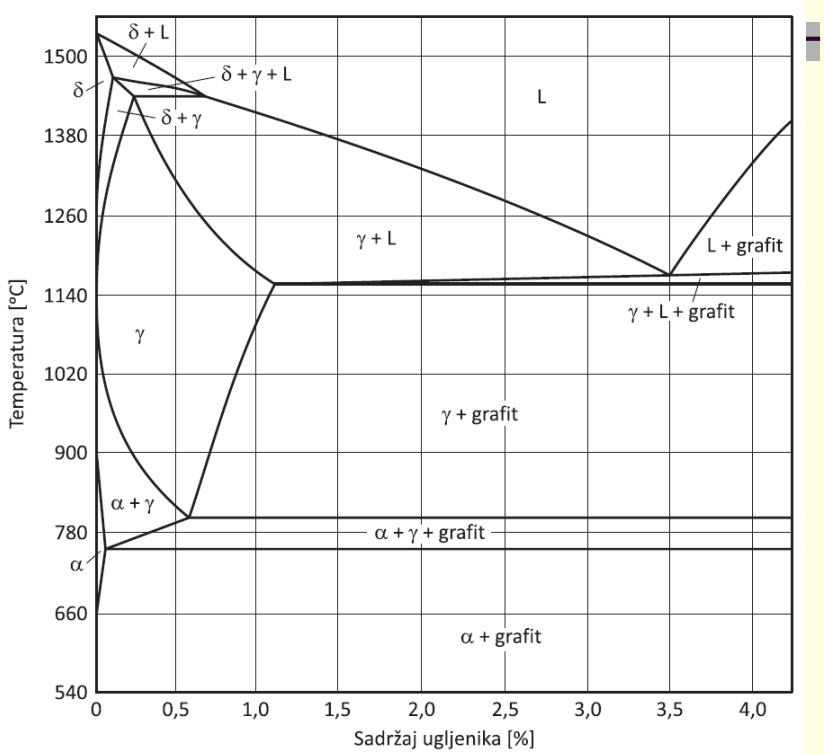
perlitna osnova (sivo) sa lamelama grafita (tamno).

Uticaj sadržaja Si na gvožđa

•Sadržaj **Si** je veoma značajan za osobine gvožđa jer **pomera eutektičku tačku**

•**Zbog značaja Si,** gvožđa se često klasifikuju kao **trojne legure Fe-C-Si**.

•Silicijum značajno **povećava livkost,** a **smanjuje žilavost**

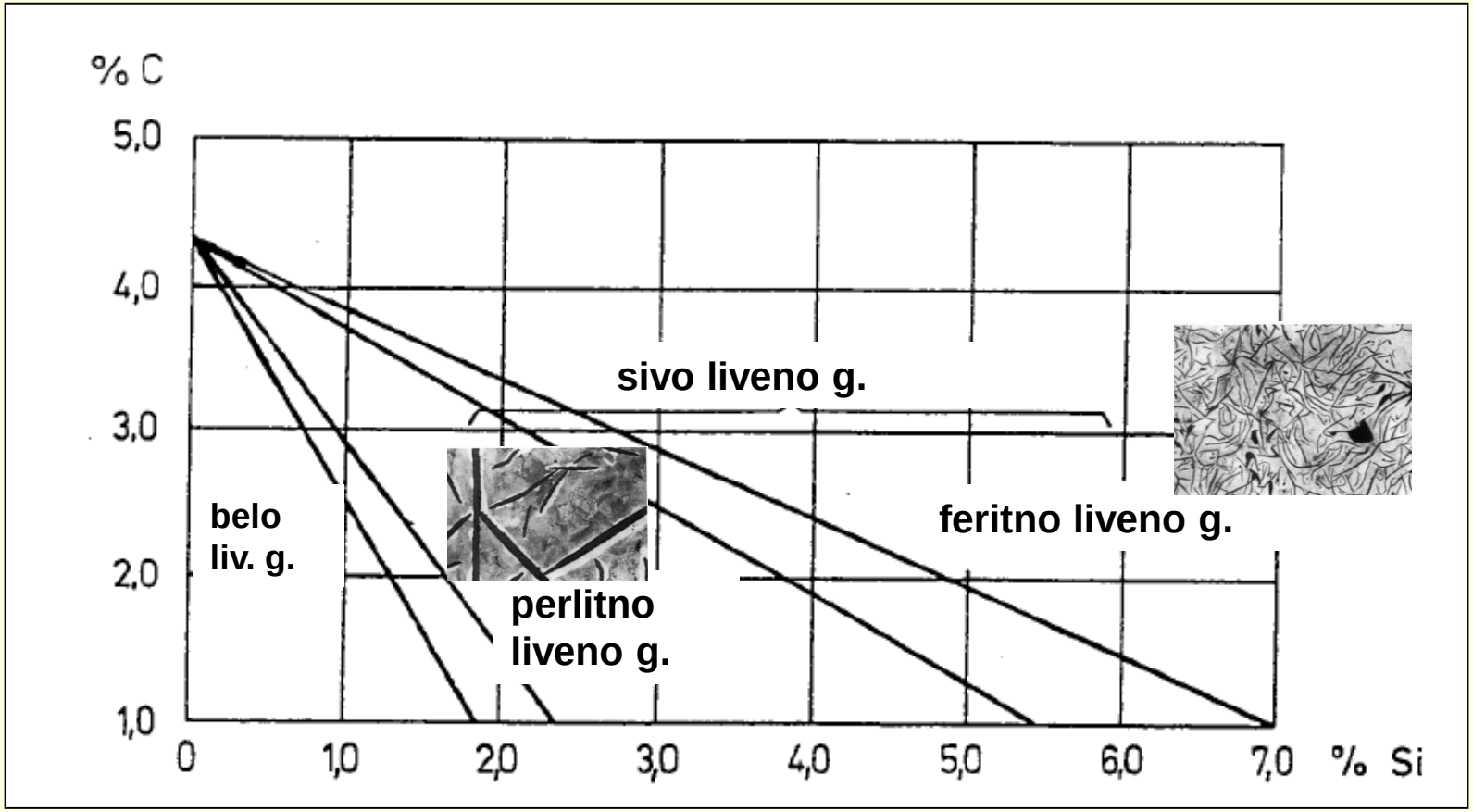


Dijagram stanja $Fe - C - Si$ pri $2,4\%$ Si

Uticaj sadržaja Si na pomeranje eutektičke tačke, C%

	Si %	0,03	0,93	1,74	2,73	4,68	6,99
eutektikum	(% C)	4,24	3,90	3,70	3,38	2,79	2,25

Uticaj sadržaja Si na gvožđa
Struktura osnove kod gvožđa – Maurerov dijagram



- Finalna mikrostruktura gvožđa zavisiće od brzine hlađenja i sadržaja Si

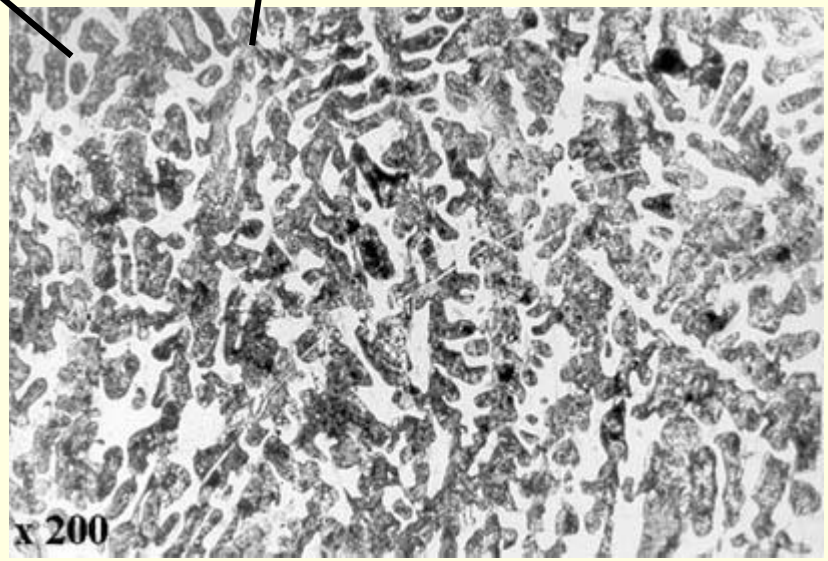
Sivi liv

- Osobine: jeftiniji je od ostalih livova, dobra livkost, niska čvrstoća, krtost, otporan prema habanju i koroziji, dobro se obrađuje rezanjem, dobro provodi toplotu i prigušuje vibracije.
- Primena: kućišta mašina alatki, kućišta pumpi i ventila, blokovi motora, klipovi, klipni prstenovi,…

Bela livena gvožđa

- “Višak” ugljenika preko 2,11% se pojavljuje u obliku cementita (Fe_3C)
- Dobijaju se brzim hlađenjem, sprečavanjem inokulacije grafita
- Mikrostruktura: cementit+metalna osnova (najčešće martenzit)

ledeburit II – podeutektičko belo liveno gvožđe ($P+Fe_3C$) sa 3.6%C



Belo liveno gvožđe

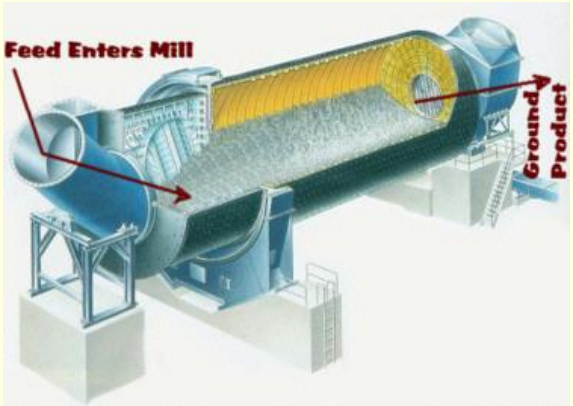
Osobine:

- visoka tvrdoća
- visoka otpornost na habanje
- krtost (sprečava širu upotrebu u inženjerstvu)
- teška obradivost rezanjem
- dodatak Cr (Mo, V, W, itd) omogućava dobijanje masivnih delova
- bez Cr se cementit dobija samo u površinskom sloju – ekvivalent cementaciji – tvrda površina i žilavije jezgro

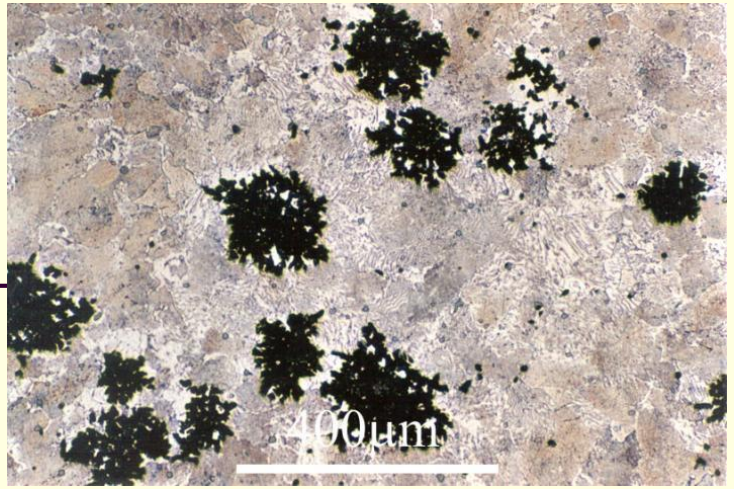
Ako pri hlađenju odlivka u površinskom sloju nastane tvrda cementitna struktura, a u unutrašnjosti odlivka struktura sivog liva, dobija se **odbeljeni liv**

Belo liveno gvožđe

- Primena: uređaji za mlevenje (uglja, mineralnih faza u betonskoj industriji,…), komponente pumpi, kašike rovokopača i dozera,… tamo gde je potrebna otpornost na habanje



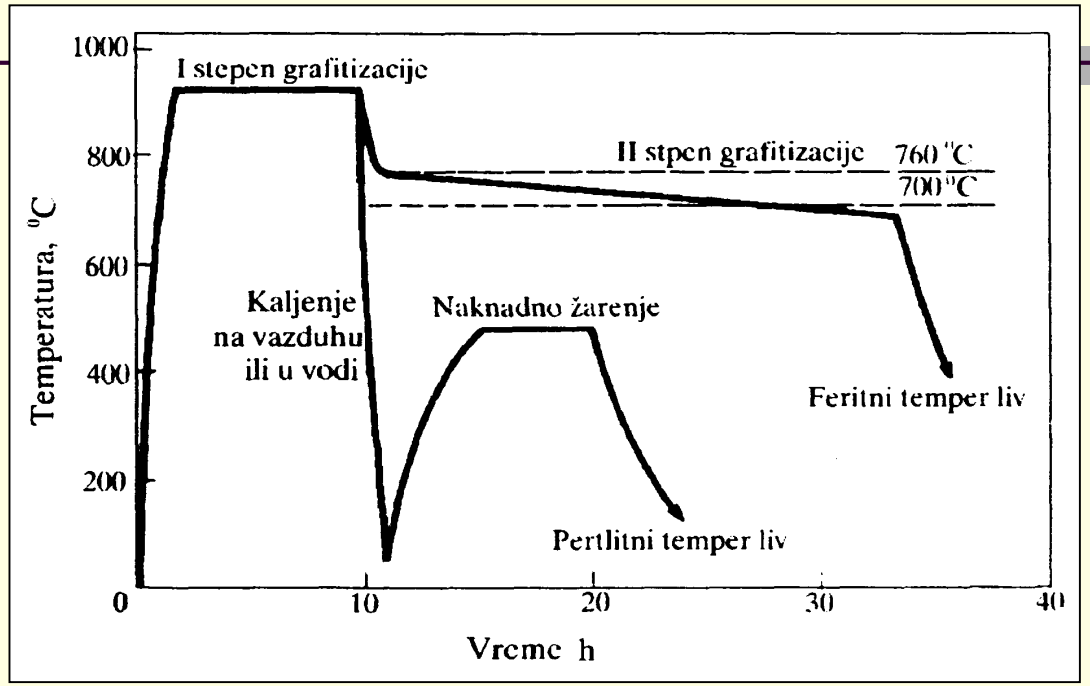
Temper liv



- Dobija se **iz belog livenog gvožđa dugotrajnim žarenjem** na visokim temperaturama u neutralnoj atmosferi (da bi se sprečila oksidacija)

- **Ugljenik se iz cementita, izdvaja u obliku temper-grafita (u obliku pahuljica)**
- Zatezna čvrstoća od 300 do 800 MPa
- Struktura osnove temper liva može da bude feritna, perlitna ili feritno-perlitna.

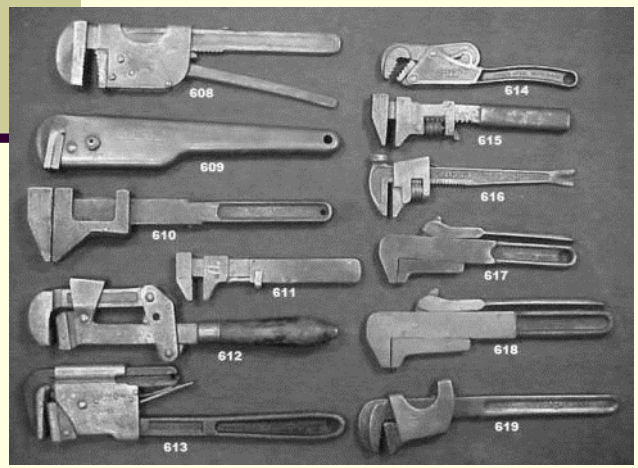
Režim dobijanja temper liva



- U **I fazi grafitizacije** - dugotrajno žarenje na 940-1020 °C.
- Za dobijanje temper liva sa **feritnom osnovom** posle završene I faze grafitizacije potrebno je veoma **sporo hlađenje** u temperaturnom intervalu 700-760 °C, da bi se sav C izdvojio u obliku grafita (**II faza grafitizacije**).
- Za dobijanje temper liva sa **perlitnom osnovom** posle završene I faze grafitizacije potrebno je naknadno kraće žarenje na oko 500 °C.

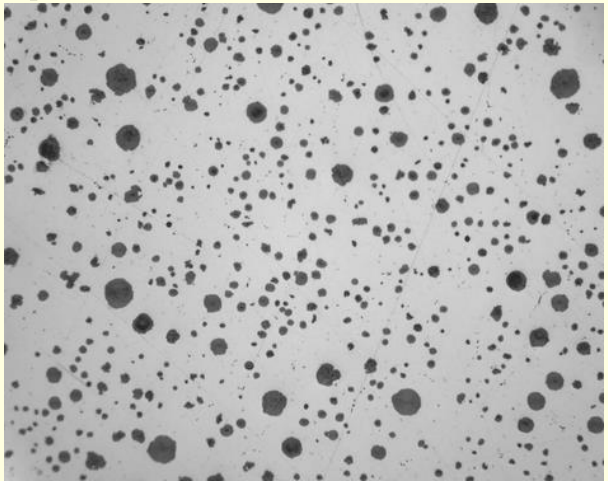
Temper liv

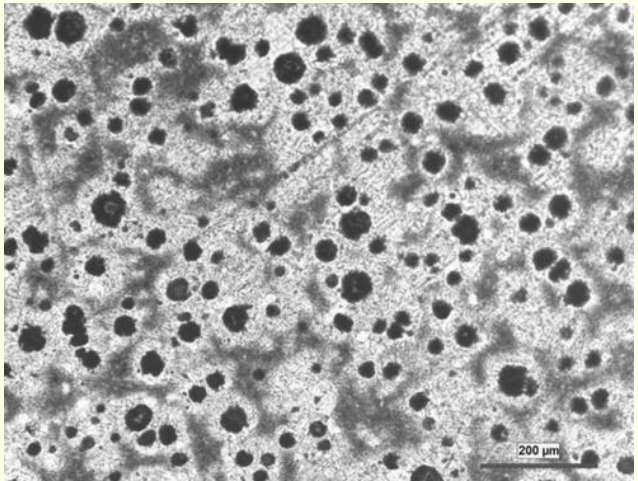
- Osobine: visoka cena (viša od sivog, vermikularnog i nodularnog liva, zato se njima zamenjuje), dobra livkost, čvrstoća i žilavost iznad sivog liva, apsorbuje vibracije
- Primena: ručni alat, cevni fitinzi, kućišta pumpi i ventila,…



Nodularni liv

- Grafit je u obliku loptica-nodula (najbolje 80%)
- Za postizanje grafita u obliku loptica, koristi se Mg i Ce
- Nodularni liv ima znatno višu čvrstoću i žilavost od sivog liva, što je posledica izdvojenog grafita u obliku nodula i smanjenog sadržaj sumpora i fosfora.
- Rm = 380-480MPa; A = 15-25%
- Struktura metalne osnove nodularnog liva zavisi od sastava i brzine hlađenja i može da bude **feritna, feritno perlita i perlitna**.

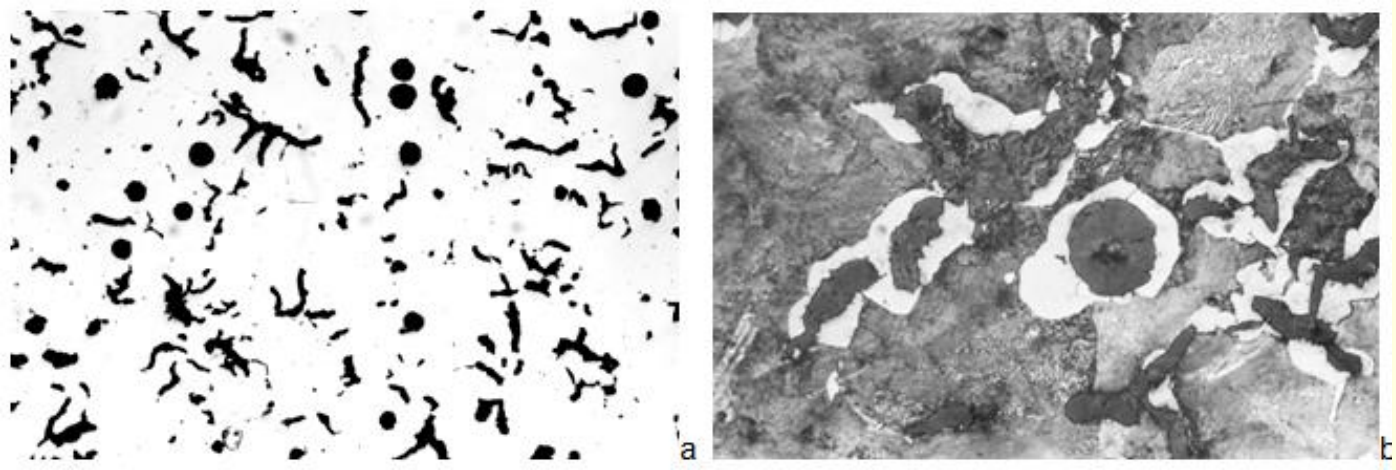




- Osobine: niska cena, dobra livkost, čvrstoća i žilavost iznad sivog, temper i vermikularnog liva, dobro prigušuje vibracije
- *Može se termički obrađivati i tako se dobija ADI materijal (Austempered Ductile Iron - čvrstoća kao kod čelika za poboljšavanje, žilavost nešto manja, ali upola jeftiniji)*
- Primena nodularnog liva i ADI materijala: radilice, cevi za vodovod, komponente kamiona i dr., kućišta pumpi i ventila

Vermikularni liv

- Grafit je u obliku kratkih štapića - vermikula
- U strukturi vermikularnog liva, pored vermikularnog grafita, nalaze se i nodule grafita (najviše do 20%).
- Dobija se dodavanjem manje količine inokulanata (legura Fe-Si-Mg)
- 3,1-4%C i 1,7-3%Si ,
- Prema osobinama nalazi između sivog i nodularnog liva.



Vermikularni liv

- Prednosti: veća termička provodljivost, bolja otpornost na termičke šokove i manja oksidacija na povišenim temperaturama
- Osobine: niska cena, dobra livkost, čvrstoća i žilavost iznad sivog liva i na nivou temper liva, odlično apsorbuje vibracije
- Primena: blokovi motora, izduvne grane, kućišta pumpi, fitinzi,…

Legirana livena gvožđa

- Legirana livena gvožđa nastaju dodavanjem legirajućih elemenata (Ni, Cr, Mo, Si, Mg, Cu, Al, Mn i dr.) čime se **usitnjavaju zrna, i popravljaju mehanička svojstva**.
- Legirana livena gvožđa se dele na:
  - niskolegirane (3% legirajućih elemenata)
  - srednjelegirane (3- 10% legirajućih elemenata)
  - visokolegirane (preko 10% legirajućih elemenata)

Zavisno od **svojstava i namene**, livovi se dele na:

- **Otporne prema habanju** (legirani Cr, Mo, Mg, Ni i Si)
- **Koroziono postojane** (legirani Si i Cr)
- **Hemijski postojane** (legirani Ni, Mn, Cu, Si i Cr)
- **Vatrootporne** (legirani Cr, Ni, Si i Al)
- Sa posebnim fizičkim svojstvima (legirani Ni, Cu, Cr i Si)

- Legirani livovi imaju dobra svojstva, ali im je cena visoka.

Visokolegirana bela livena gvožđa legirana hromom

- Visokolegirana bela livena gvožđa, koja se koriste pre svega zbog otpornosti na habanje, mogu da se podele u tri kategorije u odnosu na sadržaj hroma:
  - legure sa niskim sadržajem hroma (<2%Cr);
  - legirane Ni i Cr, sa sadržajem hroma do 11%Cr;
  - visokolegirana, sa sadržajem hroma >11%Cr.
- Karbidna faza koja se forimira u visokom sadržaju u ovim legurama uglavnom sadrži Cr - uobičajeno karbidi tipa M_7C_3, $M_{23}C_6$ i M_3C u funkciji sadrzaja Cr/C.
- Zbog odsjaja koji karbidi daju na prelomnoj površini ova vrsta gvozđa je i dobila naziv belo liveno gvozđe.

Visokolegirana bela livena gvožđa legirana hromom

- Osnova visokolegiranih belih livenih gvožđa u kojoj su smešteni karbidi može da bude austenit, perlit, martenzit.

Tvrdoća osnove za različite mikrostrukture

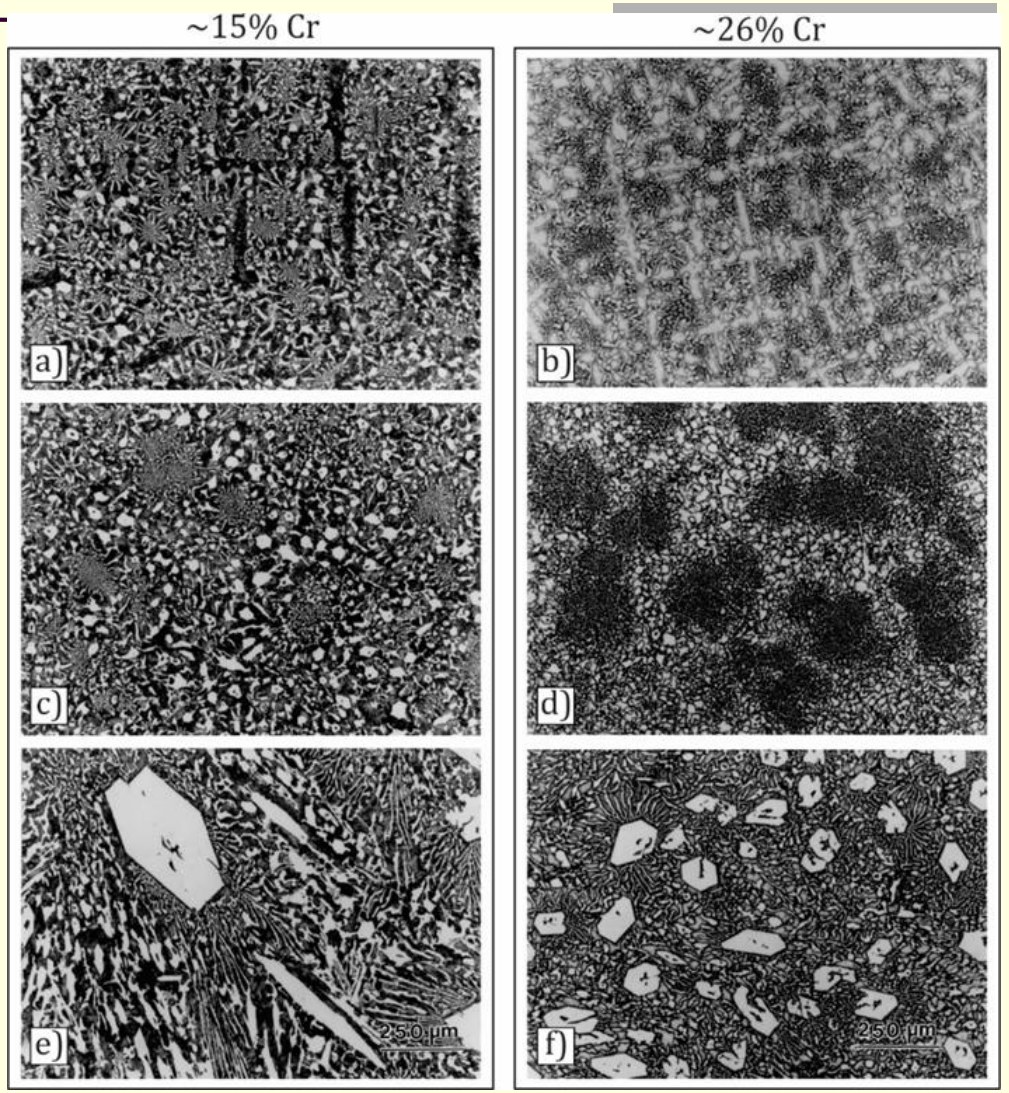
Mikrostruktura	Tvrdoća [HB]
Perlit [P]	320-500
Austenit [γ]	420-500
Martenzit [M] (u livenom stanju)	550-650
Martenzit [M] (nakon termičke obrade)	650-850

Visokolegirana bela livena gvožđa legirana hromom mogu da se koriste:

- u livenom stanju
- u livenom stanju sa žarenjem radi uklanjanja zaostalih napona
- posle žarenja sa ubrzanim hlađenjem u cilju dobijanja martenzita
- posle žarenja sa ubrzanim hlađenjem i žarenjem za uklanjanje zaostalih napona
- u meko žarenom stanju za mašinsku obradu

Mikrostruktura visokolegiranih belih livenih gvožđa sa Cr

- Osnova podela ovih legura je na:
  - podeutektičke
  - eutektičke i
  - nadeutektičke



Mikrostruktura legura sa ~15% Cr i sa ~26% Cr:
(a, b) podeutektička,
(c, d) eutektička,
(e, f) nadeutektička

- Pre čelika *malo ponavljanje... da ubrzamo*

Polimorfija Fe

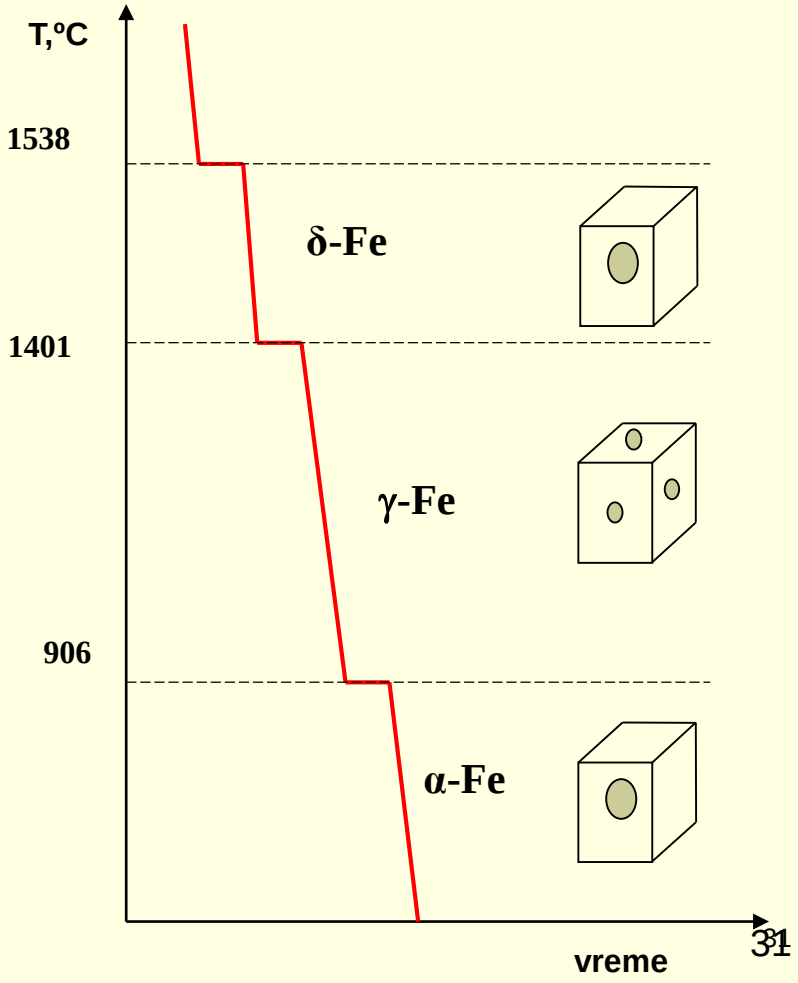
Železo (Fe) se, u f-ji od temperature, u čvrstom stanju javlja u 2 modifikacije:

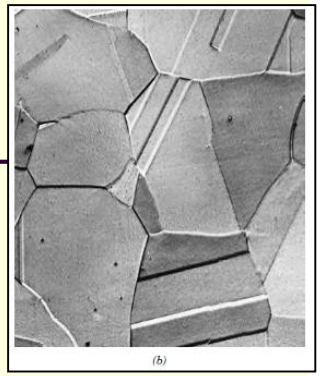
- **α (**i **δ)** železo, sa zapreminski centriranom kubnom rešetkom (KZC)
- **γ** železo, sa površinski centriranom kubnom rešetkom (KPC).

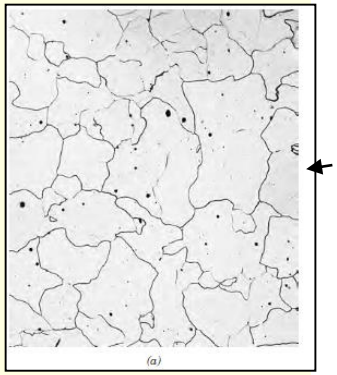
➢ **α železo (α-Fe)**:
- KZC;
- T=20-906 ^{o}C;
- fizičke osobine (magnetičnost):
  T=20-**769** ^{o}C → feromagnetično α-Fe,
  T=**769**-906 ^{o}C → paramagnetično β-Fe.
  (α-Fe, β-Fe = ZCKR)

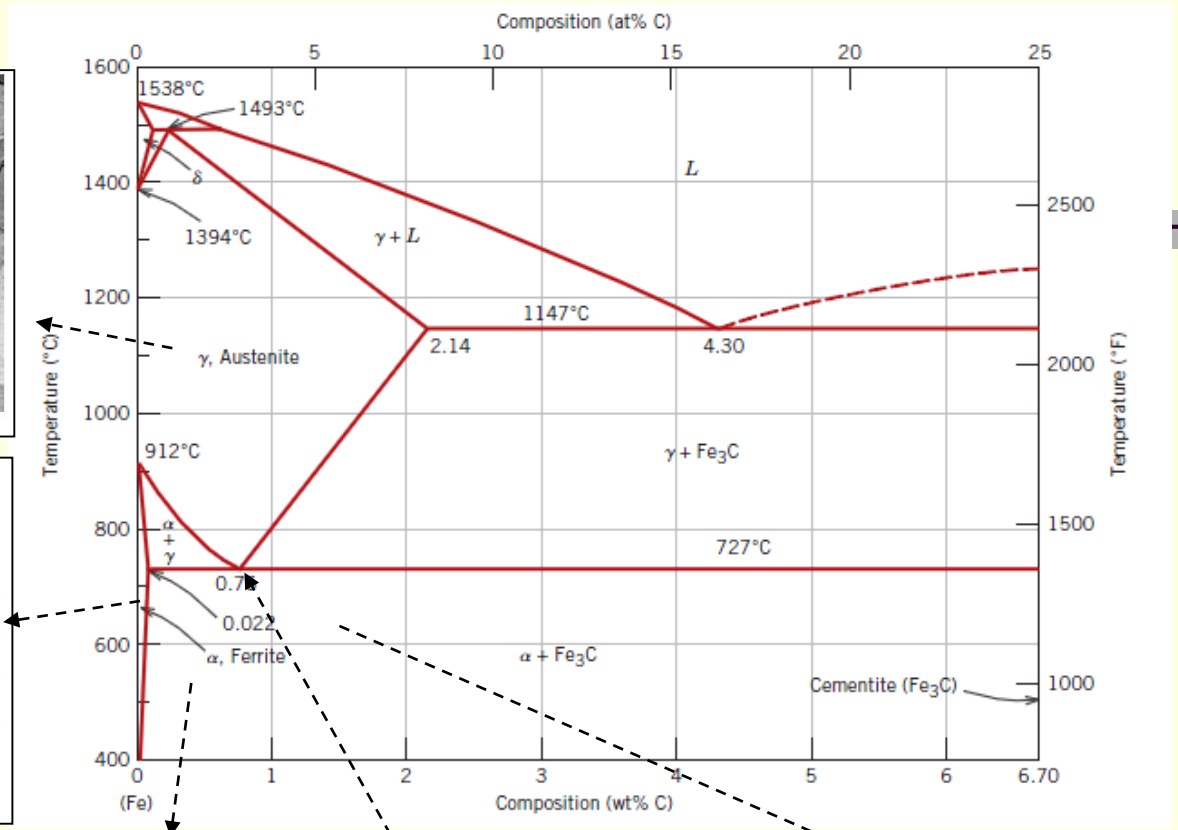
➢ **γ železo (γ-Fe)**:
- KPC;
- T=906-1401 °C.

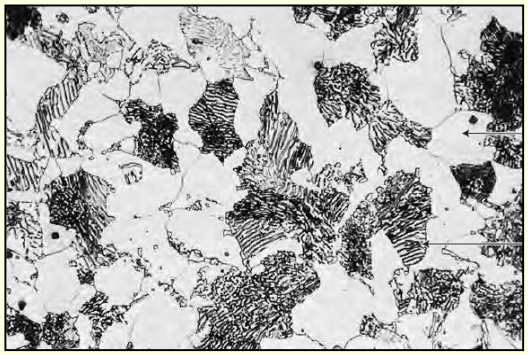
➢ **δ železo (δ-Fe)**:
- KZC;
- T=1401-1538 ^{o}C (T_{top}).
- značajno za visoko legirane čelike;
  - stabilnost na visokim T.

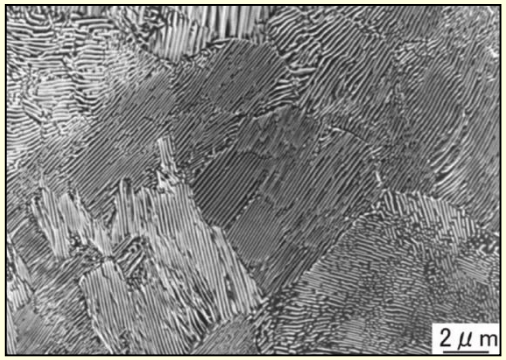


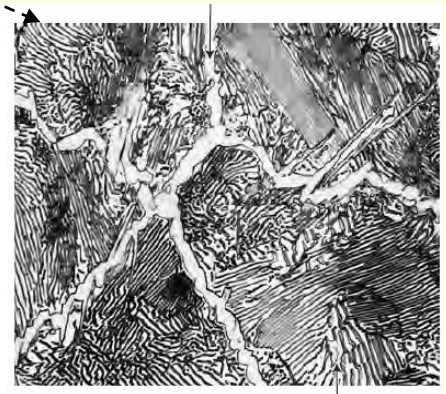




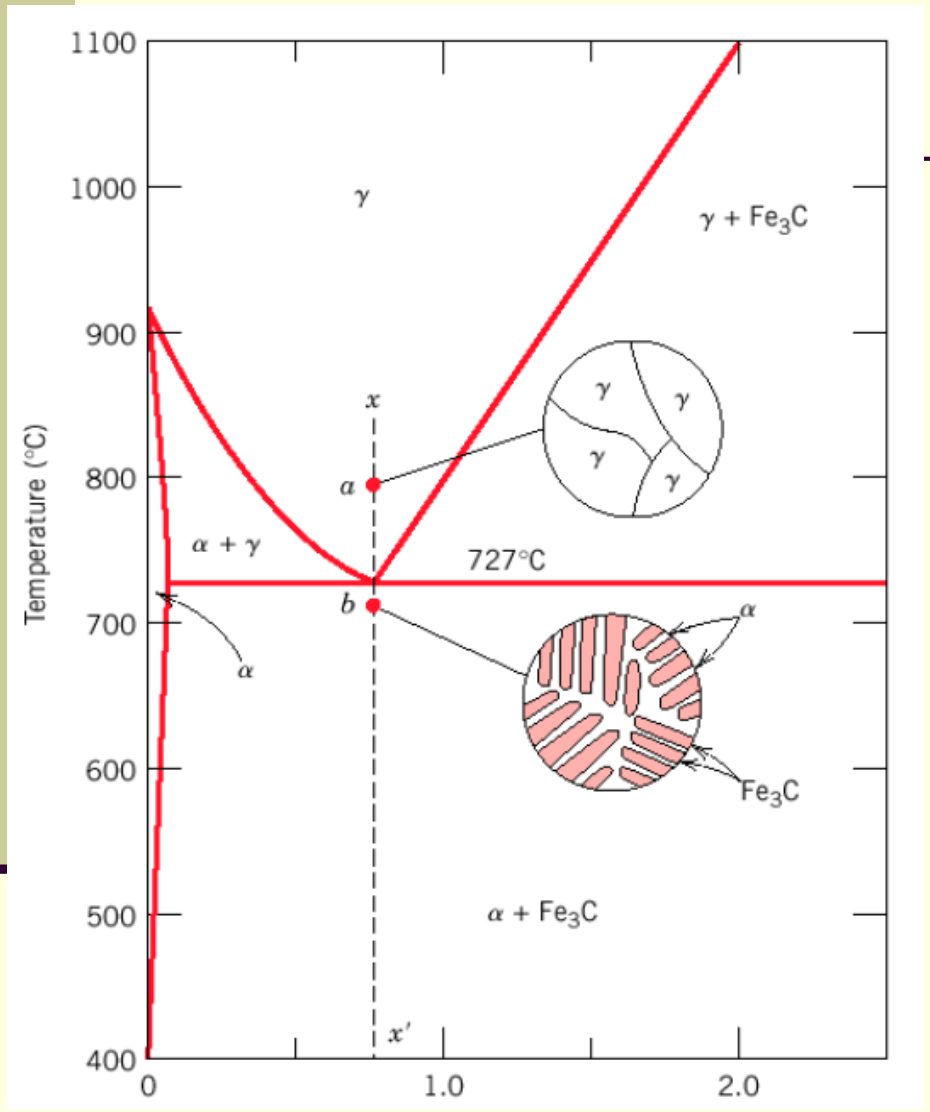

Composition (at% C)
0
5
10
15
20
25
1600
1400
1200
1000
800
600
400
1538°C
1493°C
δ
1394°C
L
γ + L
1147°C
2.14
4.30
γ, Austenite
912°C
γ + Fe3C
α + γ
727°C
0.76
0.022
α, Ferrite
α + Fe3C
Cementite (Fe3C)
2500
2000
1500
1000
Temperature (°C)
Temperature (°F)
0
(Fe)
1
2
3
4
5
6
6.70
Composition (wt% C)




2 μm

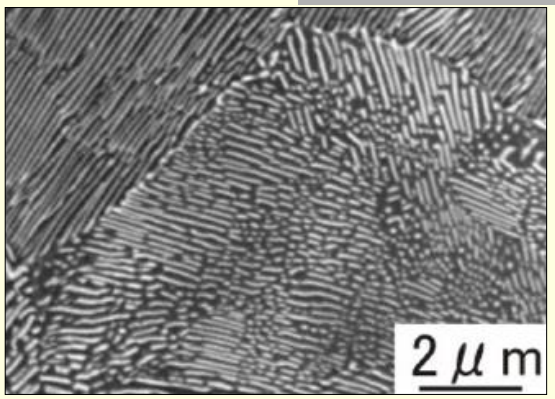


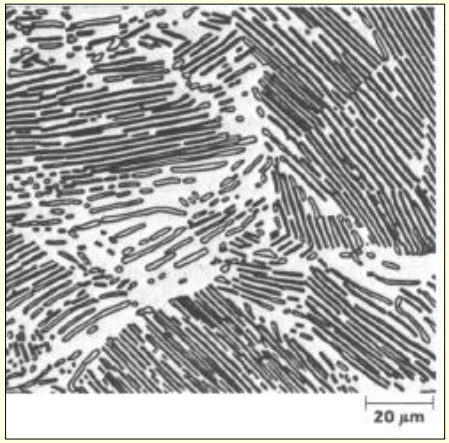
EUTEKTOIDNI ČELICI



PERLIT

$$\gamma \xrightarrow{727\ ^\circ C;\ 0{,}8\ \%C} P(\alpha_{0{,}025\ \%C} + Fe_3C_{6{,}67\ \%C})$$

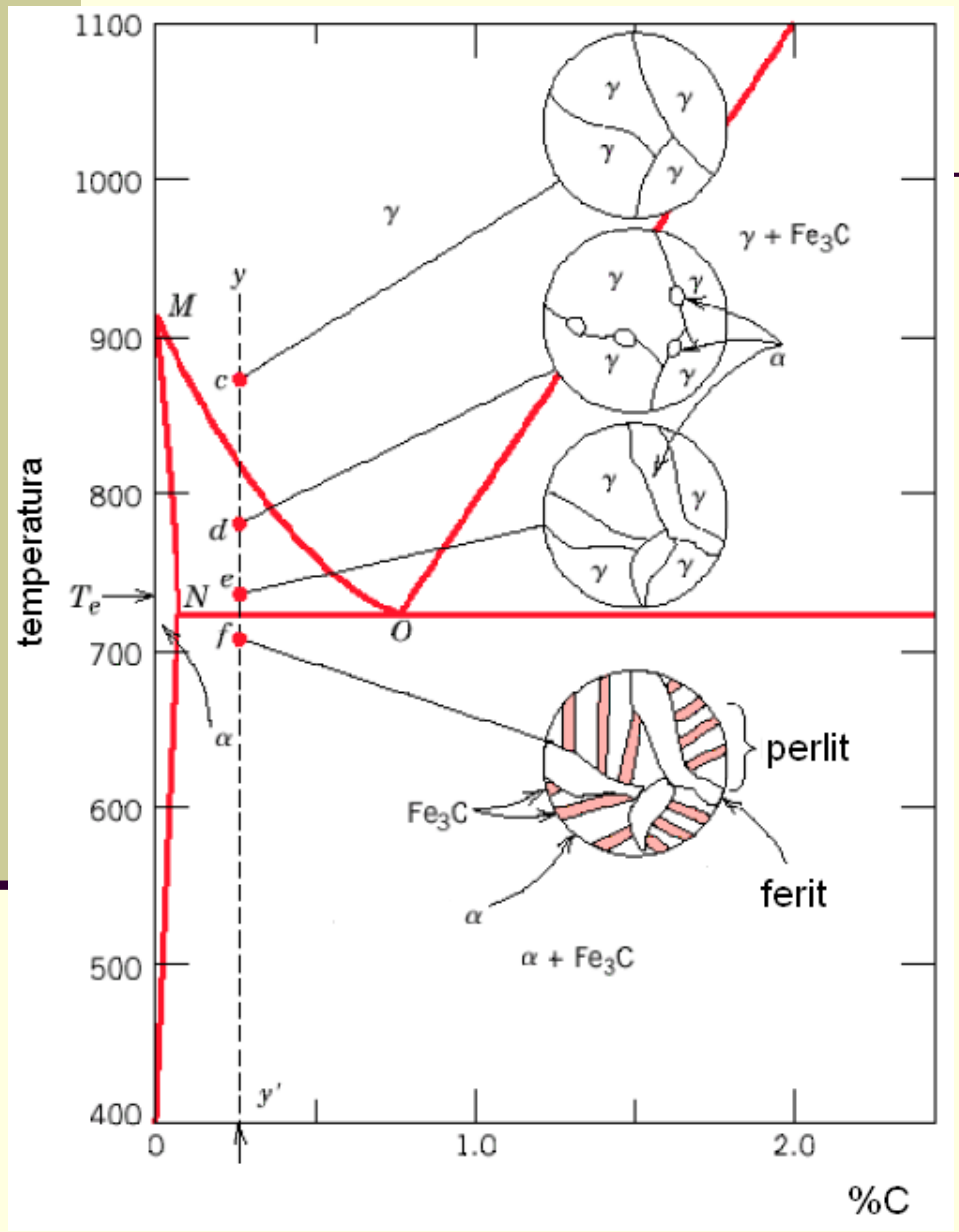


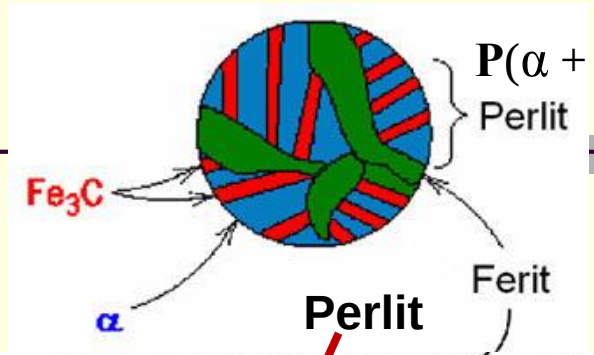


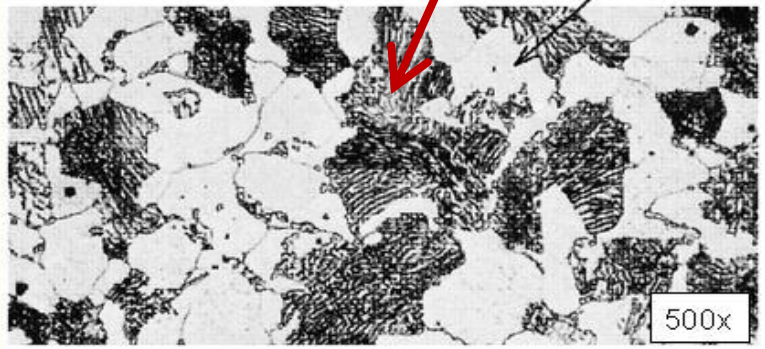
Mikrostruktura perlita

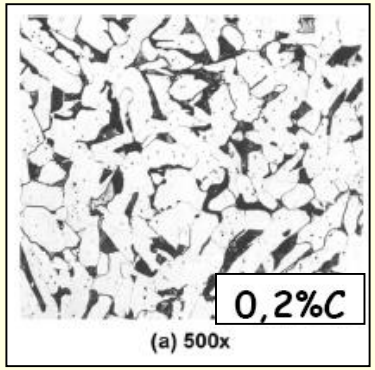
PODEUTEKTOIDNI ČELICI

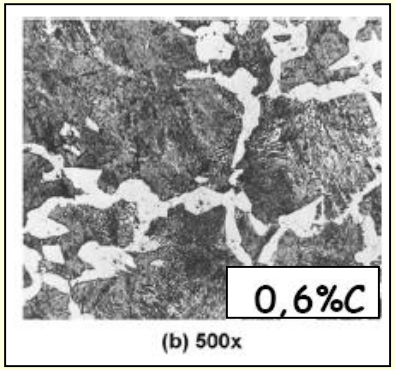
$$\gamma \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$$





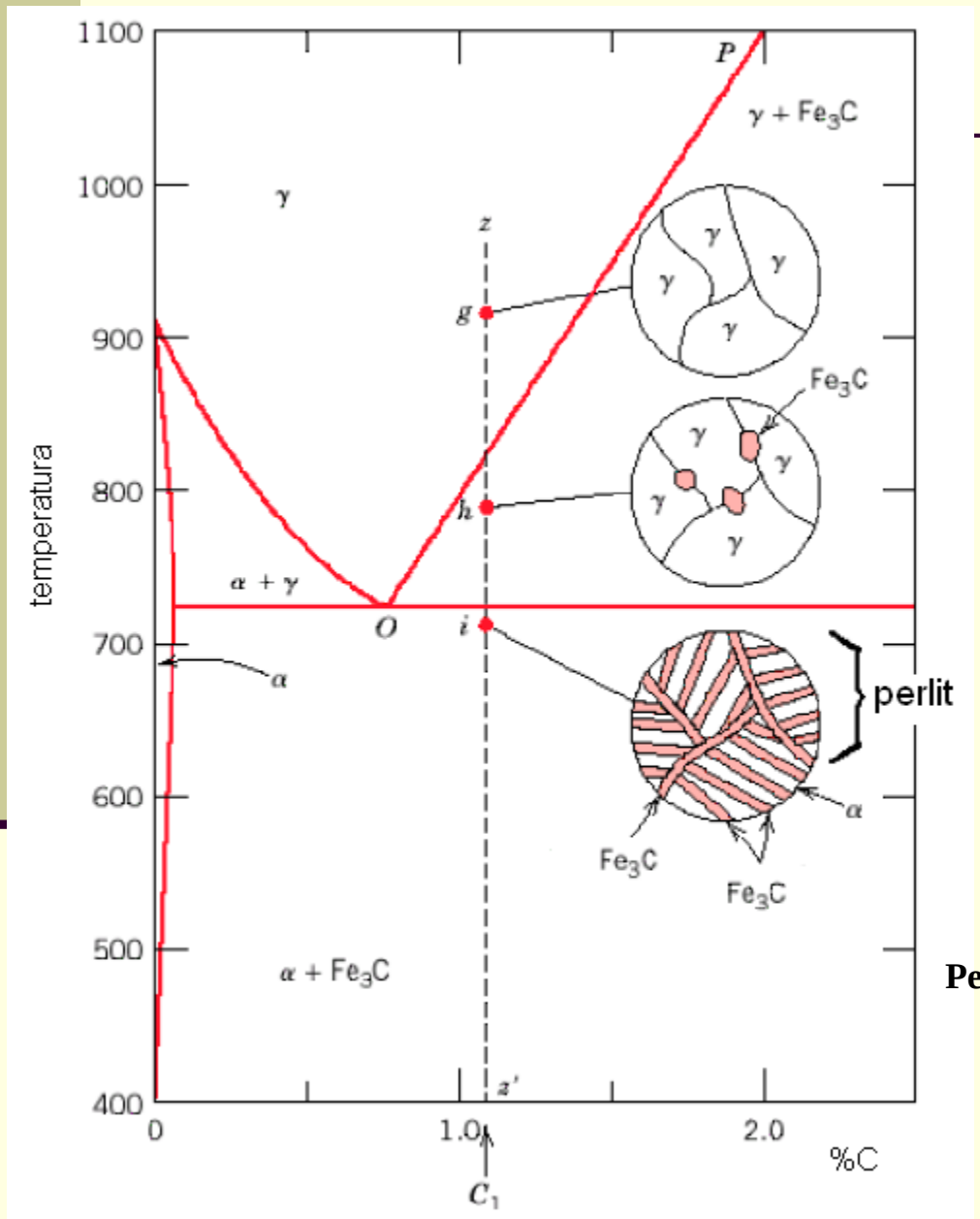




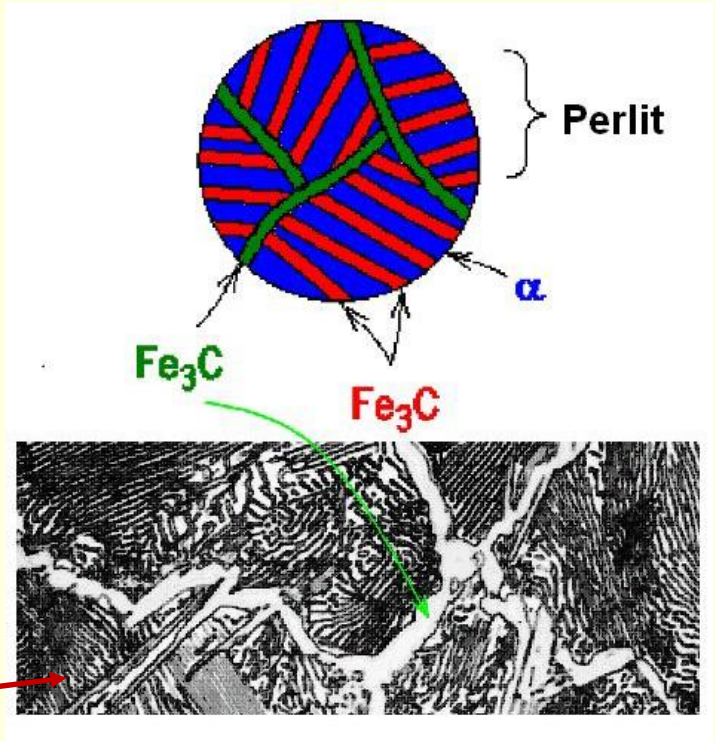


Mikrostrukture podeutektoidnih čelika

NADEUTEKTOIDNI ČELICI

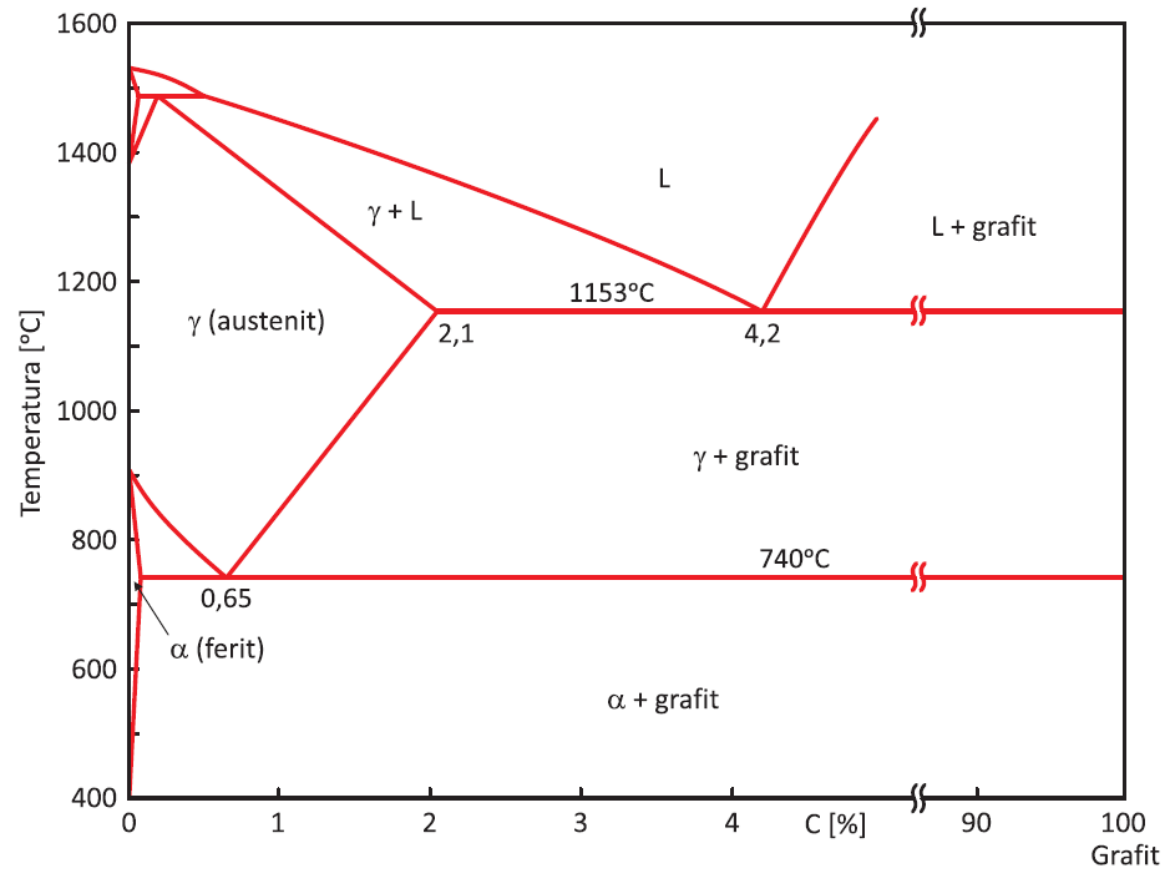


$$\gamma \rightarrow \gamma + Fe_3C \rightarrow \alpha + Fe_3C$$



Mikrostruktura nadeutektoidnog čelika

Stabilni dijagram stanja (Fe-C)



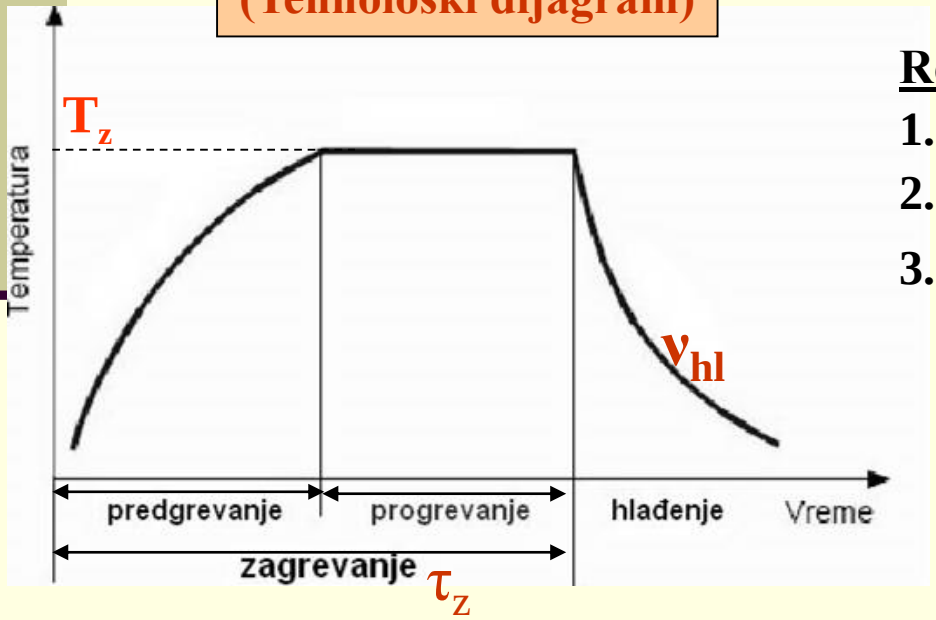
Dijagram stanja Fe – C

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

1. **Zagrevanja** legure do odredjene 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)

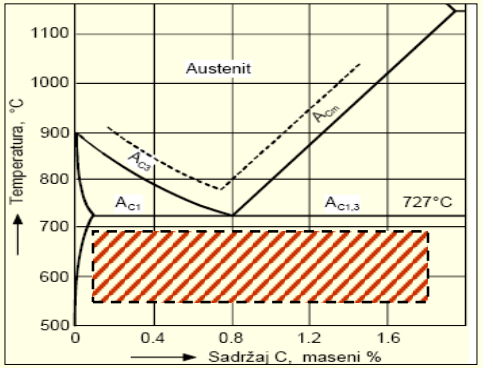


Režimi TO su definisani sa **3 parametra:**

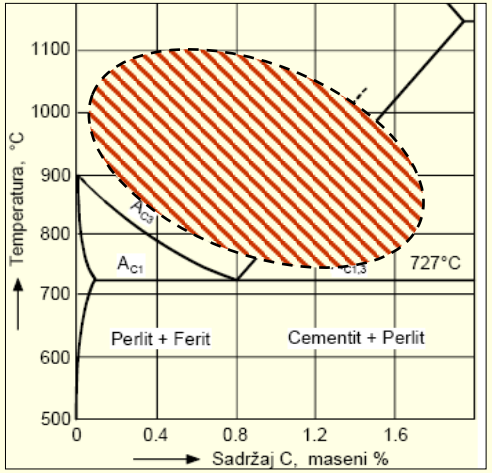
1. **Temperatura** zagrevanja (T_z)
2. **Vreme** zagrevanja (τ_z)
3. **Vreme** hlađ.(τ_{hl}) ili **brzina** hladjenja **(v_{hl}).**

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
   - Difuziono žarenje (homogenizacija).



3. **Kaljenje**
   - površinsko
   - zapreminsko.

4. **Otpuštanje** (nisko, srednje i visoko).

1. Žarenje BEZ fazne transformacije

1.1) REKRISTALIZACIONO ŽARENJE (prethodno plastično deformisano na hladno)

Parametri režima rekristalizacije:

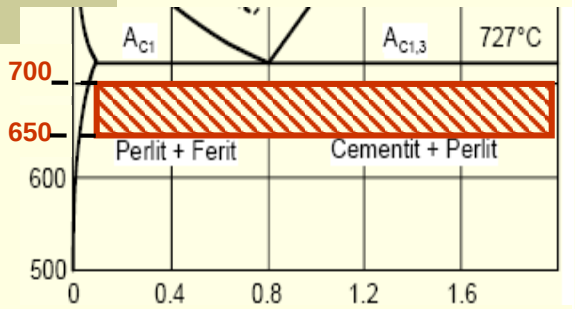
1. **Zagrevanje** legure do **$T>T_{rekris.}$(650-700°C)**;
2. **Držanje** na toj temperaturi (**kratkotrajno** kod tankih preseka; a **veoma dugo** kod debel preseka→ujednačeno progrevanje i rekristalizacija po celom preseku);
3. **Hladjenj**e proizvoljnom brzinom (najčešće na **vazduhu**).

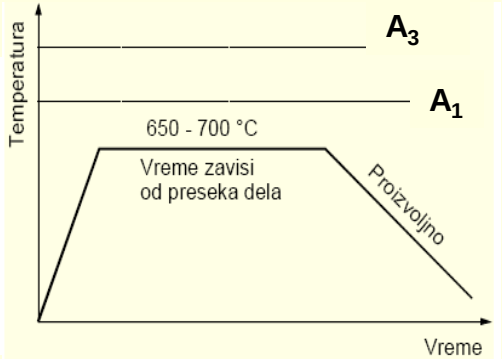
$T_{rekris.}$. metala i legura zavisi od temperature topljenja (Tt).

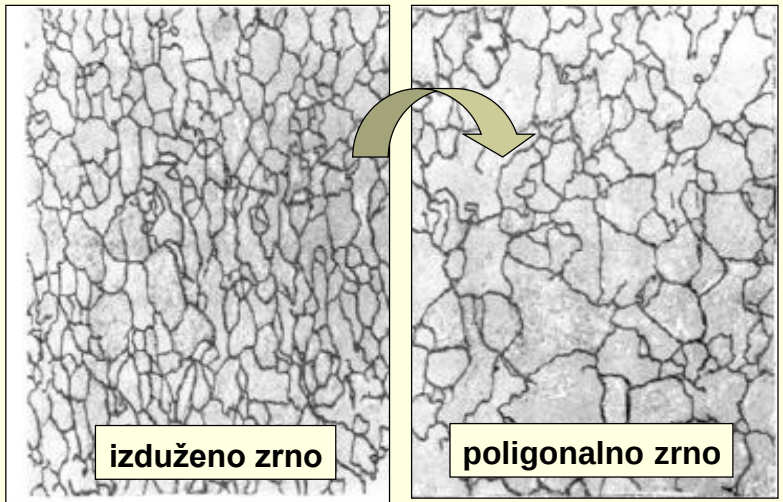
Niskougljenični čelici imaju *Tr*≈ 650^{0}C, što predstavlja **granicu prerade na toplo i hladno**.

Cilj rekristalizacije je:

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







1.2) Žarenje radi uklanjanja zaostalih unutrašnjih (zaostalih) napona

Faze kod legura Fe:

1. Lagano zagrevanje do temperature **ispod** linije $\mathbf{A_1}$ (**550÷650**°C),

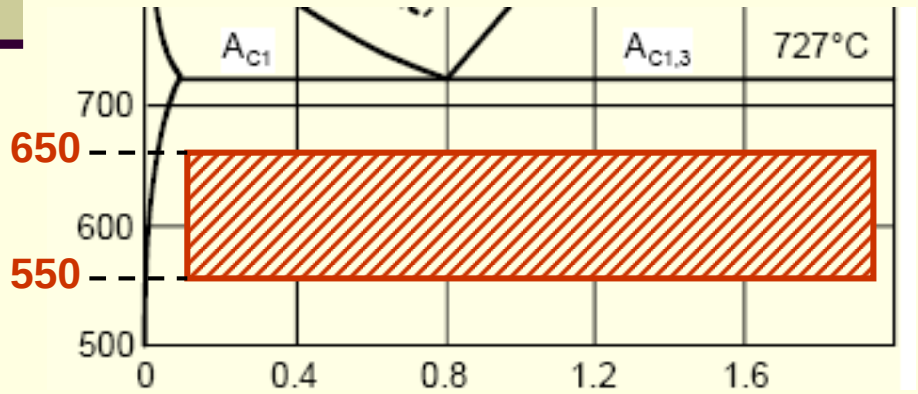
2. Zadržavanje na toj temperaturi, i

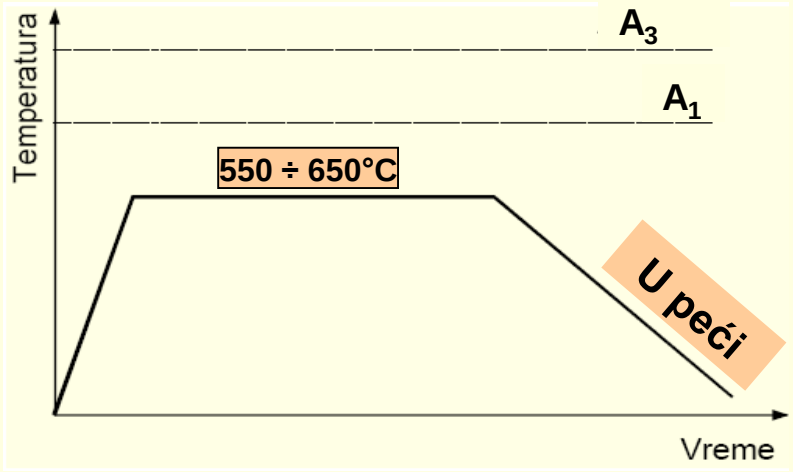
3. Sporo i dugotrajno hladjenje **u peći**.

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.

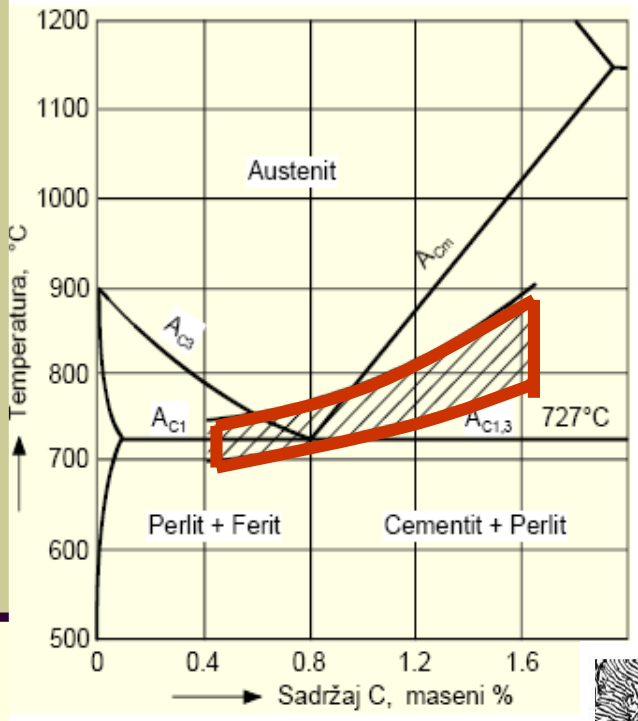
Otpuštanje unutrašnjih napona se odigrava pri temperaturama:

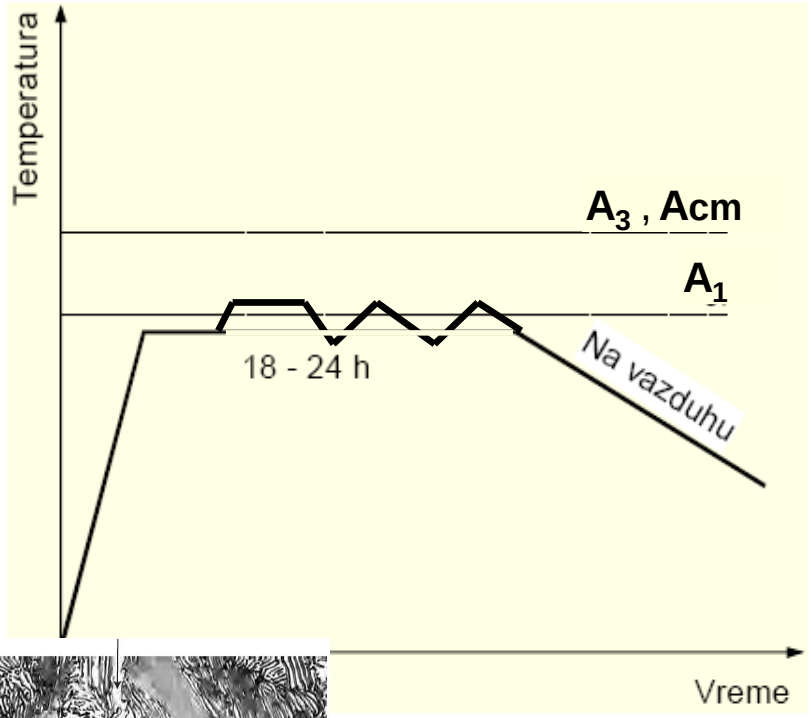
- za čelične **odlivke** i odlivke izrađene od livenog gvoždja → **550÷650**°C;
- za čelične delove obradjene plastičnom deformacijom **na hladno** → T**–** (**250**÷**300**)°C;
- kod mernih i kontrolnih alata, da bi se postigla neophodna dimenziona stabilnost → **150**°C (tzv. stabilizaciono otpuštanje).

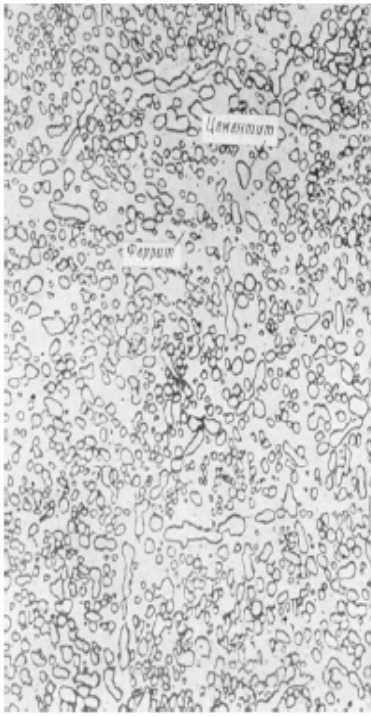




2.1) Sferoidizacija ili MEKO ŽARENJE







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→HB i Rm rastu (“priprema” za kaljenje).

- **Cilj normalizacije je <u>uklanjanje krupnozrne</u>** strukture i dobijanje **<u>sitnozrne</u>** i ravnomerne strukture;

2.2) Normalizaciono žarenje (normalizacija)

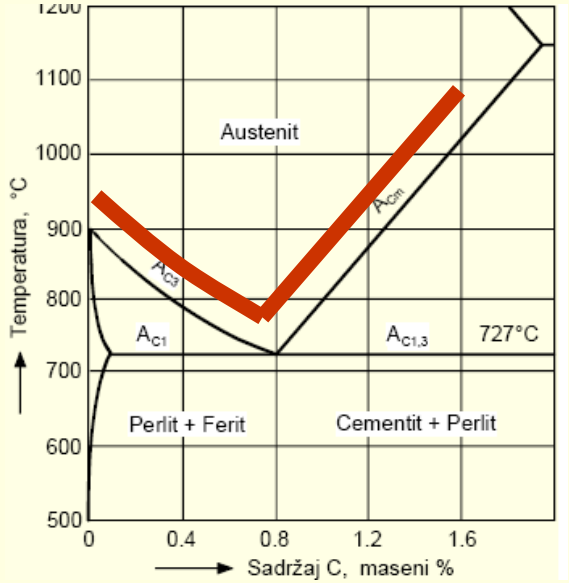
Parametri režima normalizacije:

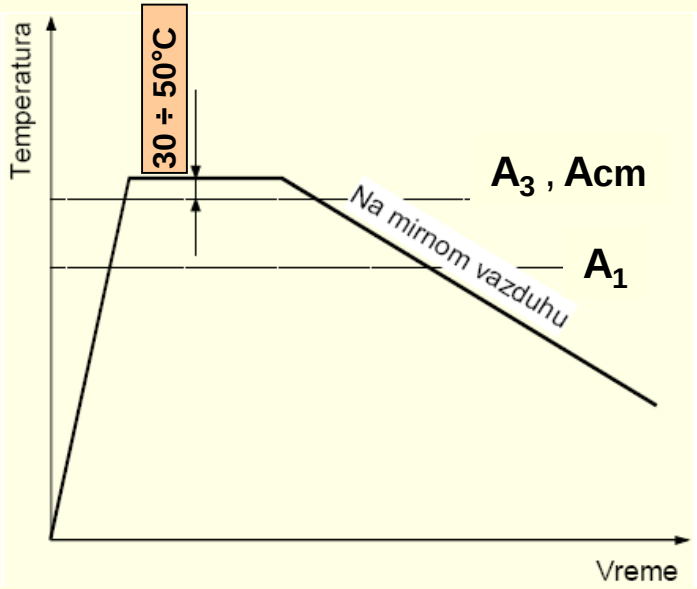
1. Zagrevanje čelika do:

- **iznad A_3** (30÷50°C) za podeutektoidne Č, tj. **iznad A_{cm}** (30÷50°C) za nadeutektoidne Č;

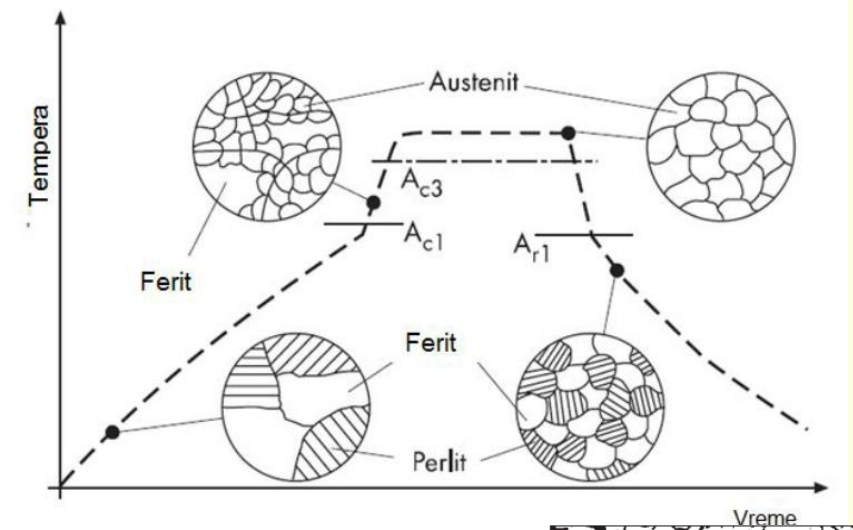
2. Progrevanje (držanje) na toj temperaturi, i

3. Hladjenje na mirnom **vazduhu**.

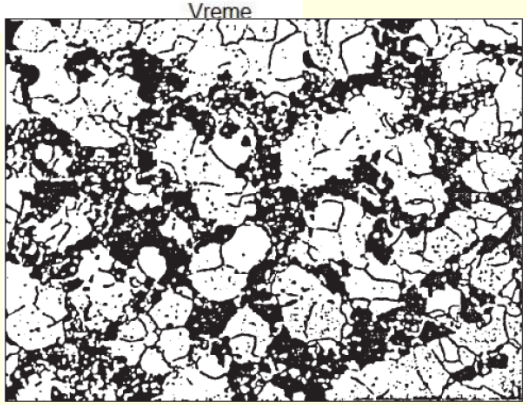




2.2) Normalizaciono žarenje (normalizacija)



posle livenja



posle normalizacije

2.3) Potpuno žarenje

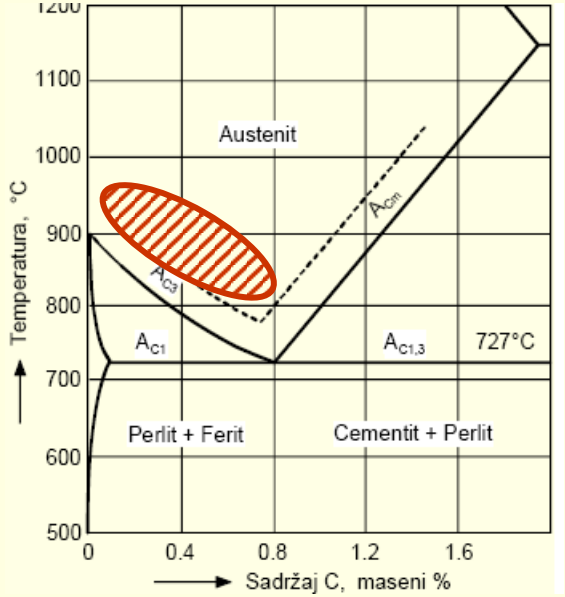
Parametri režima potpunog žarenja:

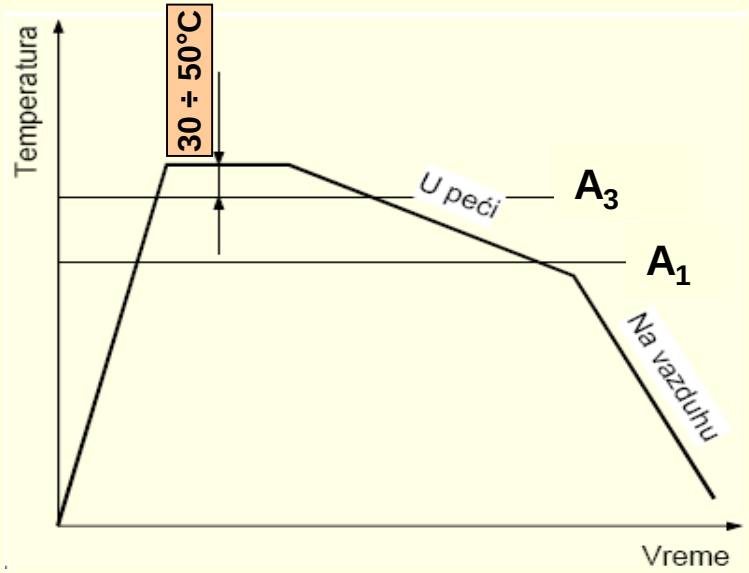
1. Zagrevanje čelika do austenitnog područja (30÷50°C **iznad** linije $\mathbf{A_3}$),
2. Držanje na toj temperaturi, i
3. Veoma sporo hladjenje (**1. u peći** do 500÷600 °C, a zatim najčešće na **vazduhu**).

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

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)

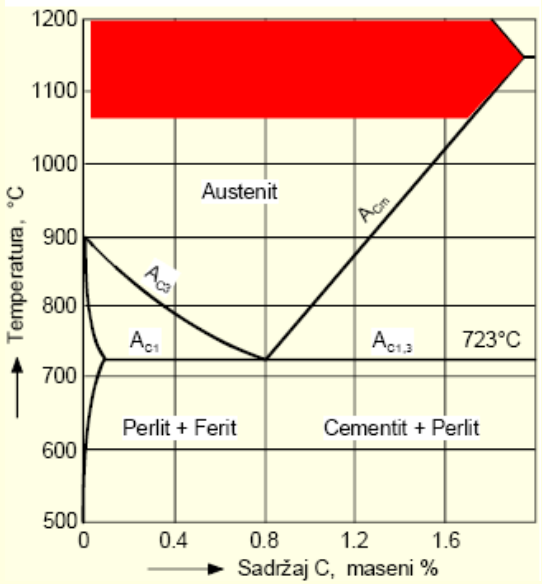
Cilj homogenizacije je:

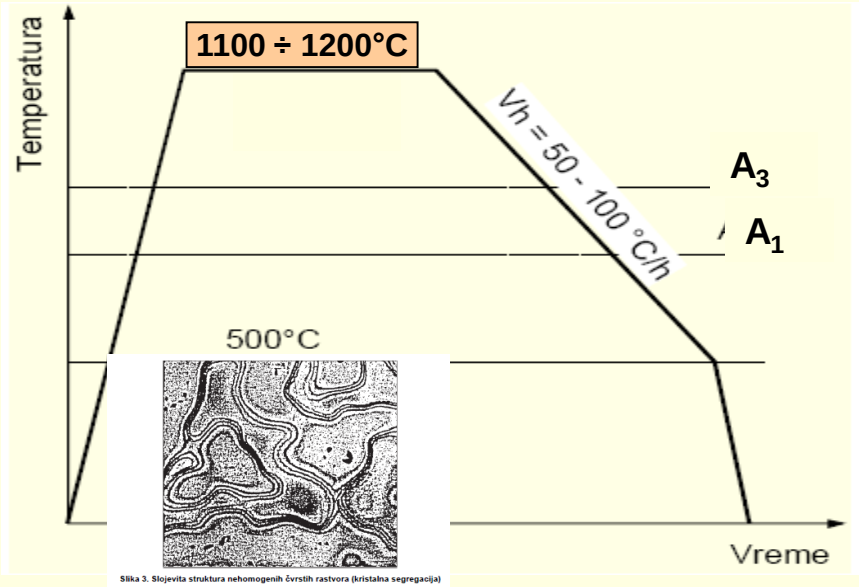
- izjednačavanje hemijskog sastava u zrnu;
- poboljšanje mikrostukture koja umesto dendritne postaje homogena;
- poboljšanje sposobnosti za obradu plastičnim deformisanjem na toplo.

Parametri režima homogenizacije:

1. **Zagrevanje** Č (visoko u γ-području: **1100÷1200**°C, malo ispod solidus linije-$\mathbf{A_4}$)
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. Slojevita struktura nehomogenih čvrstih rastvora (kristalna segregacija)

3. KALJENJE ČELIKA

Parametri režima kaljenja :

1. Zagrevanje čelika:

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

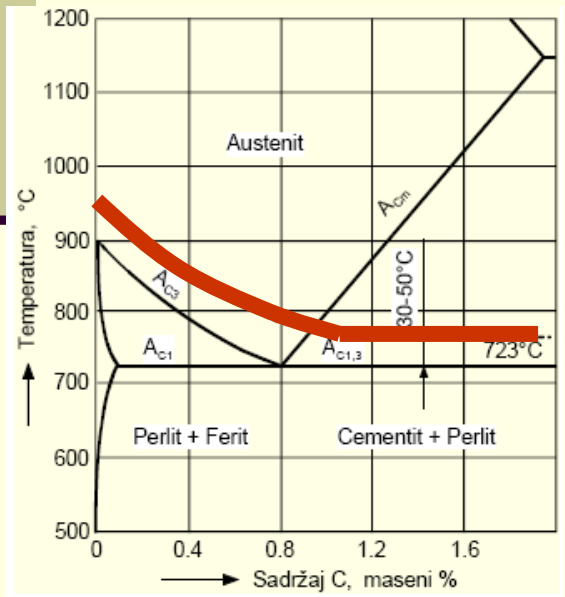
2. Progrevanje na toj temperaturi, i

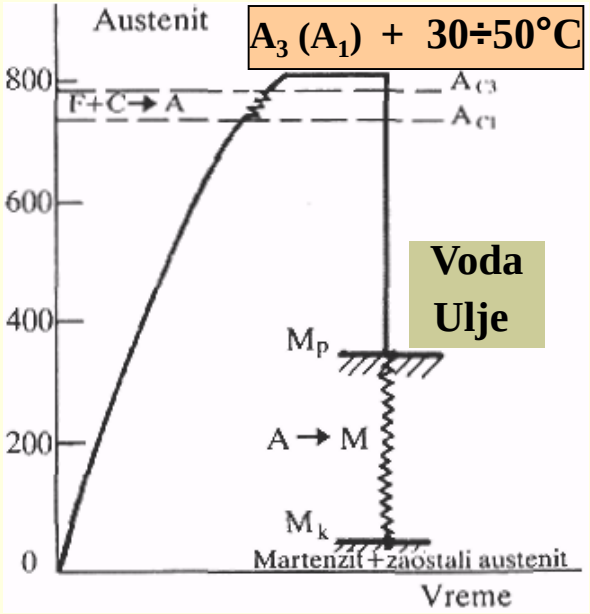
3. Hladjenje brzinom **<u>većom</u>** od kritične brzine hladjenja (**V_k**)

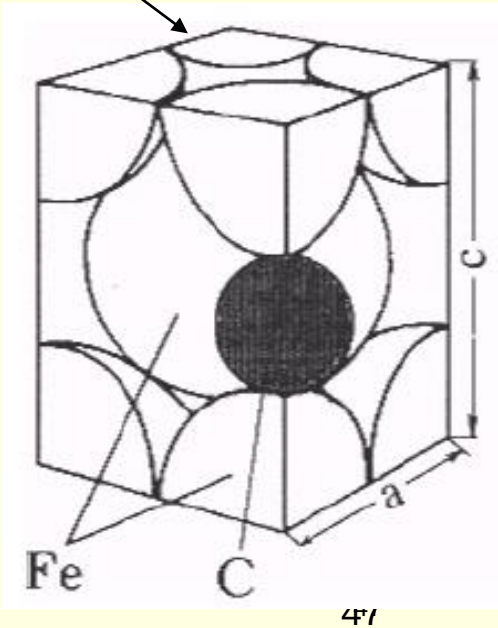
(konstrukc.Č→u H_2O; alatni Č→u ulju/rastv.soli; legirani Č→na vazduhu).

- **Martenzit = Prezasićeni** čvrsti rastvor C u α-Fe, i ima **<u>tetragonalnu</u>** ZCKR**.**
- **Kritična brzina hlađenja (V_k)** je **<u>najmanja</u>** **v_{hl}** pri kojoj se dobija 100% martenz.struktura.

Cilj kaljenja je dobijanje **<u>martenzitne</u>** strukture, visoke HB i otpornosti na habanje.





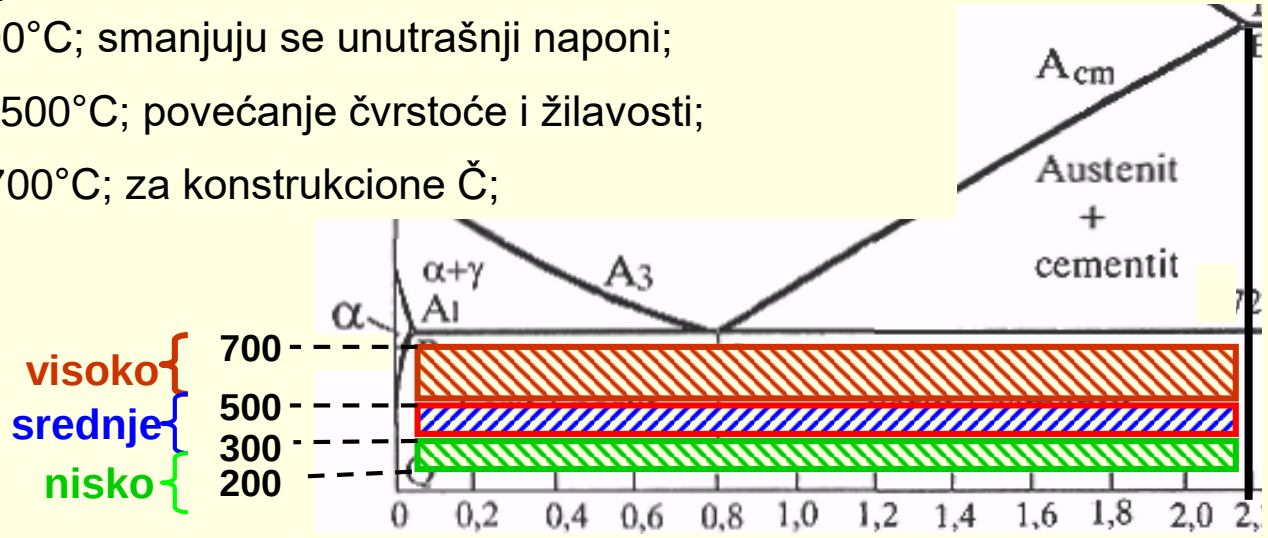


4. OTPUŠTANJE

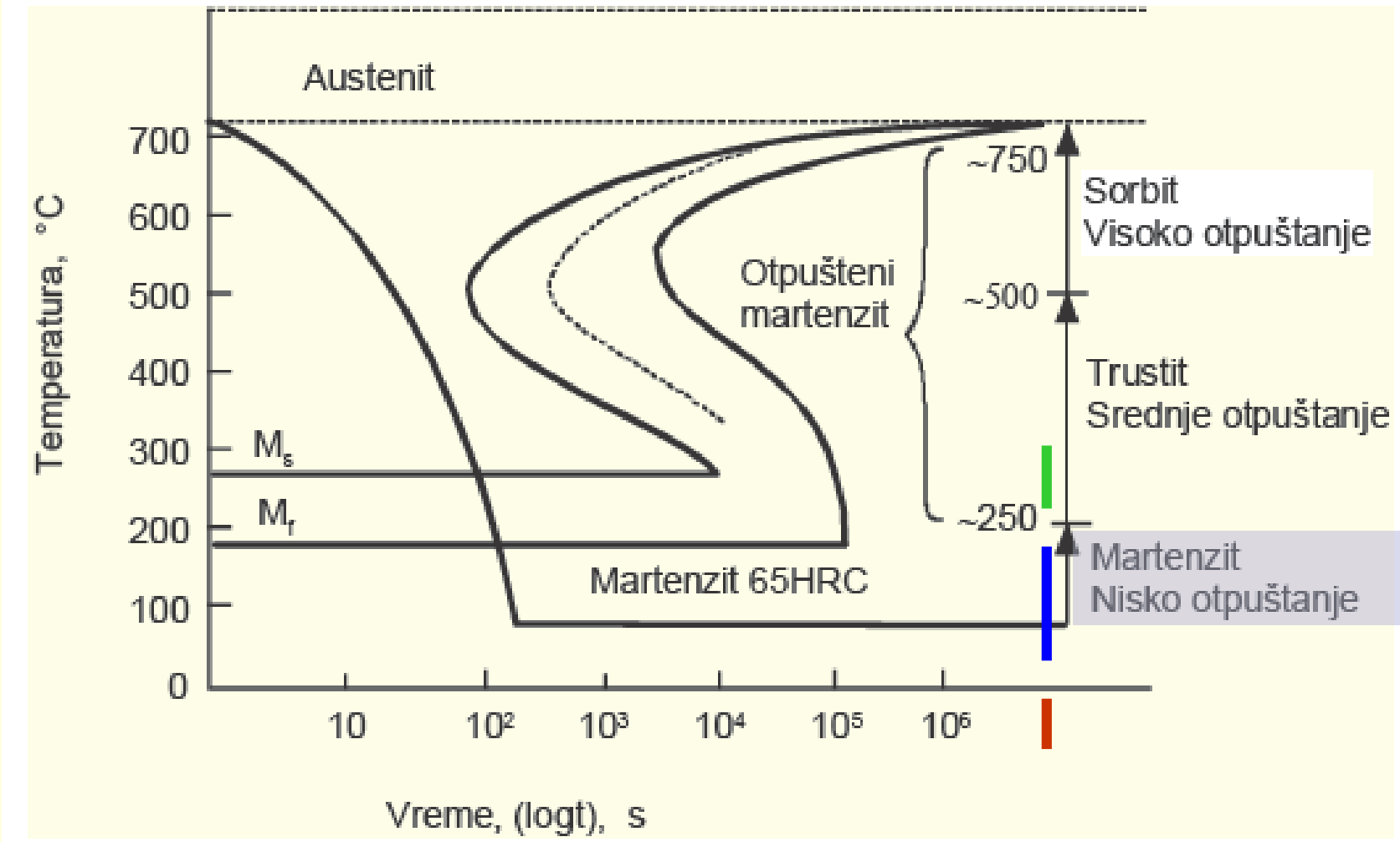
Martenzit je suviše krt da bi se čelični delovi sa takvom strukturom mogli uspešno primeniti u mašinstvu. Osim toga, martenzit odlikuje prisustvo znatnih unutrašnjih napona.
Zato se **uvek posle kaljenja,** zarad smanjenja HB i Rm, porast KU i uklanjanja unutrašnjih napona, izvodi naknadno zagrevanje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

Parametri režima OTPUŠTANJA su:
1. **Naknadno zagrevanje** do **ispod** kritične temperature $\mathbf{A_1}$,
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 konstrukcione Č;



4. OTPUŠTANJE



POBOLJŠANJE = KALJENJE + VISOKO OTPUŠTANJE

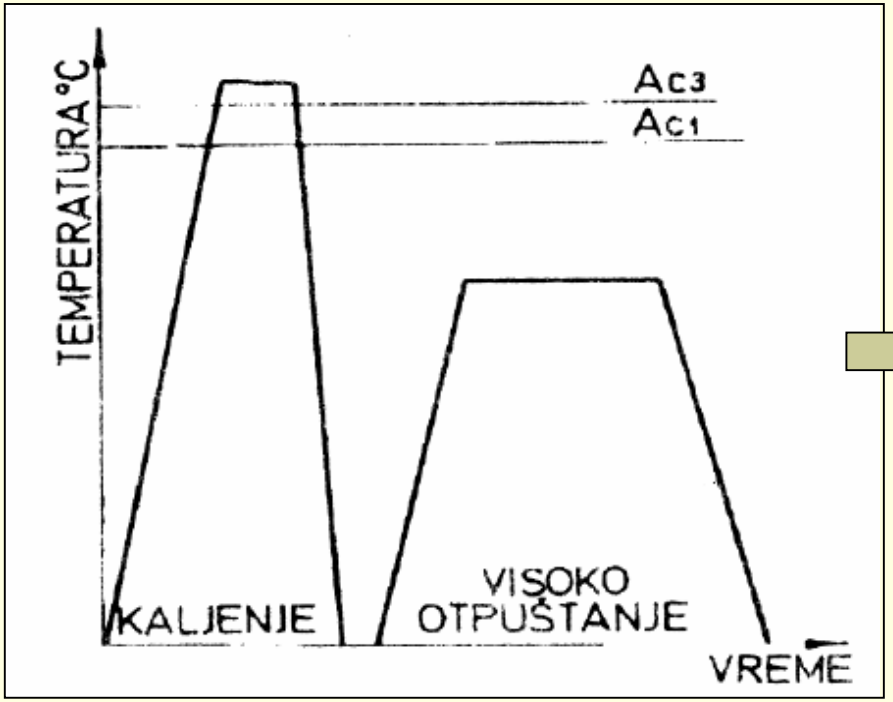
Kombinovani postupak **K**aljenja + **V**isokog **O**tpuštanje naziva se = **POBOLJŠANJE**.

Kaljenje praćeno visokim otpuštanjem, istovremeno dovodi do poboljšanja skoro svih meh.karakteristika (Re, KU, A%, Z%).

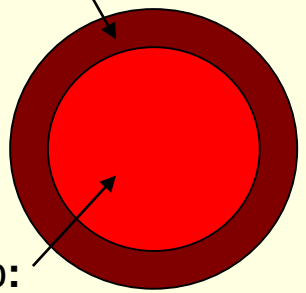
Cilj poboljšanja je da se:

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

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



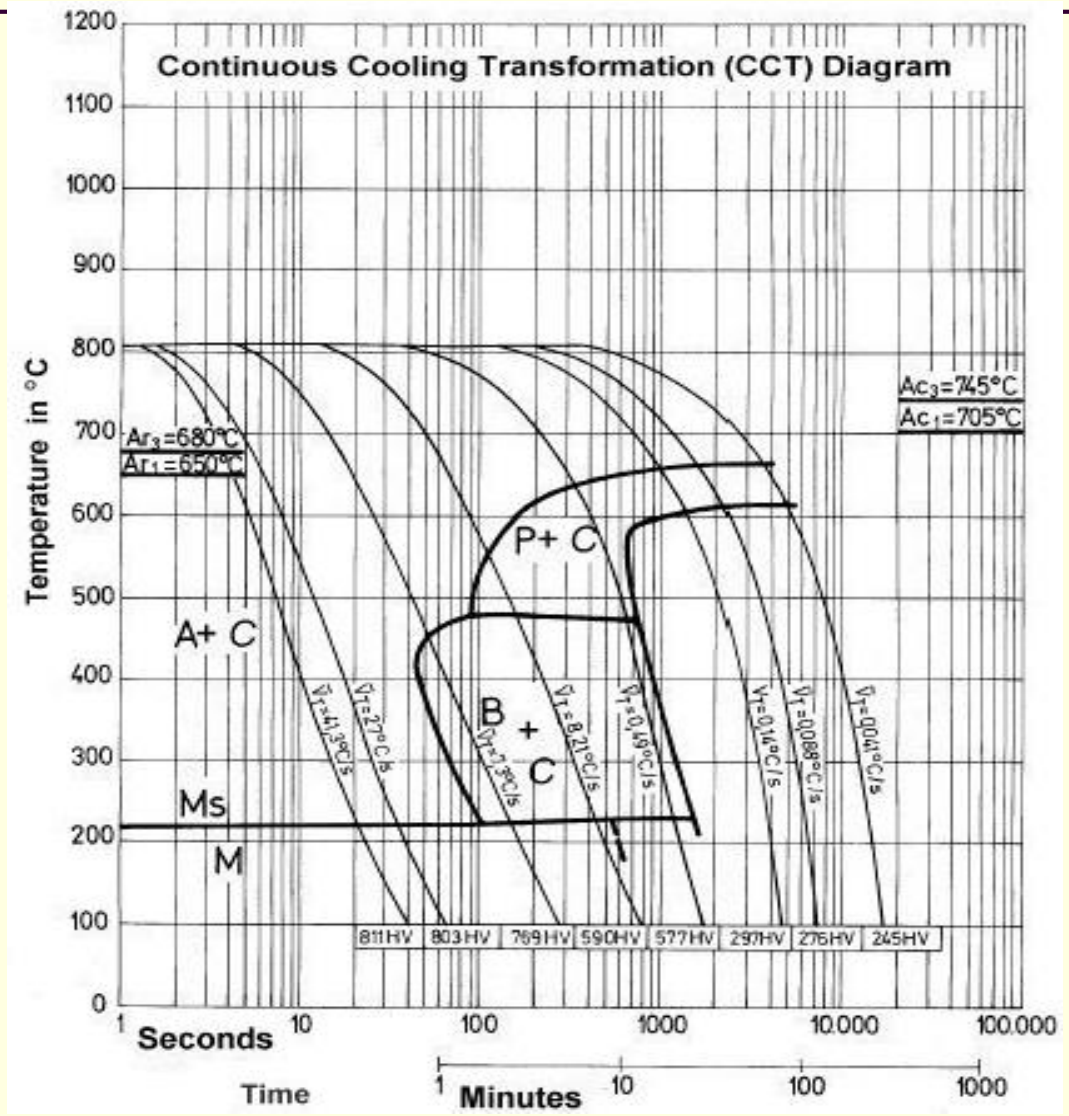
Površinski sloj**: visoka tvrdoća**



Jezgro**:**
velika žilavost

CCT dijagram (KH)

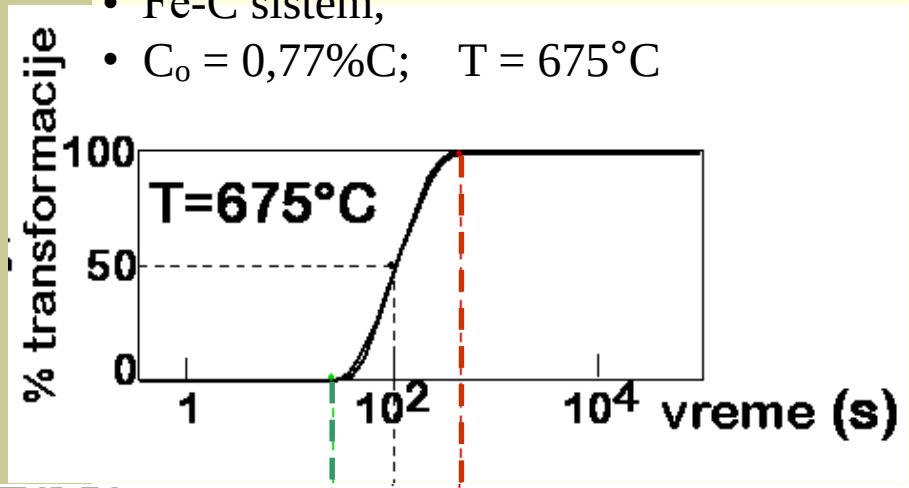
Continuous-Cooling-Transformation ≡ Dijagram **KONTINUALNOG** hlađenja **γ**

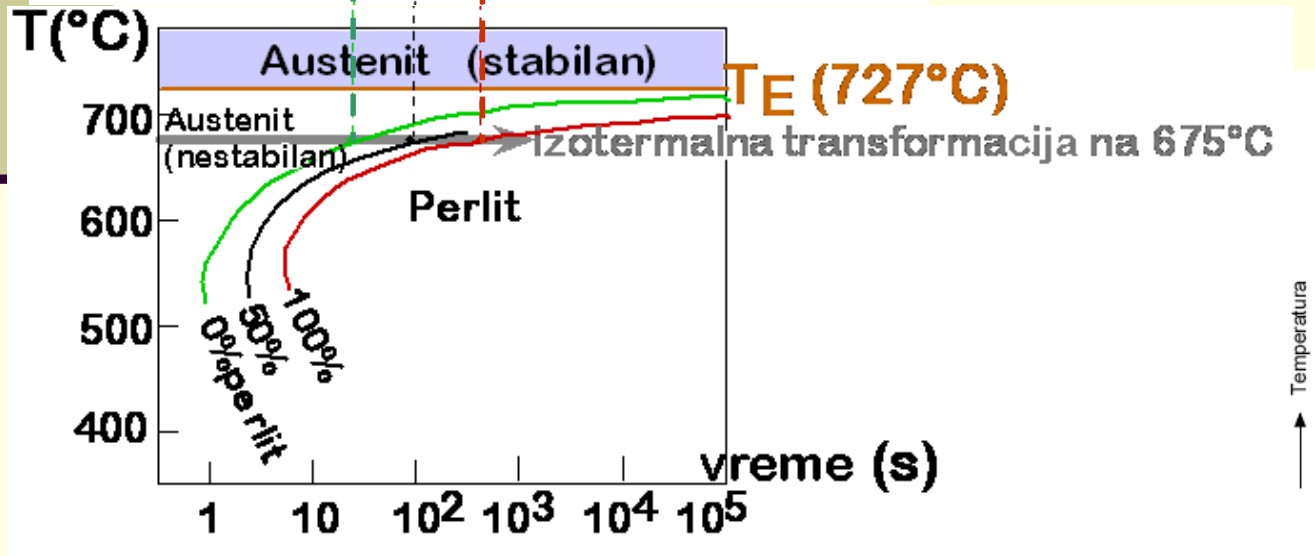


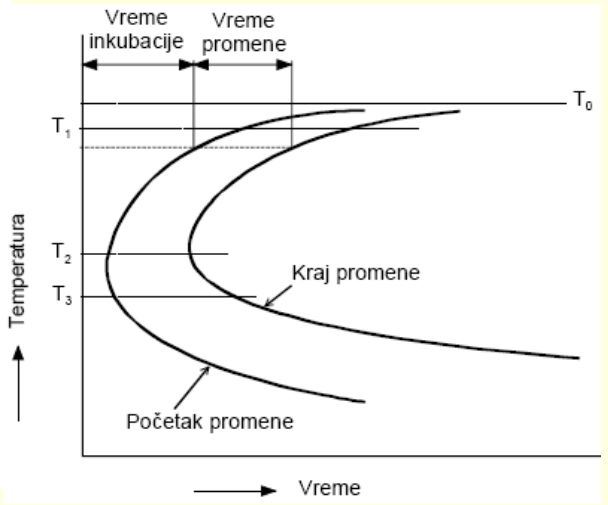
TTT dijagram (IR)

Time-Temperature-Transformation ≡ Dijagram **IZOTERMALNOG** razlaganja **γ**

- Fe-C sistem,
- C_o = 0,77%C; T = 675°C

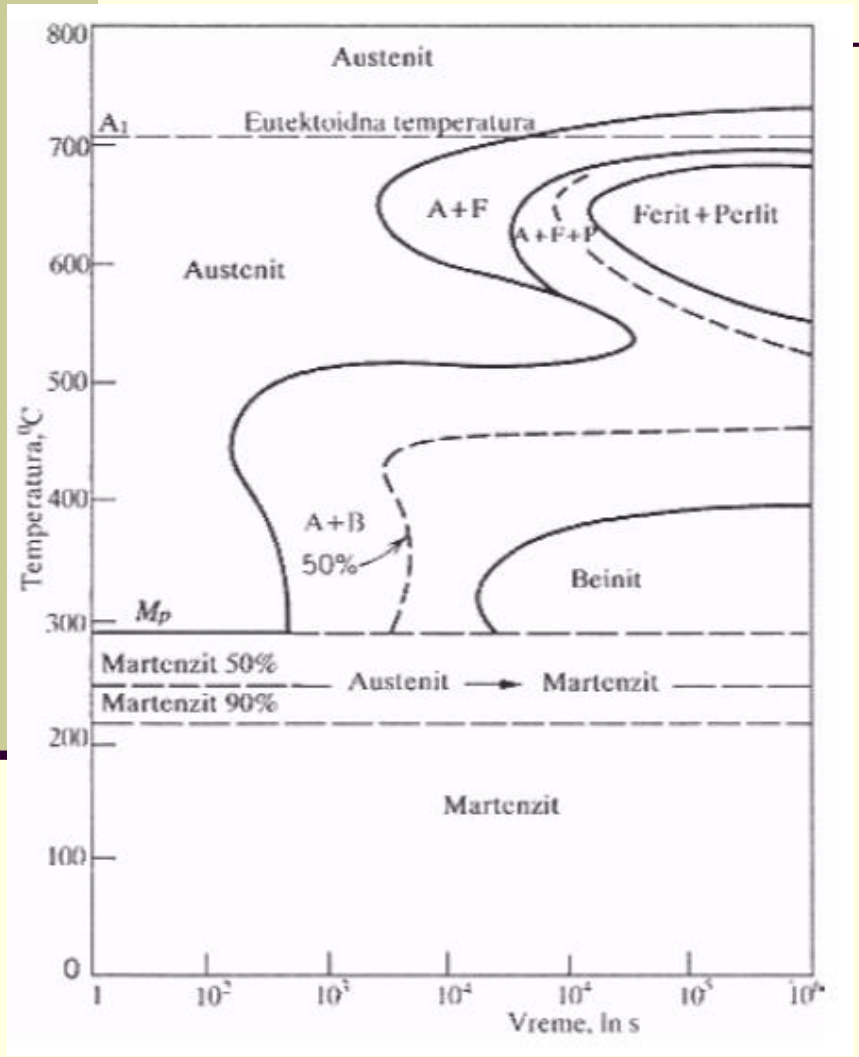




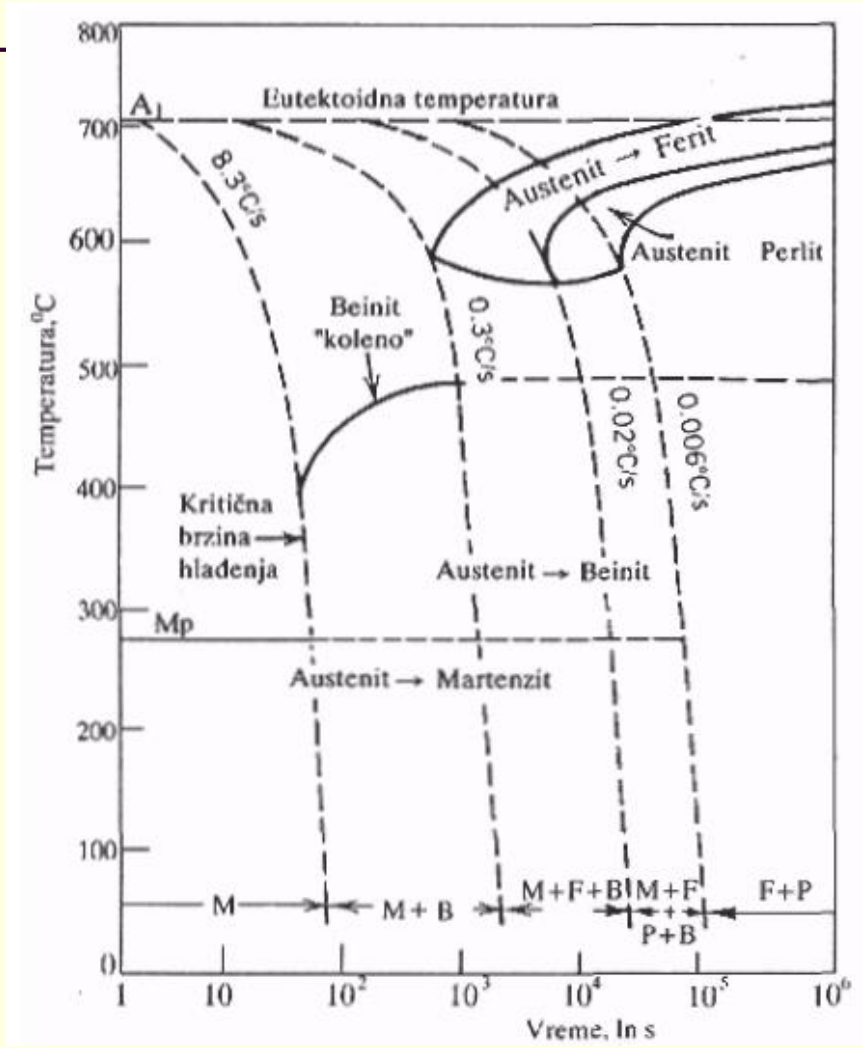


Uporedni prikaz TTT (IR) i CCT (KH) dijagrama za legirani (Cr, Mo) čelik

IR dijagram

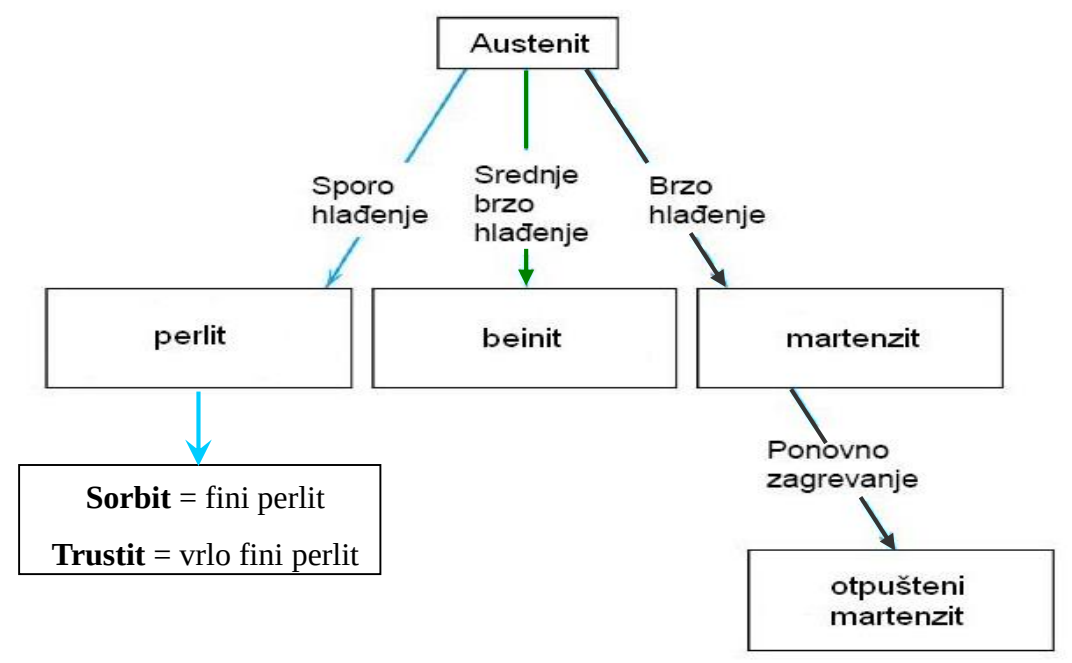


KH dijagram



transformacija austenita u zavisnosti od **brzine hladjenja:**

V_{hl} [°C/sec]	Struktura	Tvrdoća [HB]	Završene faze	
			potpuno	delimično
do 50	**P**erlit	150	**1, 2, 3**	/
50 - 70	**S**orbit	300	**1, 2**	**3**
70 - 100	**T**rustit	400	**1, 2**	/
100 - 150	**B**einit	500	**1**	**2**
150 - 180	**M**artenzit	650	**1**	/

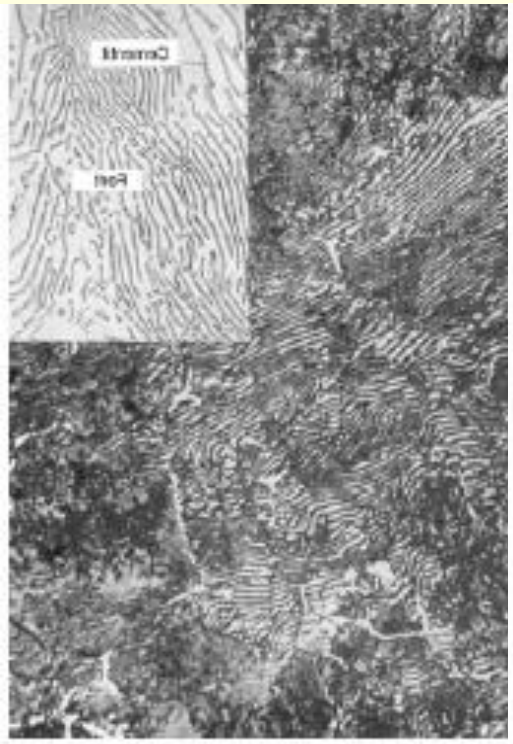


Napomena:

Fazne transformacije γ teku istovremeno:

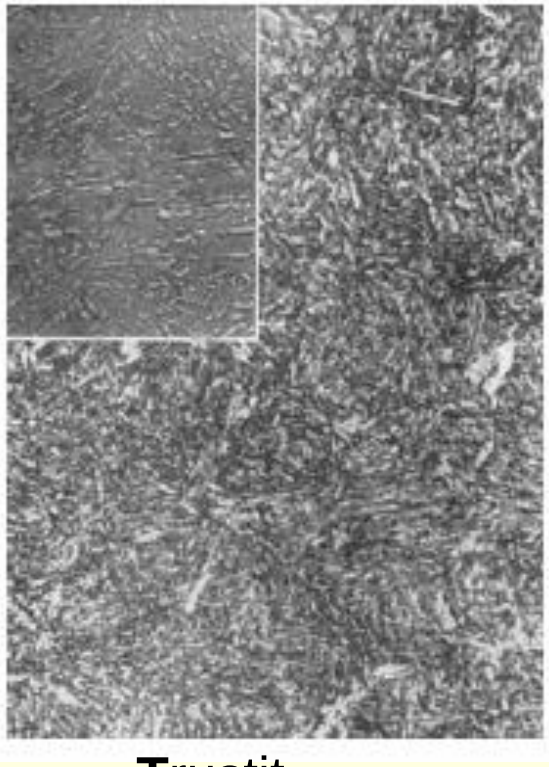
1. promena rešetke Fe.
2. difuzija C.
3. rast cementita.

Perlit, Sorbit, Trustit



Perlit

Sorbit

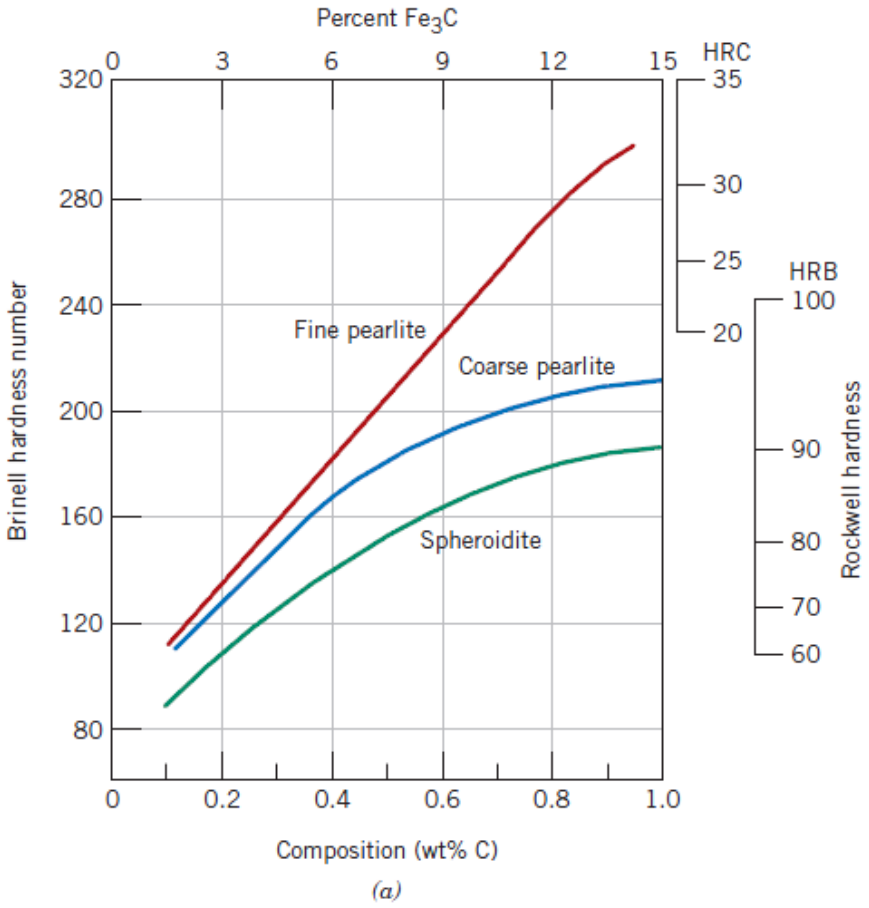


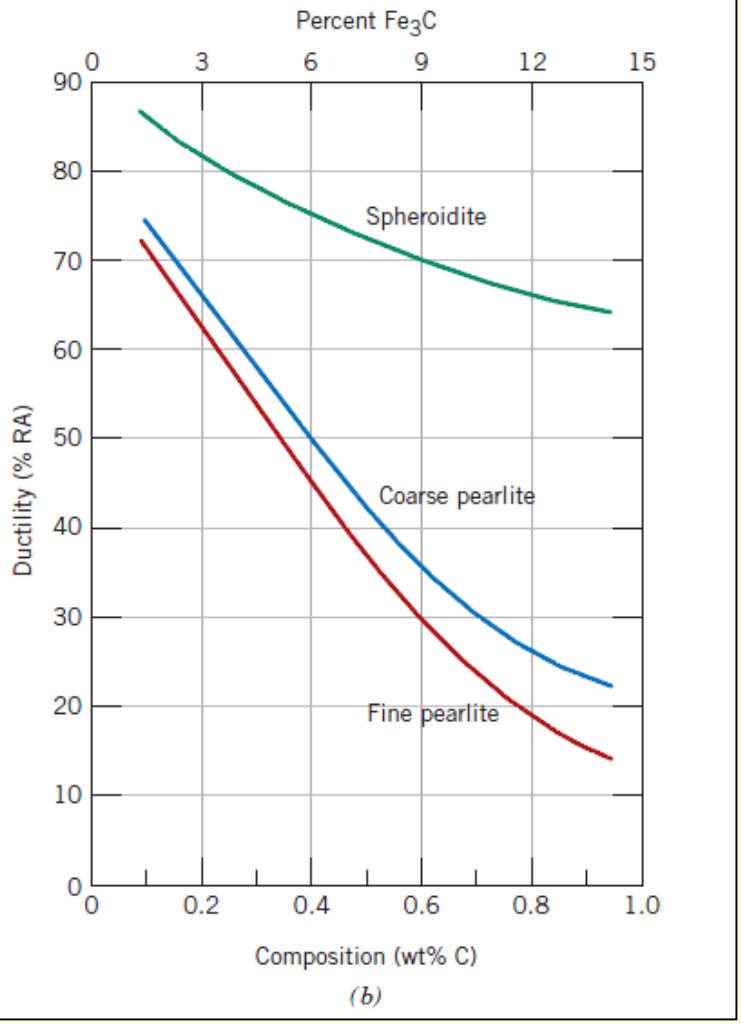
Trustit

Struktura	Rastojanje između lamela [μm]	Tvrdoća [HV]
Perlit	0,6 - 0,7	180 - 240
Sorbit	≈ 0,25	250 - 300
Trustit	≈ 0,1	≈ 400

Mehaničke osobine u funkciji sadržaja C i vrste perlita

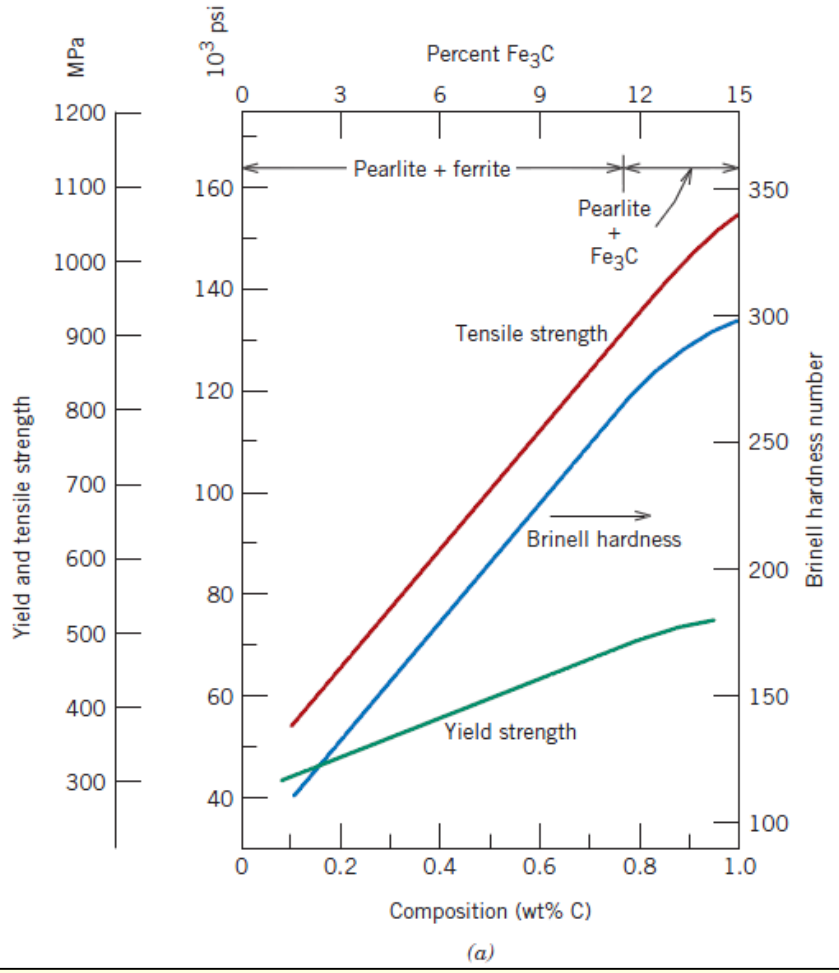
HB (a) i duktilnost (b)

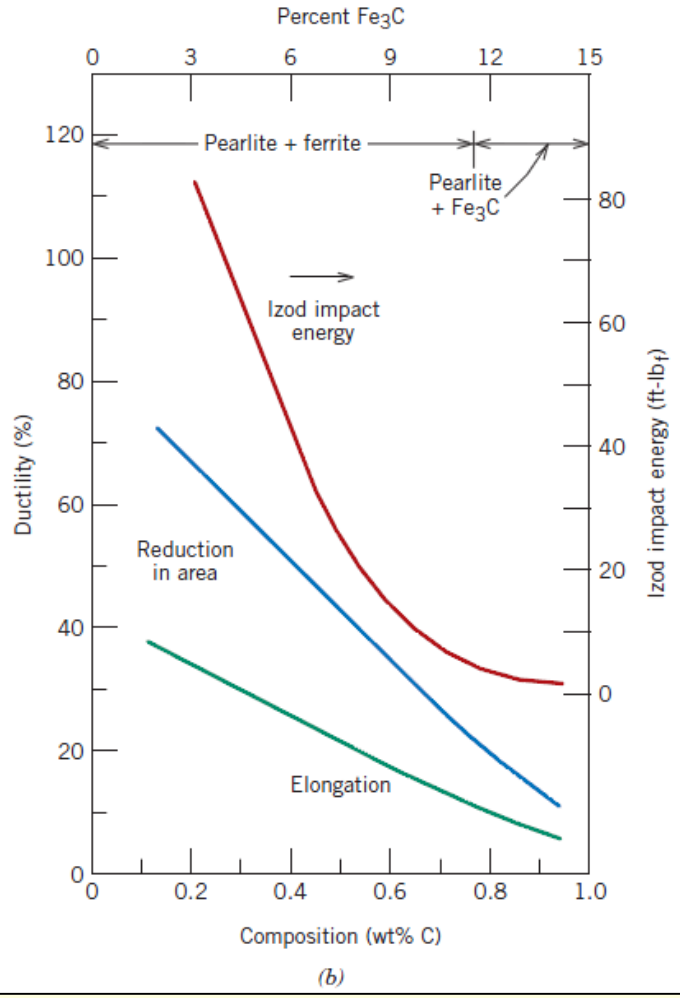




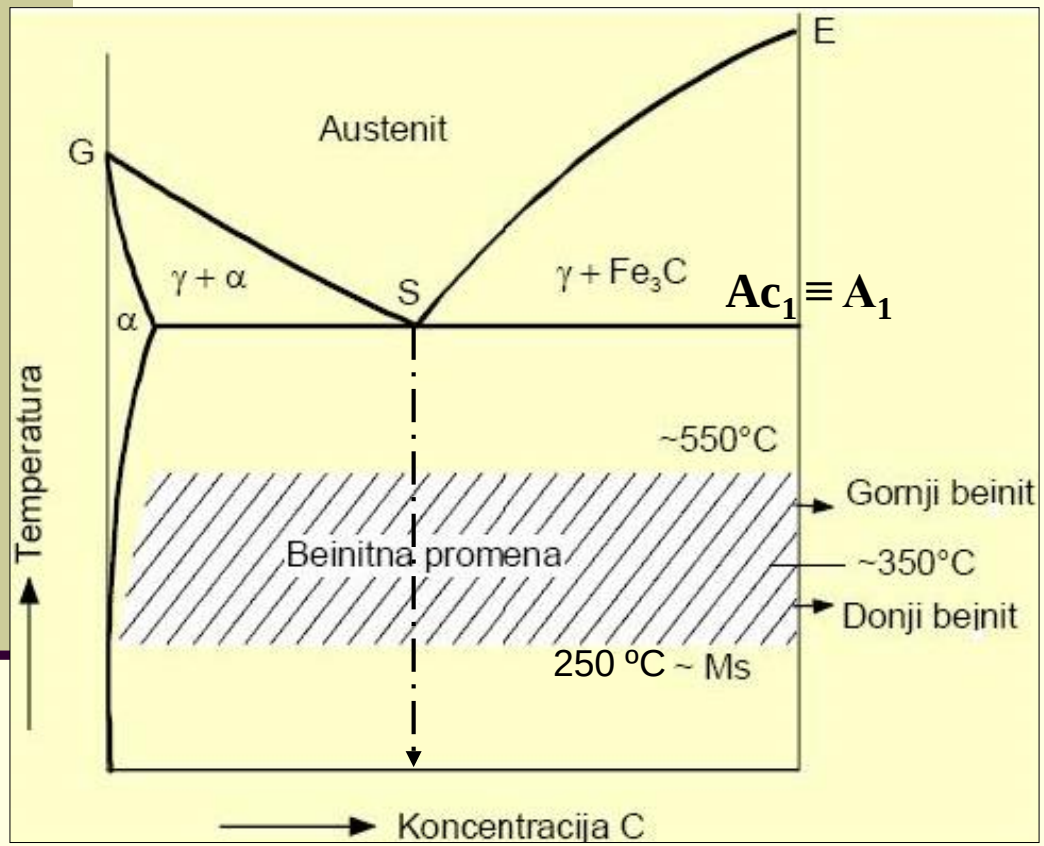
Mehaničke osobine u funkciji sadržaja C za fini perlit

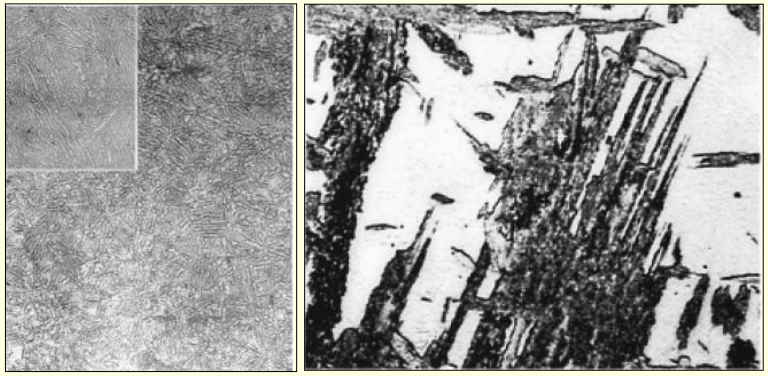
Re, Rm, HB (a) i A, Z, KV (b) u funkciji sadržaja C



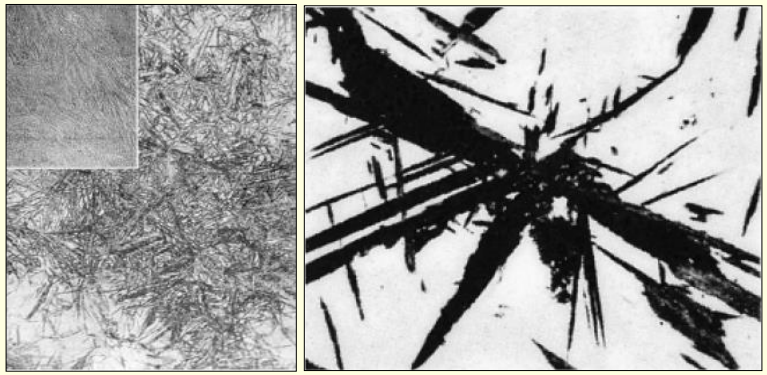


2. **Beinitna** transformacija



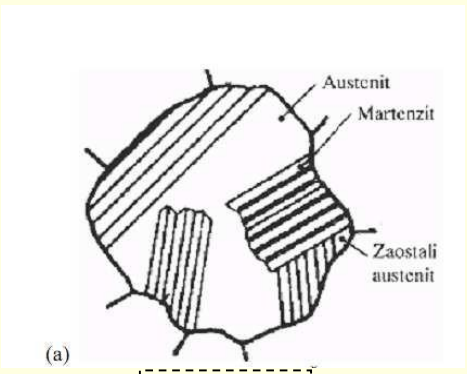


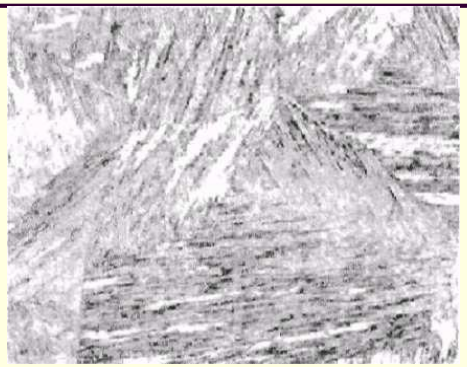
Gornji Beinit (perjasta struktura)



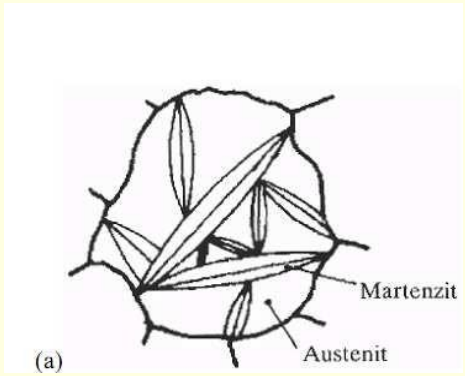
Donji Beinit (igličasta struktura)

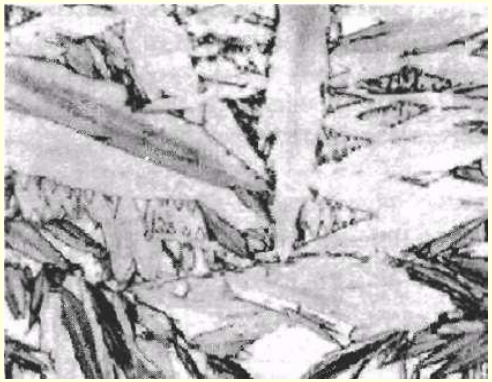
Martenzitna transformacija- vrste martenzita





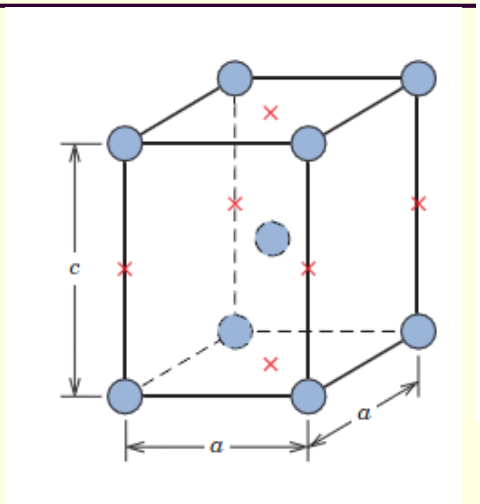
Mikrostruktura paketastog martenzita kod niskougljeničnog čelika, uvećano ×800.

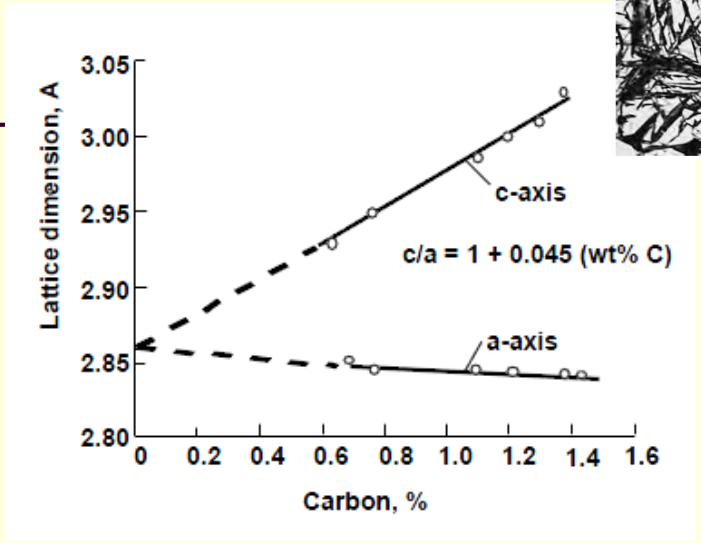




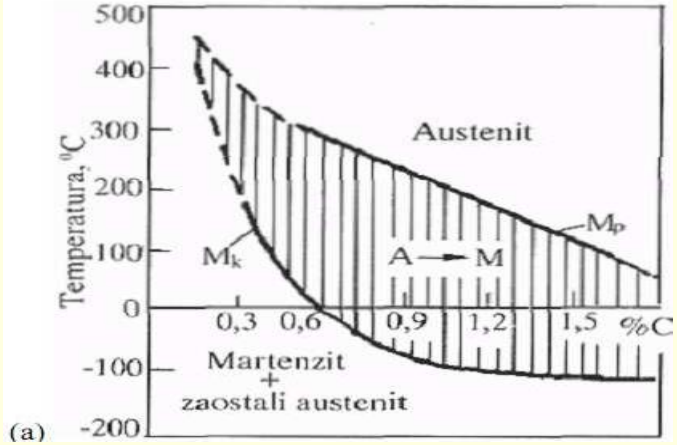
Pločasti kristali martenzita obrazuju se kod visokougljeničnih čelika (> 0,8% C).

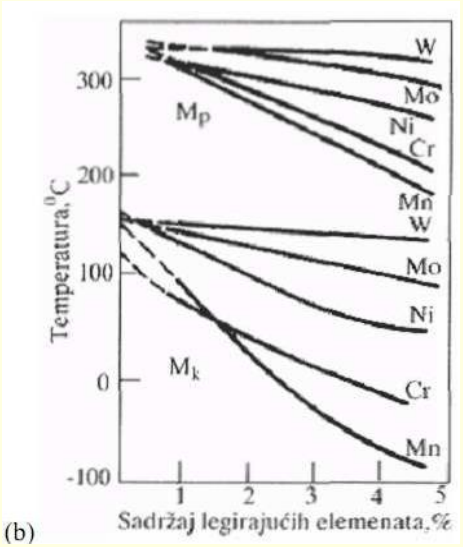
Tetragonalnost martenzita





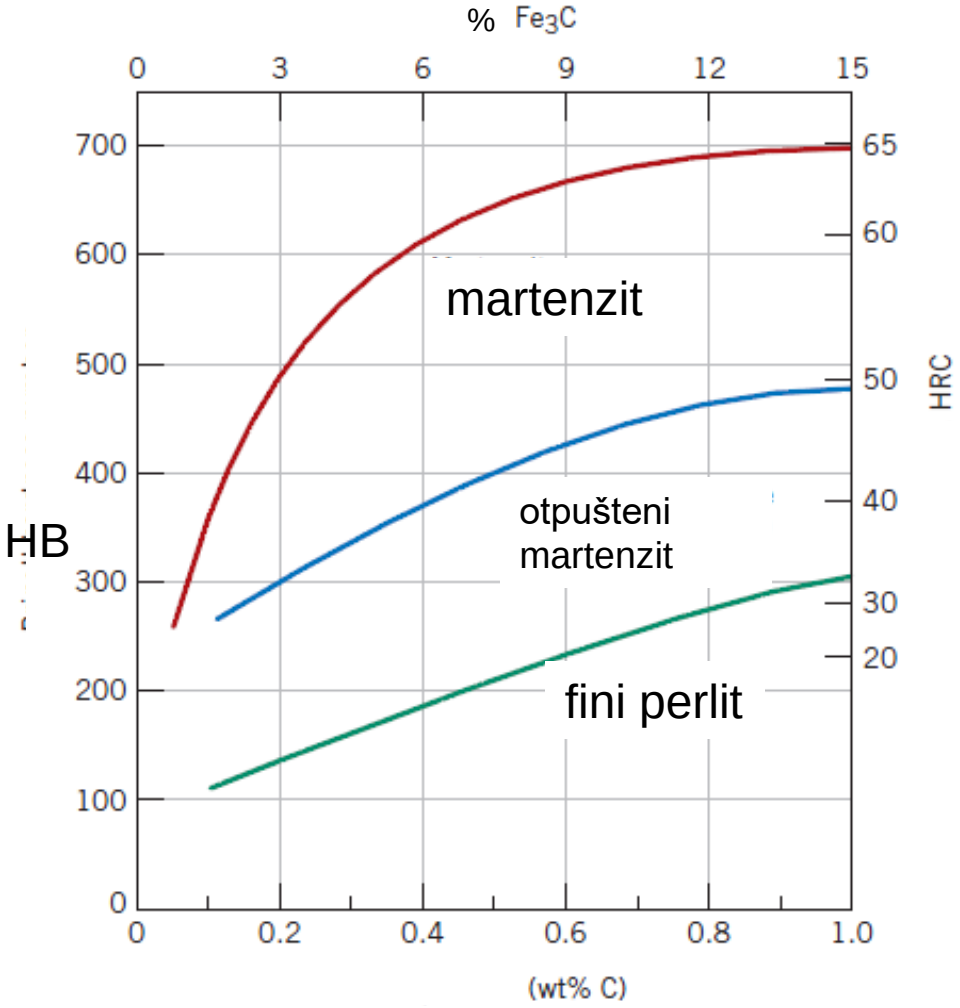
a) Uticaj sadržaja ugljenika na Mp (Ms) i Mk (Mf)

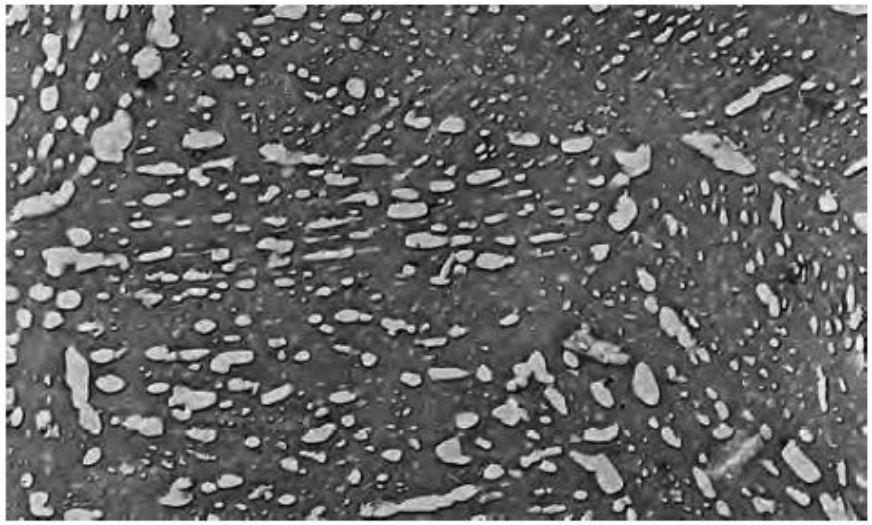




b) Uticaj legirajućih elemenata na Mp (Ms) i Mk (Mf)

HB, HRC u funkciji sadržaja C i mikrostrukture

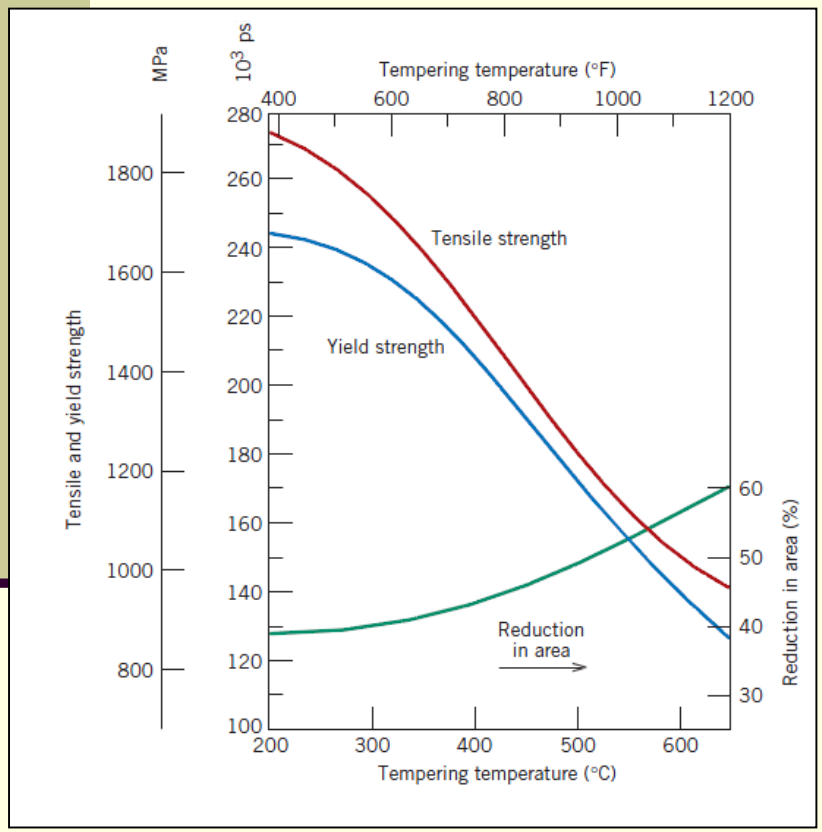




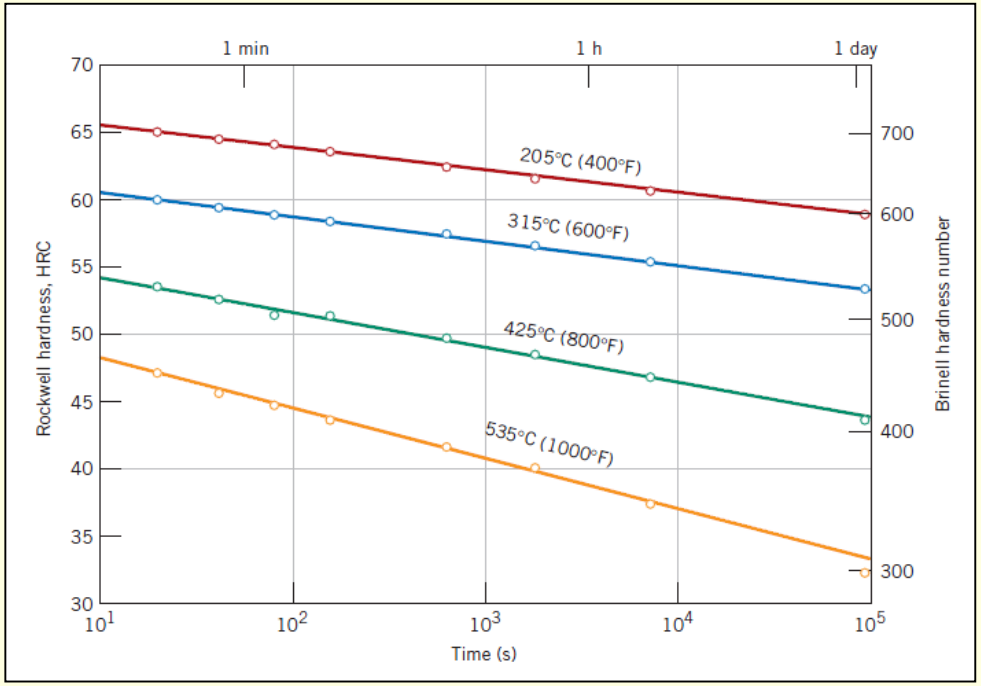
martenzit otpušten na 594°C
α' +Fe_3C čestice

Osobine otpuštenog martenzita

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



Rm, Re, 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
- 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

- Hvala na pažnji☺