

Mašinski materijali 3

1

Gvožđa

Rude železa

- U prirodi se nalaze oksidne, sulfidne i karbonatne rude železa. Najčešće se koriste oksidne rude i to hematit (Fe_2O_3) i magnetit (Fe_3O_4).
- 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-oksidi (MgO) - jalovina.
- Jalovina sadrži i jedinjenja sumpora i fosfora od kojih deo ostaje u tečnom metalu i smatraju se *štetnim primesama*.

2

Dobijanje sirovine za preradu u čelik i gvožđa

- **Osnovne sirovine** 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,*
 - *tečna troska i*
 - *visokopećni gas.*

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

3

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.
 - 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,
 - Hemijski sastav livničkog gvožđa je: 3- 5% C; 0,2 – 2% Si; 0,2 – 3% Mn; 0,1 – 2% P; 0,02 – 0,06% 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*.

4

Livena gvožđa

- Livena gvožđa se dobijaju **pretapanjem** sivog 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.

5

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.

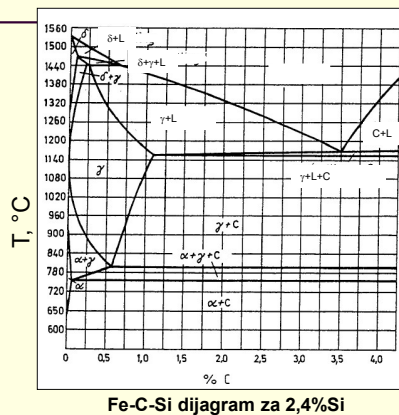
6

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**.

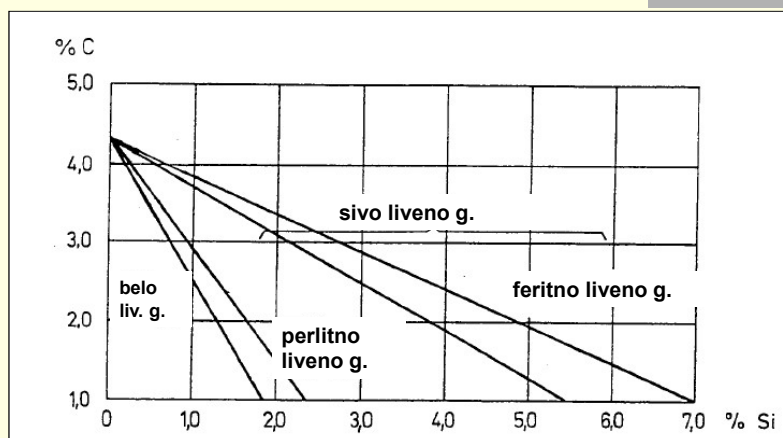
•Silicijum značajno **povećava livkost**, a **smanjuje žilavost**



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

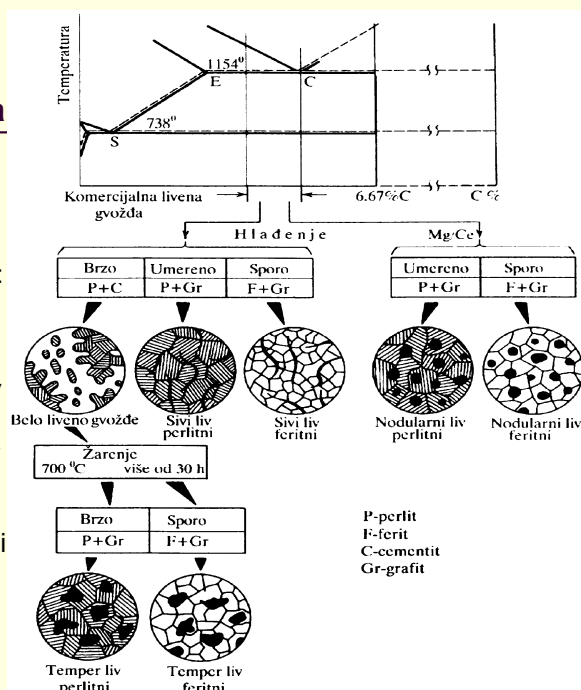


■ Finalna mikrostruktura gvožđa zavisice od brzine hlađenja i sadržaja Si

Klasifikacija gvožđa

- Livena gvožđa se dele prema obliku grafita na:

1. Sivo liveno gvožđe -sivi liv
2. Belo liveno gvožđe – beli liv
3. Temper liv
4. Vermikularni liv
5. Nodularni liv
6. ADI materijal termički obrađeni nodularni liv

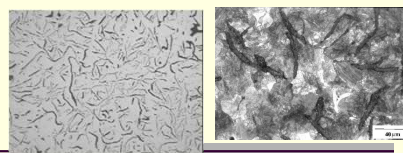


Sivi liv

- “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: 100-350 MPa

- Usitnjavanjem lamela zatezna čvrstoća i žilavost liva se povećavaju.



feritna osnova sa lamelama grafita (tamno)



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

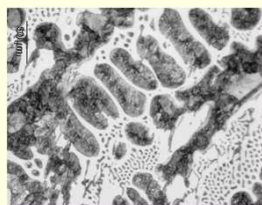
Sivi liv

- Osobine: jeftiniji je od ostalih livova, dobra livkost, niska čvrstoća, krtoš, 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,...

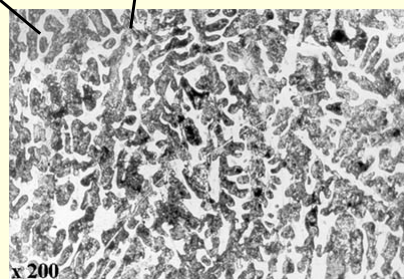


Bela livena gvožđa

- “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
($\text{P}+\text{Fe}_3\text{C}$) 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**

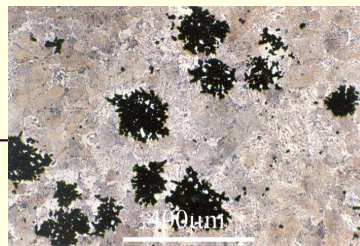
13

Belo liveno gvožđe

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



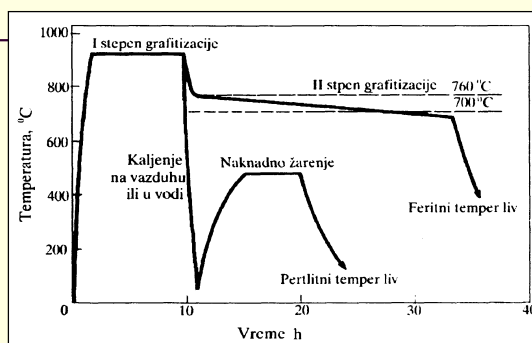
Temper liv



- Dobija se iz belog livenog gvožđa dugotrajnim žarenjem na visokim temperaturama da bi se ugljenik iz cementita, izdvojio 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.
- Postoji: beli i crni temper liv
 - Beli temper liv - žarenjem u *oksidacionoj* atmosferi - dolazi i do razugljeničenja odlivka.
 - Crni temper liv se dobija žarenjem u *neutralnoj* atmosferi.

15

Dobijanje temper liva



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

16

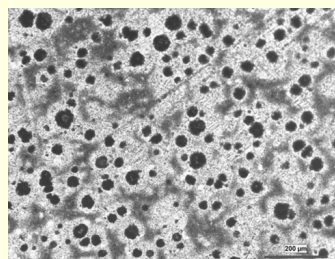
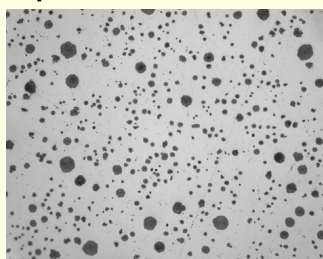
Temper liv

- 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 veću čvrstoću i žilavost od sivog liva, što je posledica izdvojenog grafita u obliku nodula i smanjenog sadržaj sumpora i fosfora.
- Struktura metalne osnove nodularnog liva zavisi od sastava i brzine hlađenja i može da bude **feritna, feritno perlita i perlitna**.



18

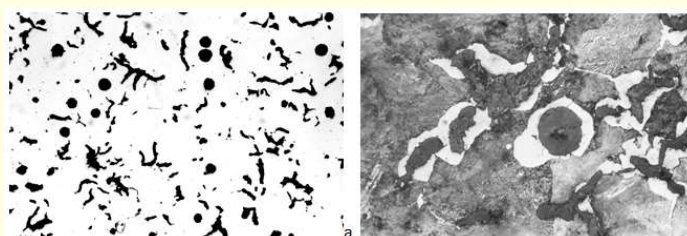
- Osobine: niska cena, dobra livljivost, čvrstoća i žilavost iznad sivog, temper i vermikularnog liva, dobro prigušuje vibracije
- *Može se termički obrađivati i tako se dobija ADI materijal (čvrstoća kao kod čelika za poboljšavanje, žilavost nešto manja, ali upola jeftiniji)*
- Primena nodularnog liva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



19

Vermikularni liv

- Grafit je u obliku kratkih štapića - vermikula
- U strukturi vermikularnog liva, pored vermikularnog grafita, nalaze se i nodule grafita (najviše do 30%). dobija se dodavanjem manje količine inokulanata (legura Fe-Si-Mg)
- Prema osobinama nalazi između sivog i nodularnog liva.



20

Vermikularni liv

- Osobine: niska cena, dobra livkost, čvrstoća i žilavost iznad sivog liva i na nivou temper liva, odlično apsorbuje vibracije
- Primena: blokovi motora (V-motori), izduvne grane, kućišta pumpi, fitinzi,...



Legirana livena gvožđa

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

Legirana livena gvožđa

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.

23

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

24

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):**

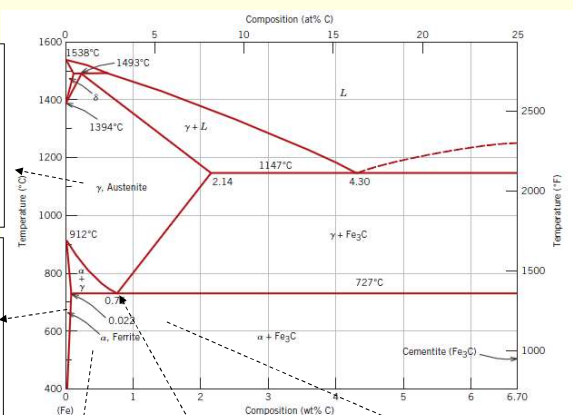
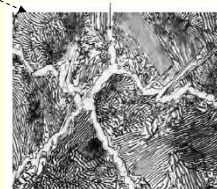
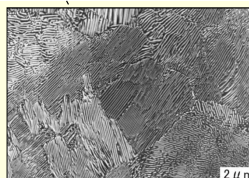
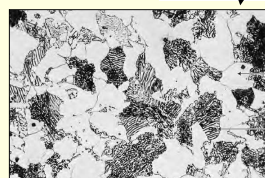
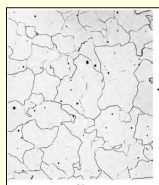
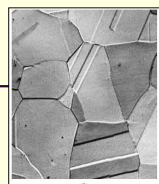
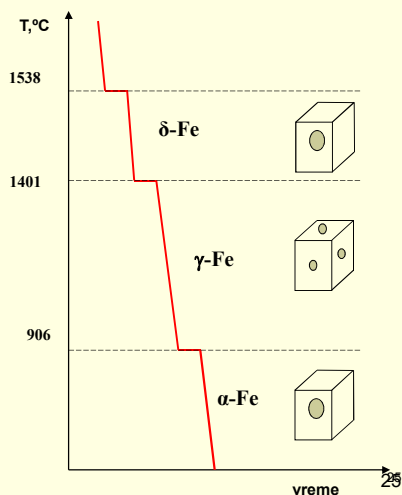
- KZC;
- $T=20-906\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- fizičke osobine (magnetičnost):
 $T=20-769\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$ feromagnetično α -Fe,
 $T=769-906\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$ paramagnetično β -Fe.
 $(\alpha\text{-Fe}, \beta\text{-Fe} = \text{ZCKR})$

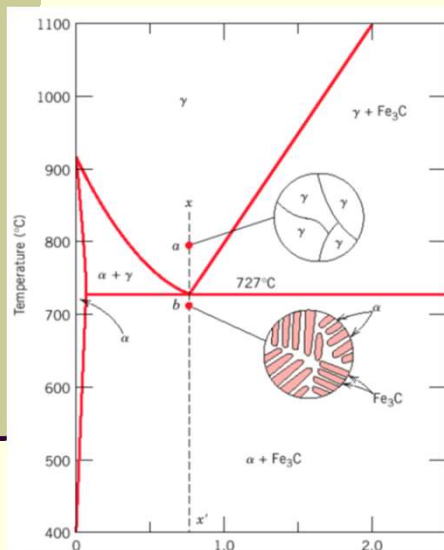
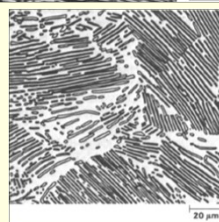
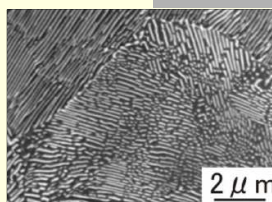
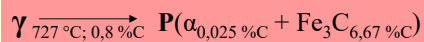
➤ **γ železo (γ -Fe):**

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

➤ **δ železo (δ -Fe):**

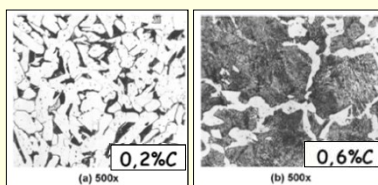
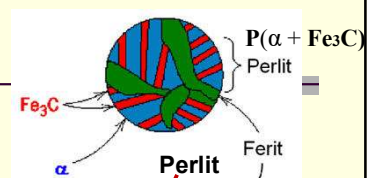
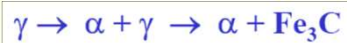
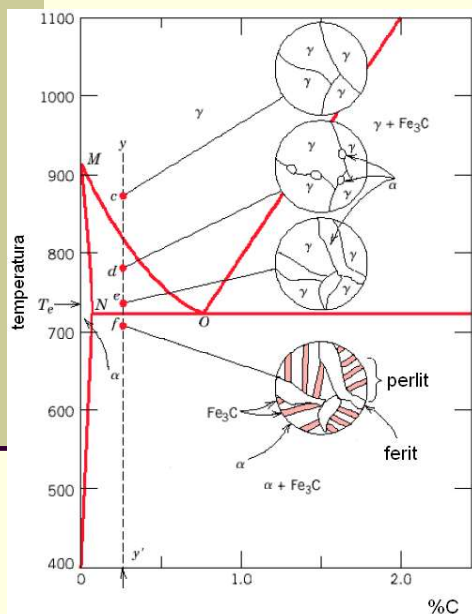
- KZC;
- $T=1401-1538\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_{top}).
- značajno za visoko legirane čelike;
- stabilnost na visokim T.



EUTEKTOIDNI ČELICI**PERLIT**

Mikrostruktura perlita

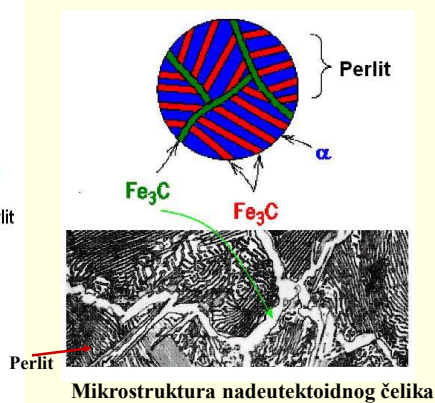
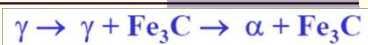
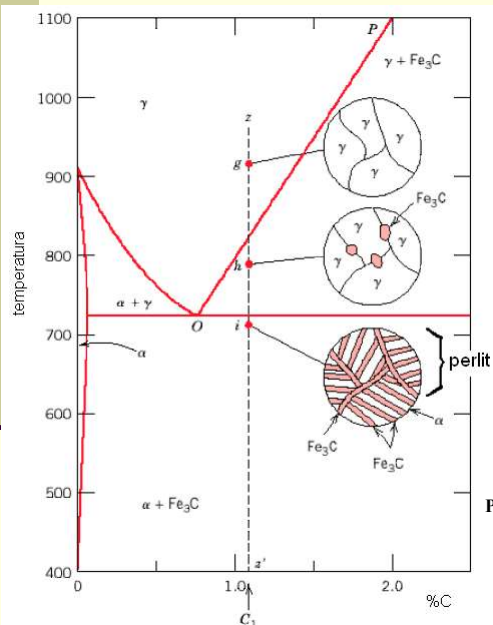
27

PODEUTEKTOIDNI ČELICI

Mikrostrukture podeutektoidnih čelika

28

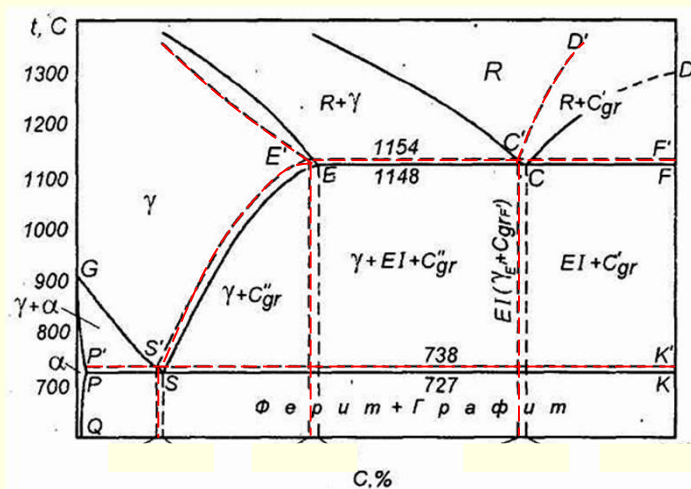
NADEUTEKTOIDNI ČELICI



29

Stabilni dijagram stanja (Fe-C)

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



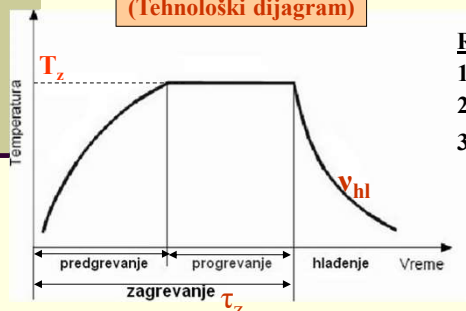
30

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 hladjenja (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 hlad. (τ_{hl}) ili brzina hladjenja (v_{hl}).**

31

Podela TO čelika:

1. **Žarenje BEZ fazne transformacije.**

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

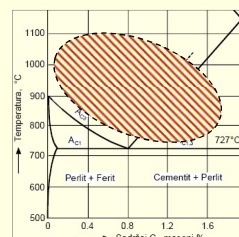
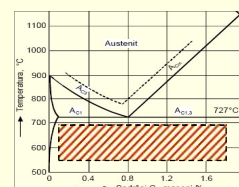
2. **Žarenje SA faznom transformacijom.**

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

3. **Kaljenje**

- površinsko
- zapreminsko.

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



32

ŽARENJE čelika generalno

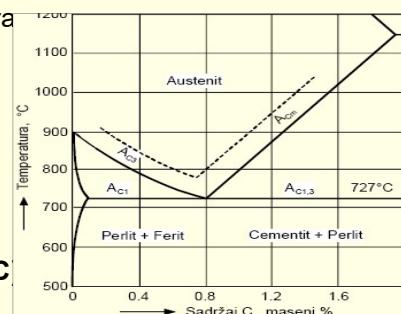
Žarenjem se postiže uspostavljanje strukturne ravnoteže koja je poremećena nekim prethodnim postupkom termičke ili mehaničke obrade.

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 ($P+\alpha$);
- perlitna struktura (P);
- perlitno-cementitna struktura ($P+Fe_3C$).



33

1. Žarenje **BEZ** fazne transformacije

1.1) REKRISTALIZACIONO ŽARENJE (prethodno plastično deformisano na hladno)

Parametri režima rekristalizacije:

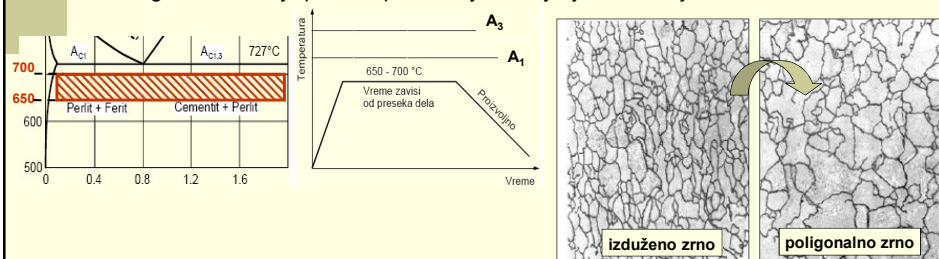
1. **Zagrevanje** legure do $T > T_{rekris.}$ (**650-700°C**);
2. **Držanje** na toj temperaturi (**kratkotrajno** kod tankih preseka; a **veoma dugo** kod debele preseka → ujednačeno progrevanje i rekristalizacija po celom preseku);
3. **Hladjenje** proizvoljnom brzinom (najčešće na **vazduhu**).

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

Niskougljenični čelici imaju $T_r \approx 650^\circ C$, što predstavlja **granicu prerade na toplo i hladno**.

Cilj rekristalizacije je:

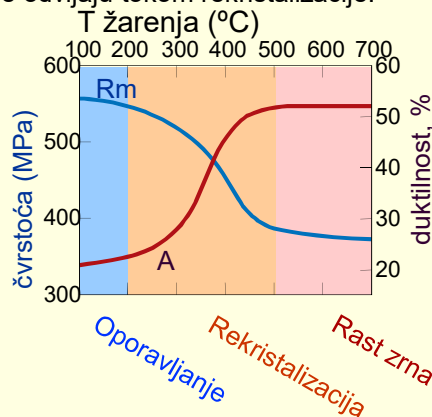
- otklanjanje posledica deformisanja na hladno (kod niskougljenič.Č);
- promena oblika zrna (izdužena → poligonalna zrna, a struktura ($\alpha+P$) ostaje ista);
- omogućava se dalja prerada presovanjem, valjanjem i vučenjem.



Rekristalizaciono žarenje

Procesi tokom zagrevanja posle hladne deformacije

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



35

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 pritiski povoljan sa aspekta nastanka prslina.

36

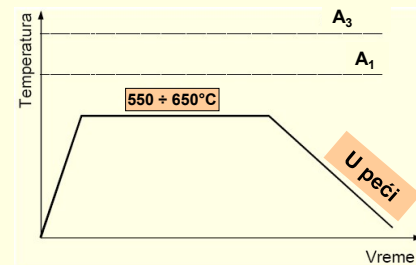
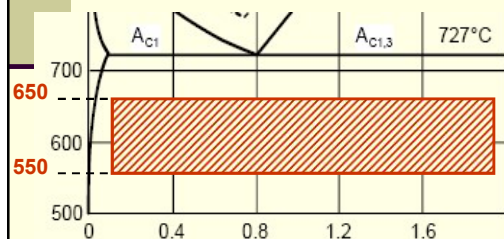
1.2) Žarenje radi uklanjanja zaostalih unutrašnjih (zaostalih) napona

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:

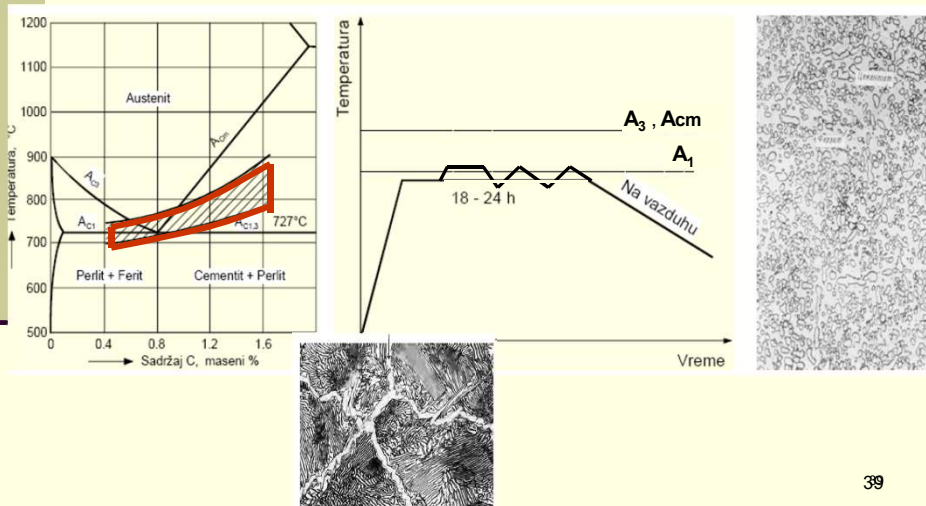
- za čelične **odlivke** i odlivke izrađene od livenog gvoždja $\rightarrow 550 \div 650^\circ\text{C}$;
- za čelične delove obrađene plastičnom deformacijom **na hladno** $\rightarrow T - (250 \div 300)^\circ\text{C}$;
- kod mernih i kontrolnih alata, da bi se postigla neophodna dimenziona stabilnost $\rightarrow 150^\circ\text{C}$ (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 lamele cementita prevode u sfere
- Načini izvođenja TO
 - zagrevanjem odmah ispod A_1 i držanje na oko $700^\circ\text{C}/15\text{-}20\text{h}$
 - cikliranje oko $A_1 \pm 50^\circ\text{C}$
- Brzina sferoidizacije zavisi od finoće perlita – što je **finiji** to se lakše odvija
- Prethodna hladna deformacija **ubrzava** sferoidizaciju

2.1) Sferoidizacija ili MEKO ŽARENJE



39

2.2) Normalizaciono žarenje (normalizacija)

- Normalizacija se koristi da se dobije ujednačeno sitno zрно
- 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 zрно
- 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;

40

2.2) Normalizaciono žarenje (normalizacija)

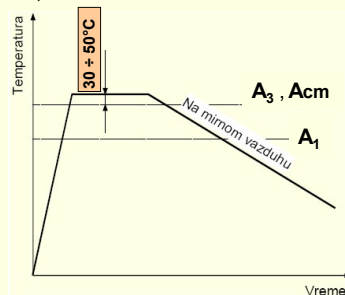
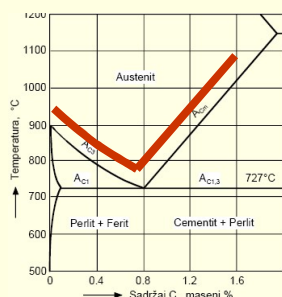
Parametri režima normalizacije:

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** **nadeutektoidne Č**;

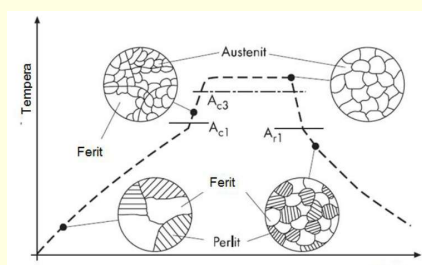
2. Progrevanje (držanje) na toj temperaturi, i

3. Hladjenje na mirnom **vazduhu**.

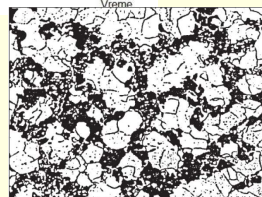


41

2.2) Normalizaciono žarenje (normalizacija)



posle livenja



posle normalizacije

42

2.3) Potpuno žarenje

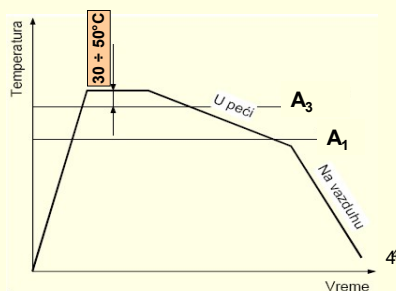
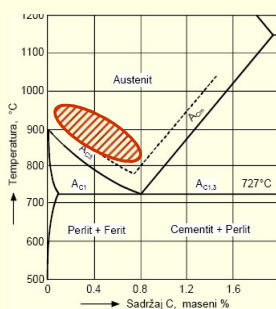
Parametri režima potpunog žarenja:

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:

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



2.4) Difuziono žarenje (homogenizacija)

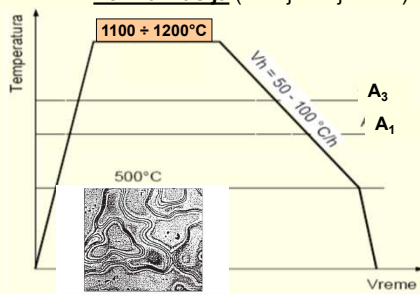
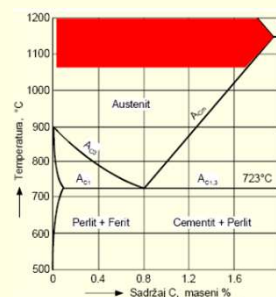
Cilj homogenizacije je:

- izjednačavanje hemijskog sastava u zrnima;
- 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: $1100\div 1200^\circ\text{C}$, malo ispod solidus linije- A_4)
2. **Dugotrajno** progrevanje na toj temperaturi ($80\div 100$ h) i
3. **Dugo i sporo** hladjenje (**u peći**).

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



44

3. KALJENJE ČELIKA

Parametri režima kaljenja :

1. Zagrevanje čelika:

- $30 \pm 50^\circ\text{C}$ **iznad** A_3 za podeutektoidne Č, i $30 \pm 50^\circ\text{C}$ **iznad** A_1 za nadeutektoidne Č.

2. Progrevanje na toj temperaturi, i

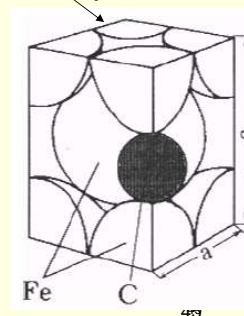
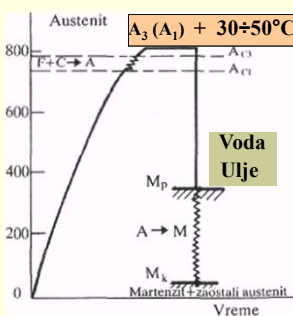
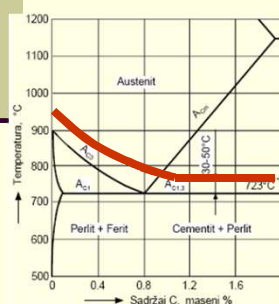
3. Hladjenje brzinom **većom** od kritične brzine hladjenja (V_k)

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

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

• **Kritična brzina hladjenja** (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 R_m , porast KU i uklanjanja unutrašnjih napona, izvodi **naknadno zagrevanje** i sporo hladjenje \rightarrow **OTPUŠTANJE**.

Parametri režima OTPUŠTANJA su:

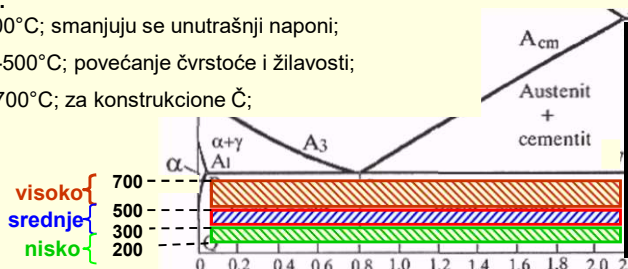
1. **Naknadno zagrevanje** do **ispod** kritične temperature A_1 ,

2. **Držanje kraće vreme** na toj temperaturi, i

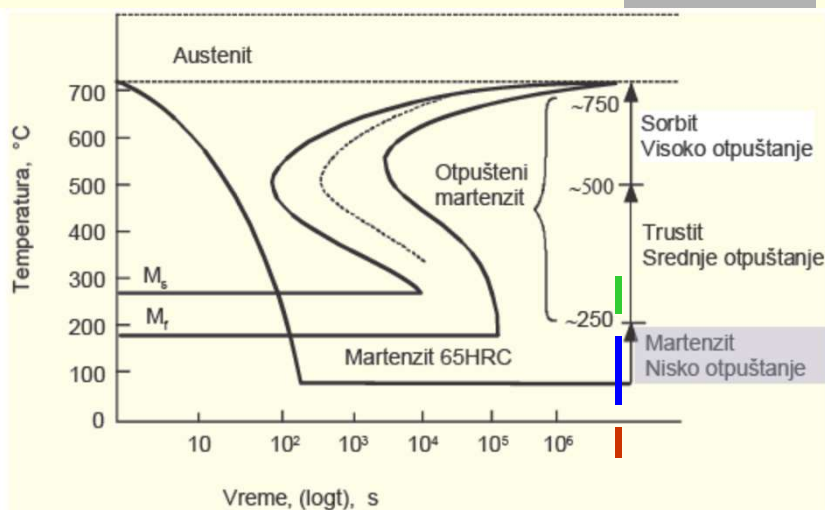
3. **Lagano hladjenje** (npr., na mirnom **vazduhu**).

Zavisno od T_z razlikuju se:

- **Nisko Otpuštanje**: $200-300^\circ\text{C}$; smanjuju se unutrašnji naponi;
- **Srednje Otpuštanje**: $300-500^\circ\text{C}$; povećanje čvrstoće i žilavosti;
- **Visoko Otpuštanje**: $500-700^\circ\text{C}$; za konstrukcione Č;



4. OTPUŠTANJE



POBOLJŠANJE = KALJENJE + VISOKO OTPUŠTANJE

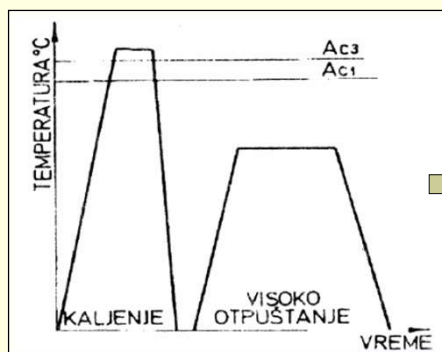
Kombinovani postupak Kaljenja + Visokog Otpuštanje naziva se = **POBOLJŠANJE**.

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

Cilj poboljšanja je da se:

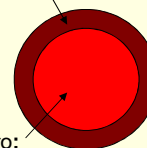
- u jezgru strukture **povećava žilavost** (sorbit), i
- **zadrži površinska tvrdoća**.

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



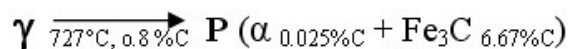
Površinski sloj: **visoka tvrdoća**

Jezgro: **velika žilavost**



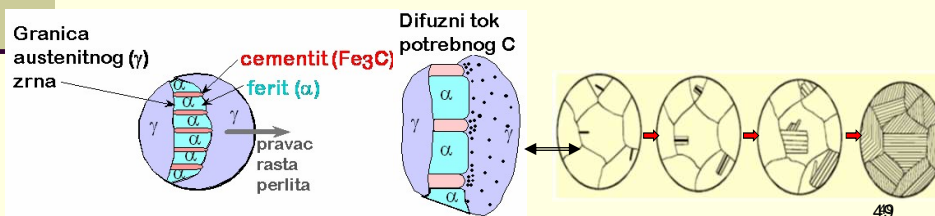
48

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.

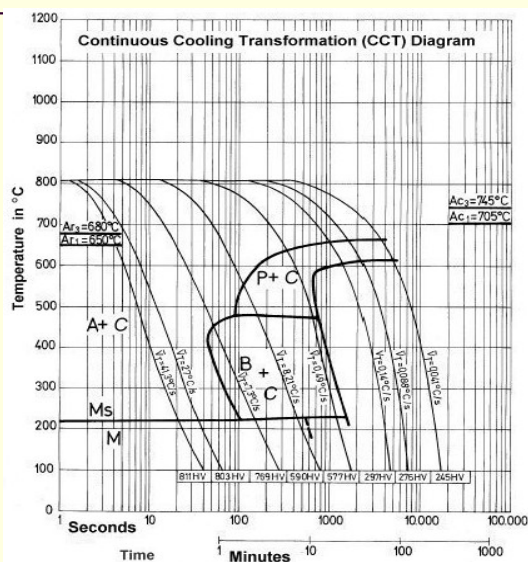


TRANSFORMACIJA AUSTENITA

- **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 hlađenjem
 - izotermnom transformacijom

CCT dijagram (KH)

Continuous-Cooling-Transformation \equiv Dijagram KONTINUALNOG hlađenja γ

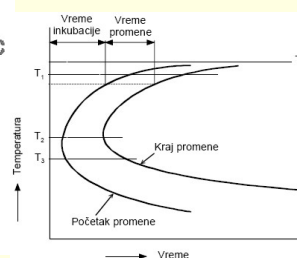
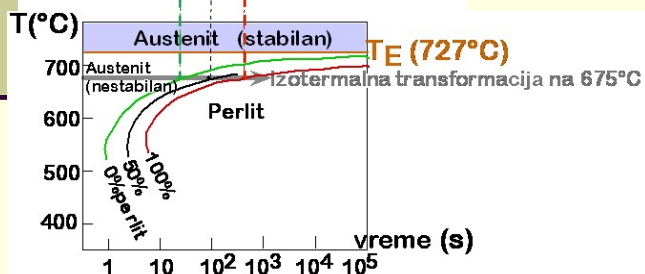
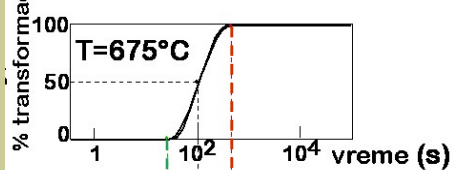


51

TTT dijagram (IR)

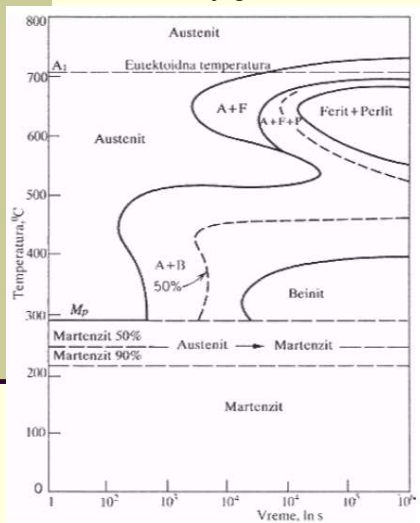
Time-Temperature-Transformation \equiv Dijagram IZOTERMALNOG razlaganja γ

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

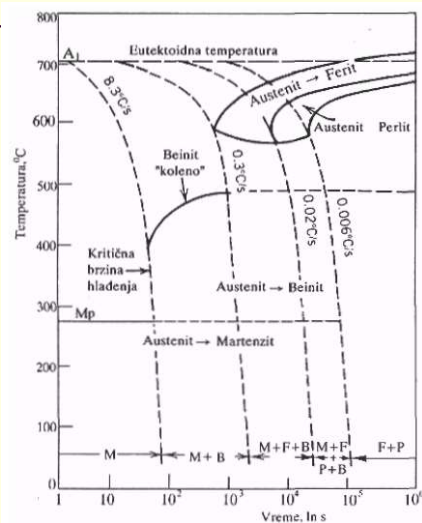


Uporedni prikaz TTT (IR) i CCT (KH) dijagrama za legirani (Cr, Mo) čelik

IR dijagram



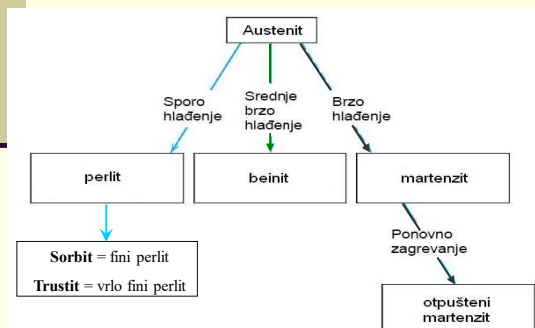
KH dijagram



53

transformacija austenita u zavisnosti od brzine hlađenja:

| V_{hl} [°C/sec] | Struktura | Tvrdća [HB] | Završene faze | |
|----------------------|-----------|----------------|---------------|-----------|
| | | | 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 | / |



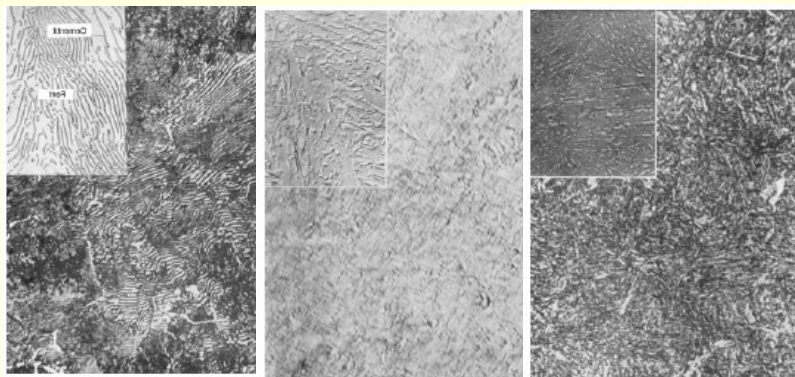
Napomena:

Fazne transformacije γ teku istovremeno:

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

54

Perlit, Sorbit, Trustit



Perlit

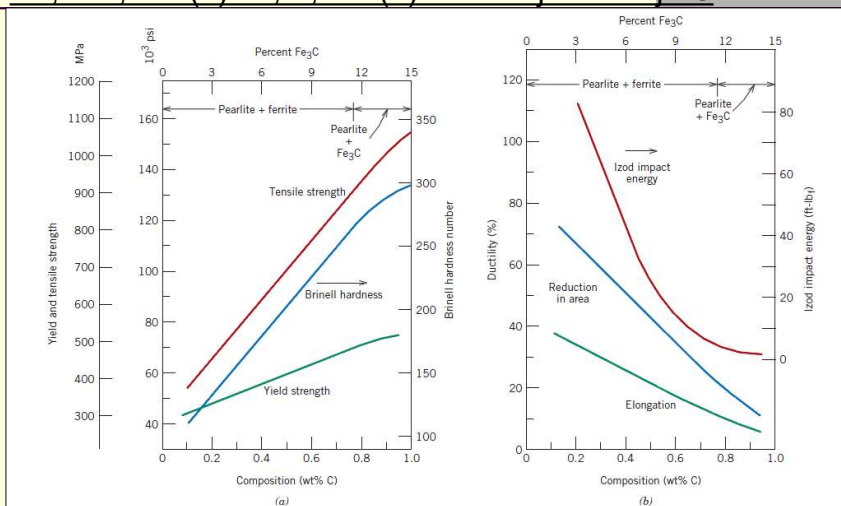
Sorbit

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 za fini perlit

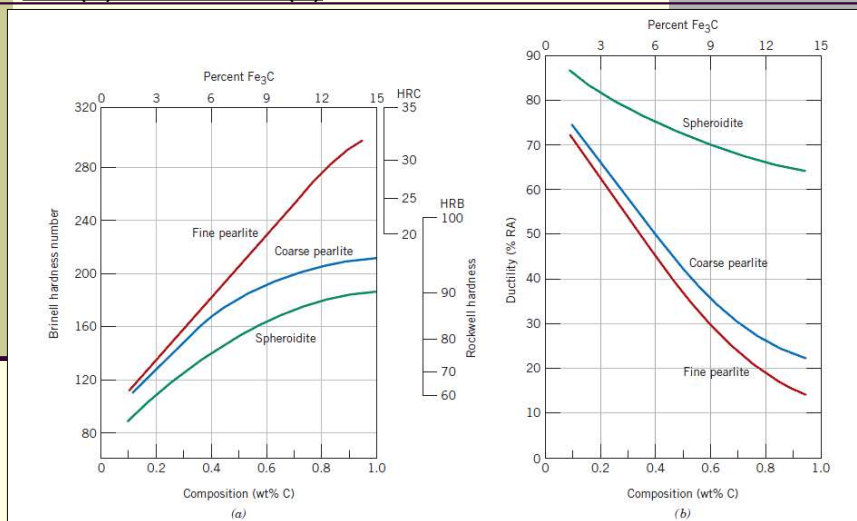
Re, Rm, HB (a) i A, Z, KV (b) u funkciji sadržaja C



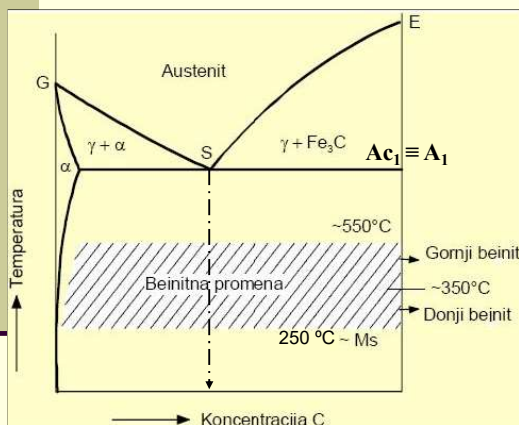
56

Mehaničke osobine u funkciji sadržaja C i vrste perlita

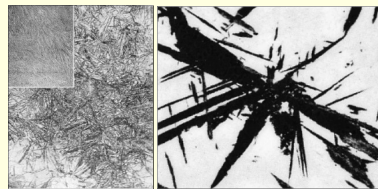
HB (a) i duktilnost (b)



2. Beinitna transformacija

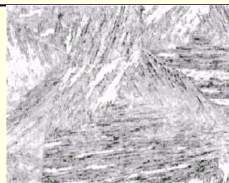
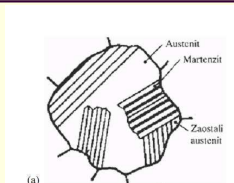


Gornji Beinit (perjasta struktura)

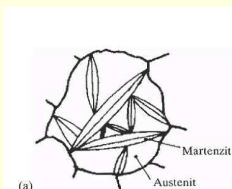


Donji Beinit (igličasta struktura)

Martenzitna transformacija- vrste martenzita



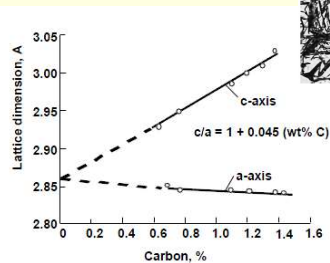
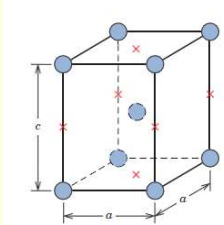
Mikrostruktura paketastog martenzita kod niskougleničnog čelika, uvećano $\times 800$.



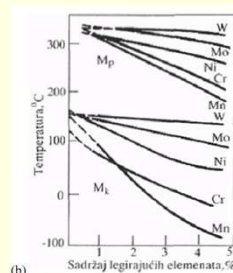
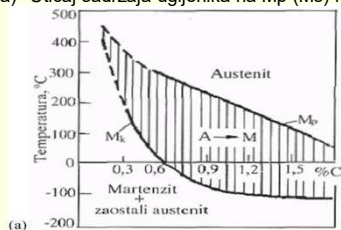
Pločasti kristali martenzita obrazuju se kod visokougleničnih čelika ($> 0,8\% \text{ C}$).

59

Tetragonalnost martenzita

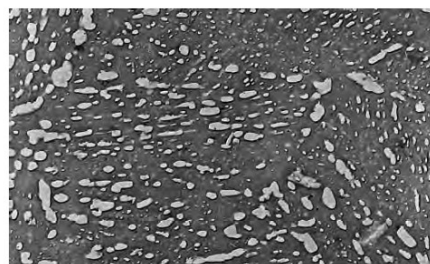
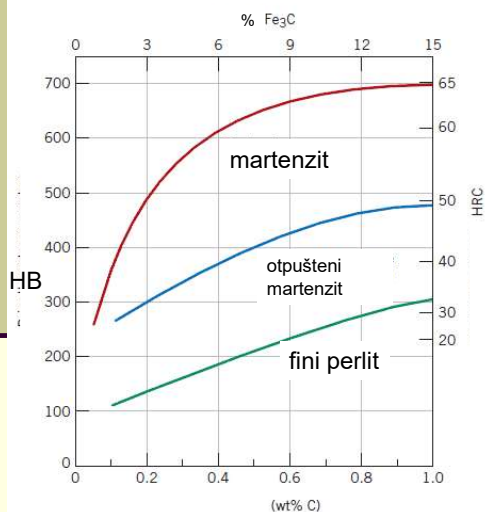


a) Uticaj sadržaja ugljenika na M_p (M_s) i M_k (M_f)



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

HB, HRC u funkciji sadržaja C i mikrostrukture

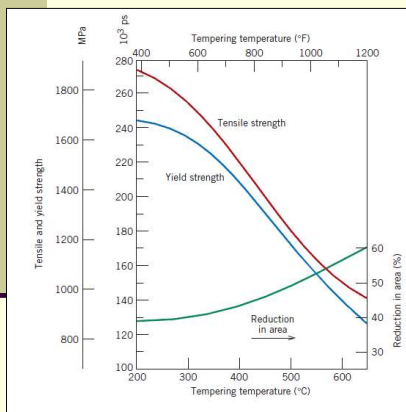


martenzit otpušten na 594°C
 α' + Fe₃C čestice

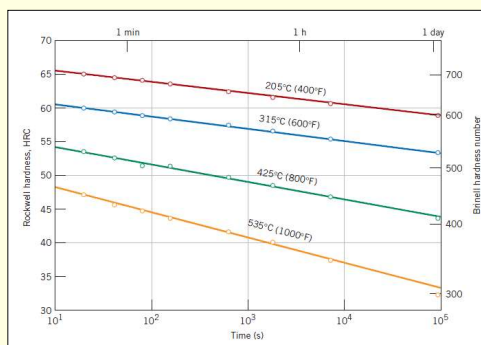
61

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

62

Otpusna krtost

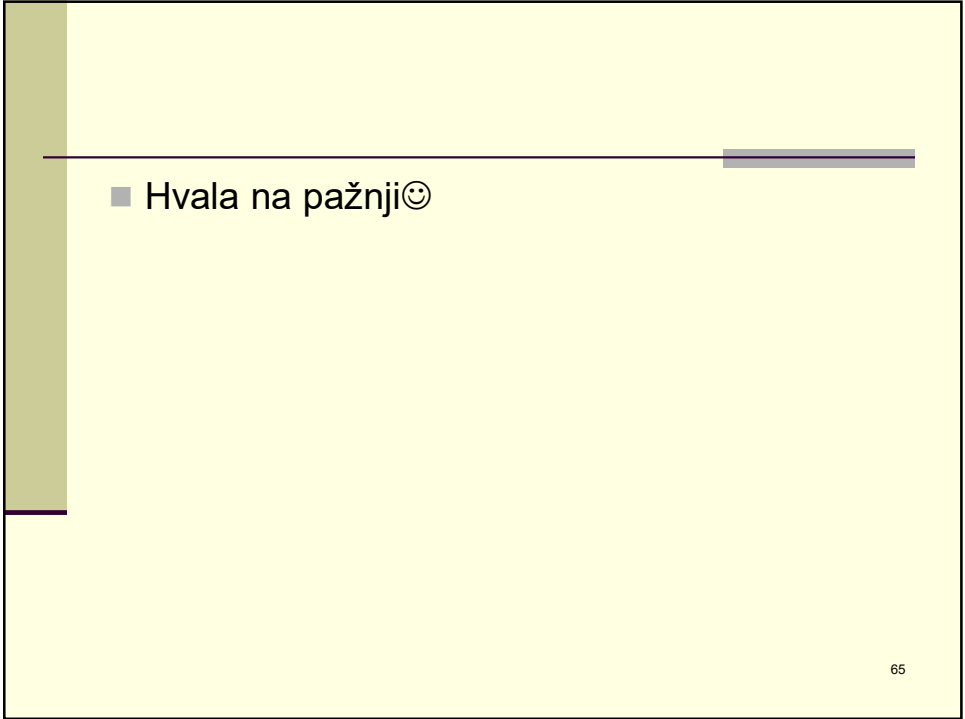
- Otpuštanje nekih čelika može da dovede do pada žilavosti što se naziva otpusna krtost – slabe granice zrna
- Ovaj fenomen se javlja kada se:
 - otpuštanje izvodi na T preko 575°C, praćeno sporim hlađenjem do sobne temperature ili
 - kada se otpuštanje izvodi u intervalu od 375-575°C
- Čelici skloni 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

63

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

64



■ Hvala na pažnji😊

65