

Mašinski materijali 3

- *razni izvori*

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*.

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.

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 sivog livničkog gvožđa je: **3,6-3,8% C**, **1,25-3,75% Si**, 0,7-1,1% Mn, **0,3-0,7% P** i 0,04-0,06% 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*.

Livena gvožđa

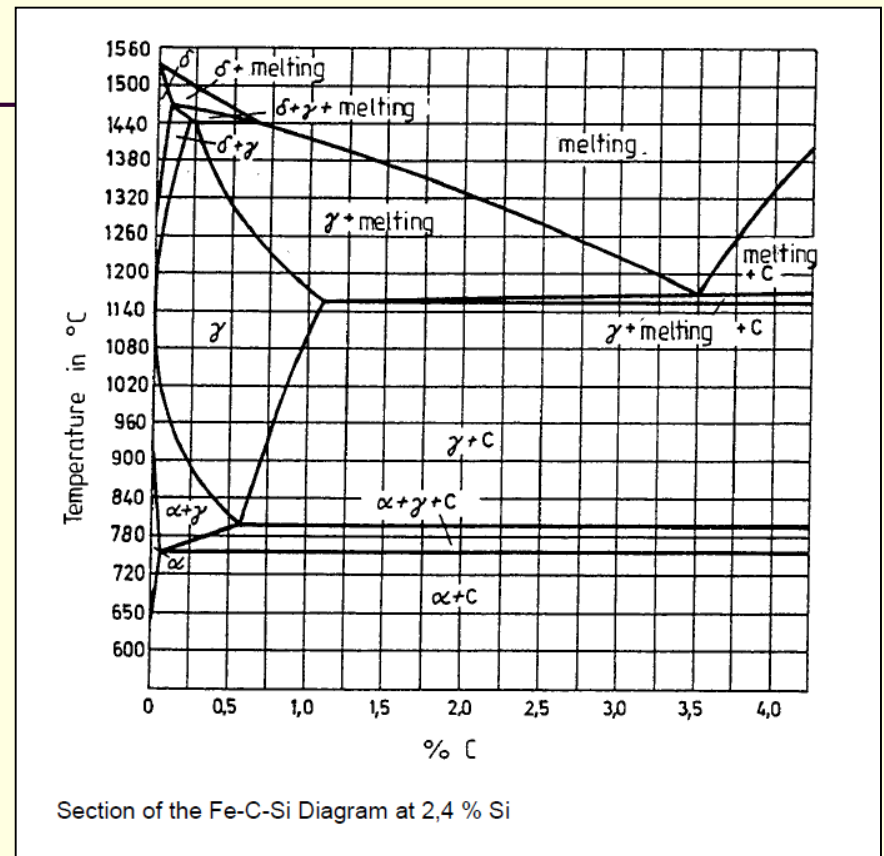
- Livena gvožđa se dobijaju **pretapanjem** livničkog gvožđa (uz dodatak starog gvožđa)
- Gvožđa imaju **nisku plastičnost i malu otpornost prema udaru.**
- Dobra svojstva su:
 - livkost,
 - široki opsega čvrstoće i tvrdoće,
 - u većini slučajeva dobra obradivosti rezanjem, i
 - niska cena.

Liveana gvožđa

- Ako je potrebno popraviti neka svojstva, npr. otpornost prema habanju i koroziji, **liveana 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.

Utica j 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**

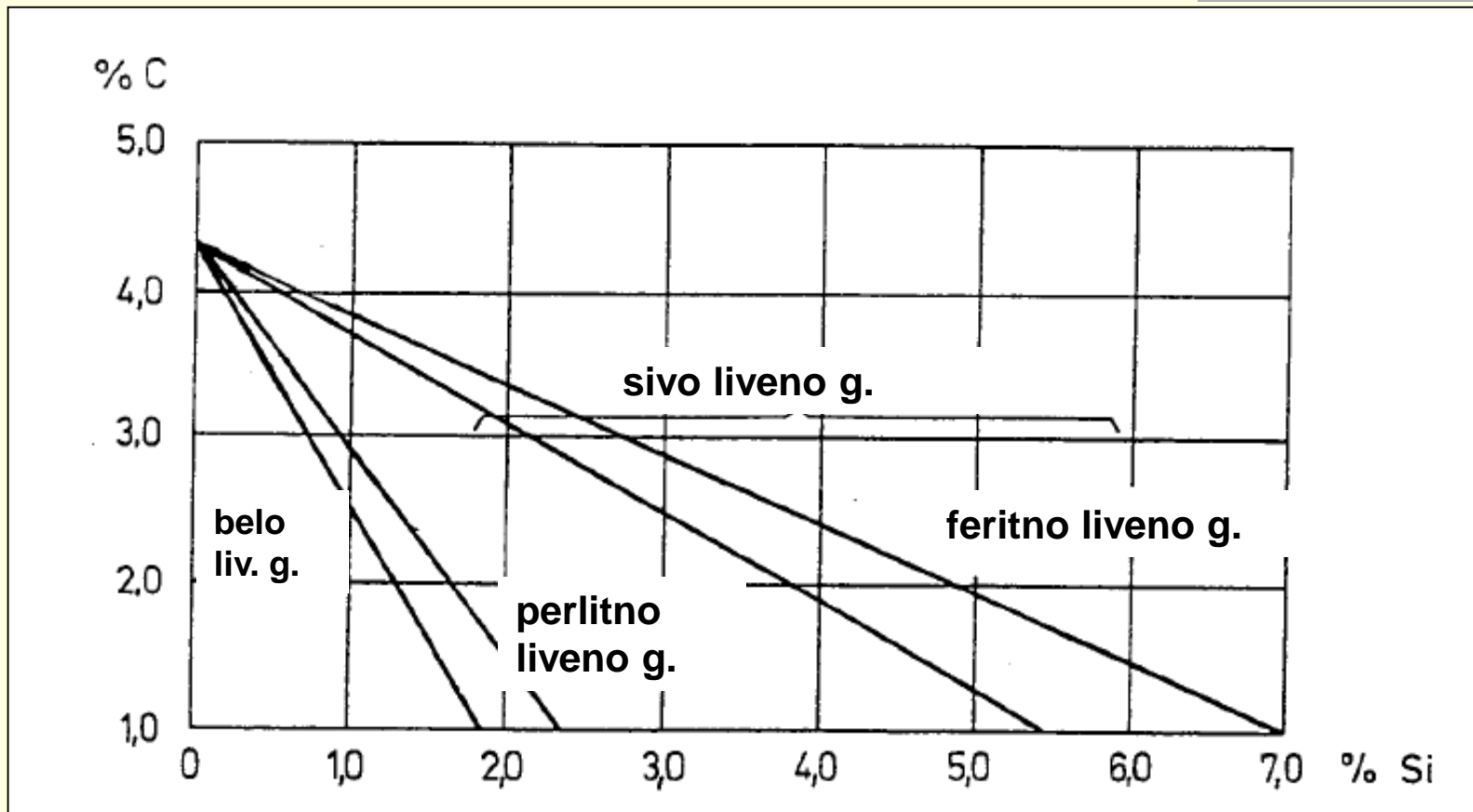


Utica j sadržaja Si na pomeranje eutektičke tačke, C%

	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

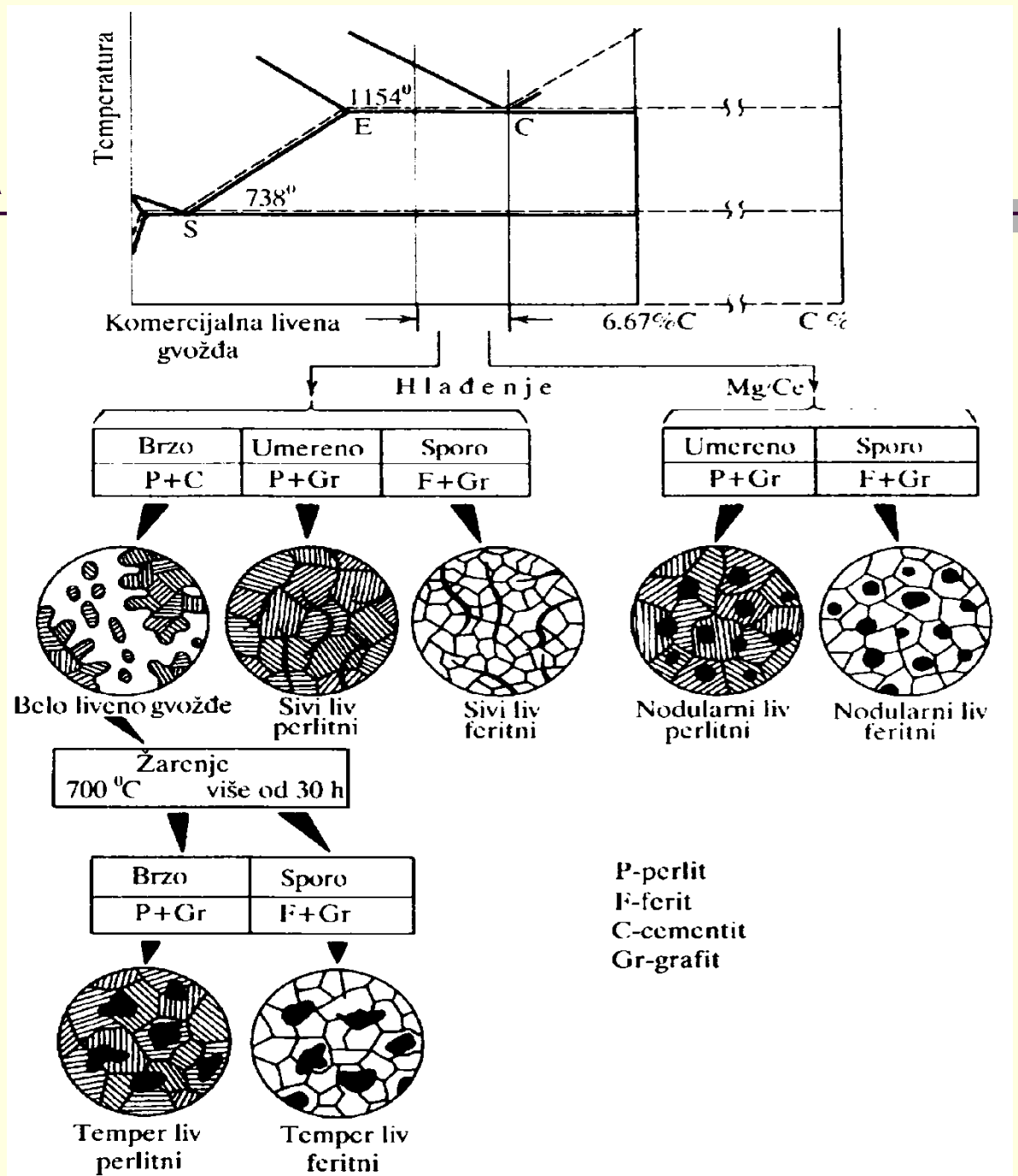
Struktura osnove kod gvožđa – Maurerov dijagram



- Finalna mikrostruktura gvožđa zavisice od brzine hlađenja i sadržaja Si 8

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

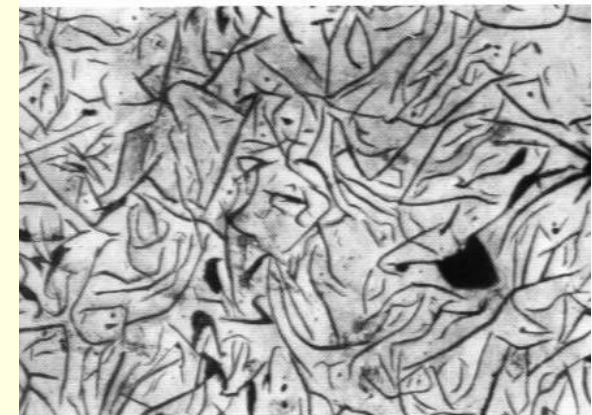
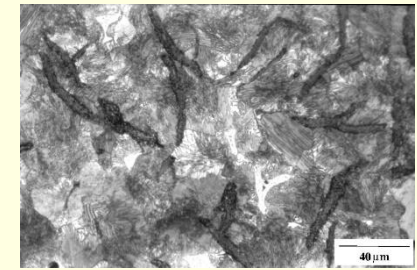
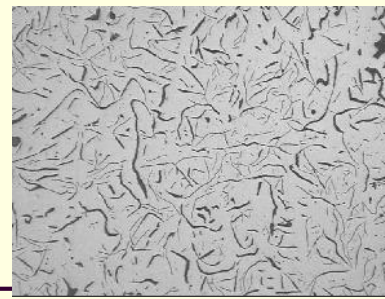


Sivi liv

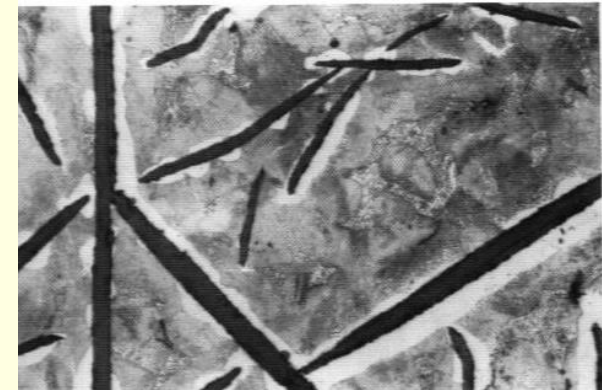
- “Višak” ugljenika preko 2,11% se pojavljuje u obliku grafita
- Sadrže Si (do 3 %) koji uz sporo hlađenje izaziva inokulaciju grafita.
- Grafit je u obliku lamela
- Lamele nepovoljno utiču na svojstva liva, a prvenstveno na žilavost.

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).

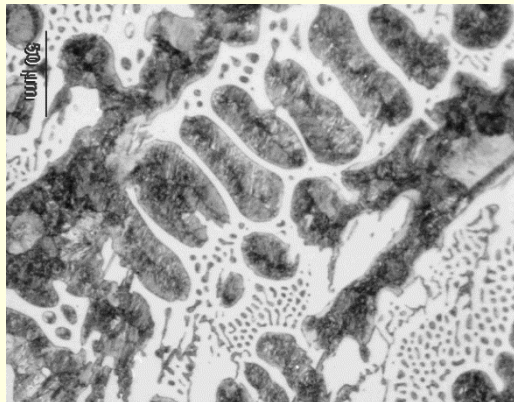
Sivi liv

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

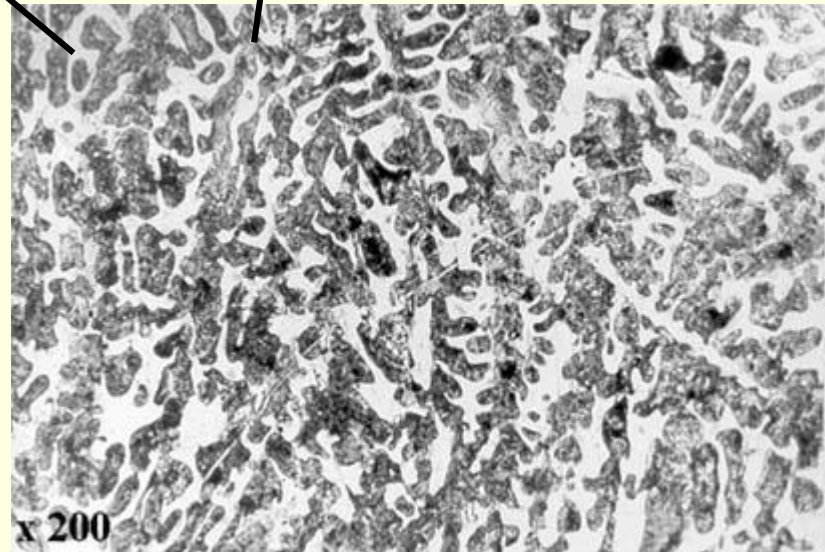


Bela livena gvožđa

- “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

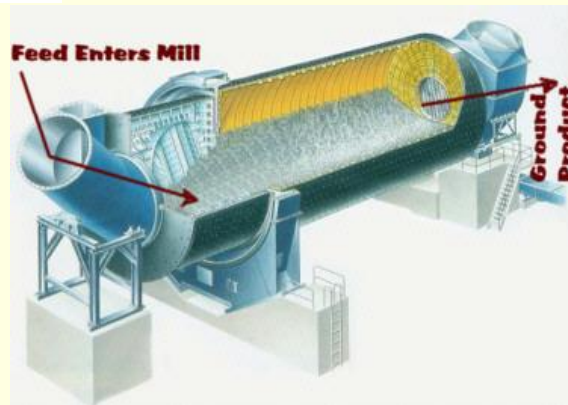
Osobine:

- 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

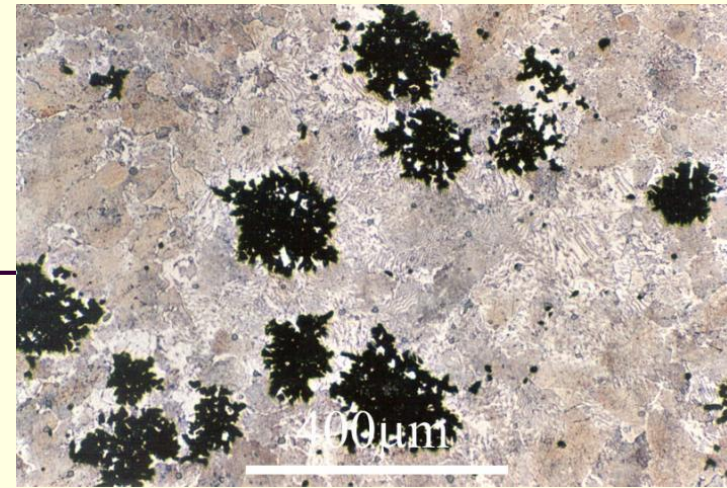
Ako pri hlađenju odlivka u površinskom sloju nastane tvrda cementitna struktura, a u unutrašnjosti odlivka struktura sivog liva, dobija se **odbeljeni liv**

Belo liveno gvožđe

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

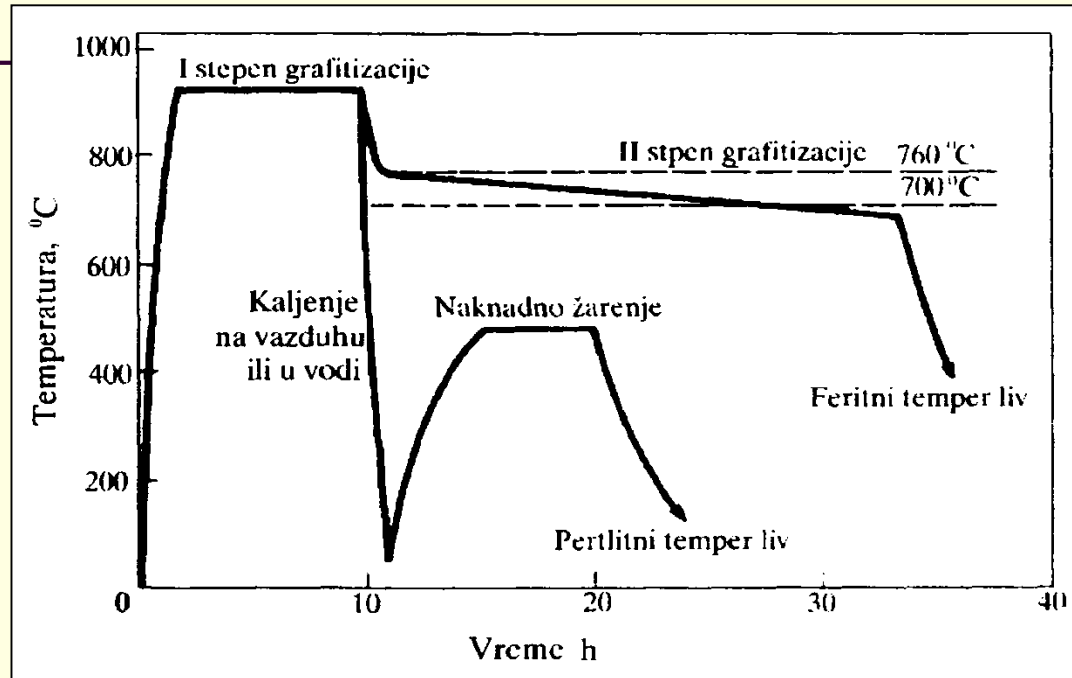


Temper liv



- 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.

Dobijanje 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.

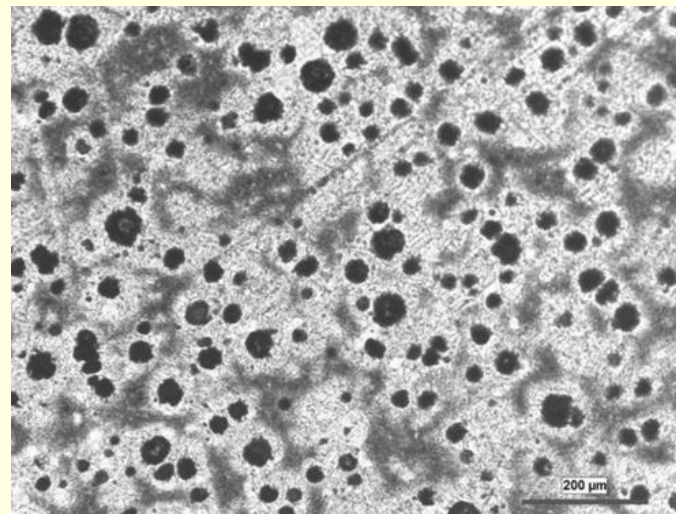
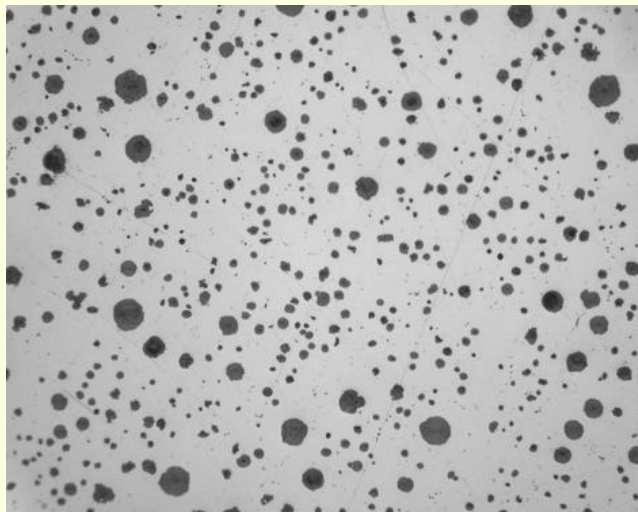
Temper liv

- 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 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.**

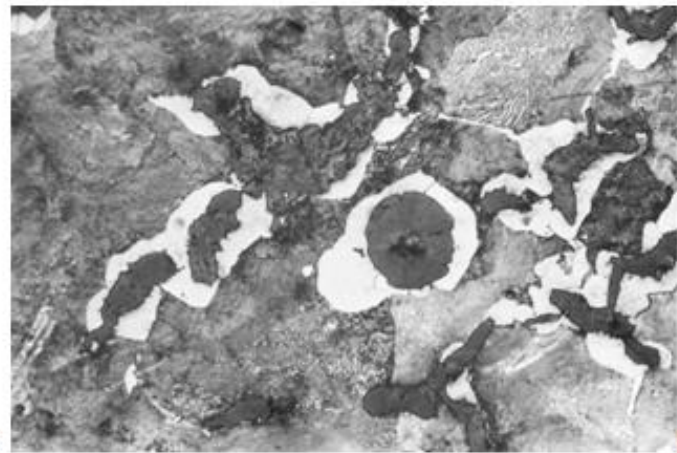


- Osobine: niska cena, dobra livljivost, čvrstoća i žilavost iznad sivog, temper i vermikularnog liva, dobro prigušuje vibracije
- *Može se **termički obrađivati** i tako se dobija **ADI materijal** (čvrstoća kao kod čelika za poboljšavanje, žilavost nešto manja, ali upola jeftiniji)*
- Primena nodularnog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



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.



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:

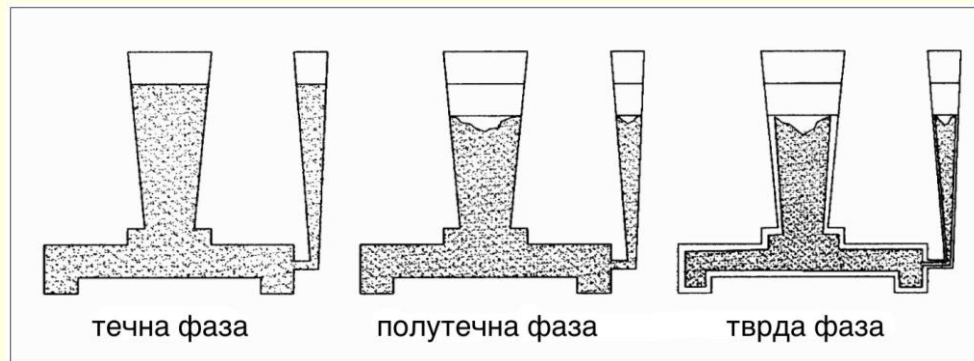
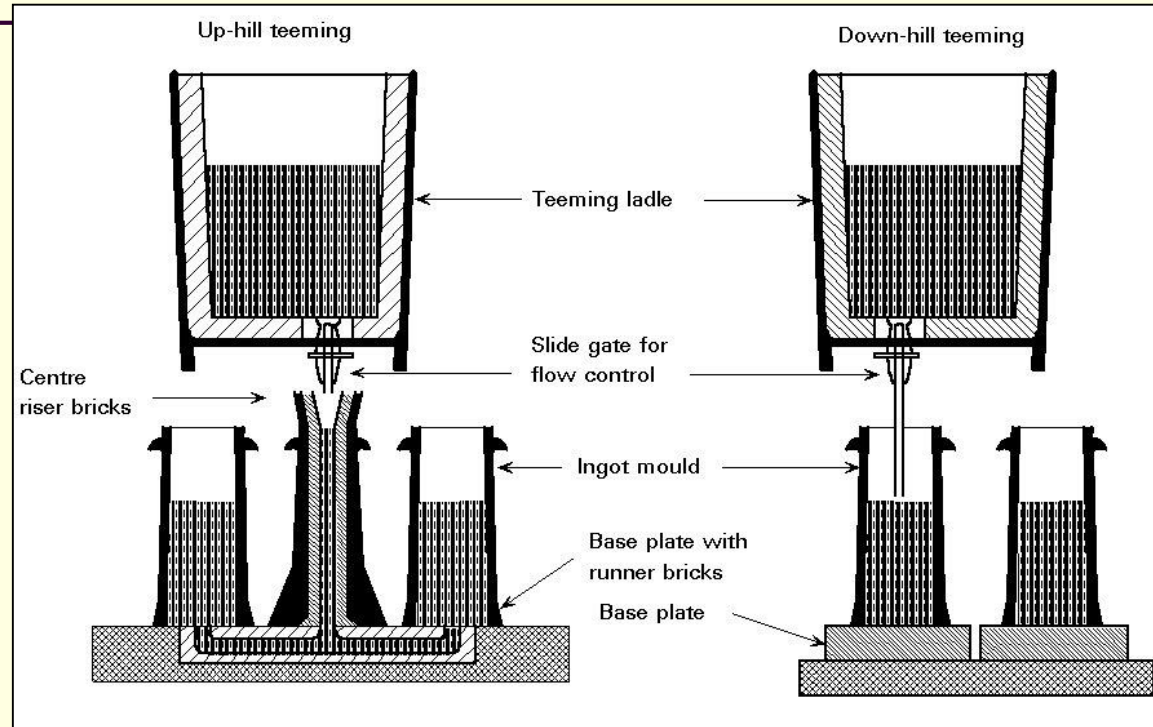
- **Otporne prema habanju** (legirani Cr, Mo, Mg, Ni i Si)
- **Koroziono postojane** (legirani Si i Cr)
- **Hemijski postojane** (legirani Ni, Mn, Cu, Si i Cr)
- **Vatrootporne** (legirani Cr, Ni, Si i Al)
- Sa posebnim fizičkim svojstvima (legirani Ni, Cu, Cr i Si)
- Legirani livovi imaju dobra svojstva, ali im je cena visoka.

Čelici

- 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
- Dobijanje čelika se svodi na rafinaciju gvožđa dobijenog u visokoj peći i dodavanju ferolegura.
- Rastopljeno gvožđe prerađuje se u čelike u:
 - Simens-Martenovoj pećima (plameni postupak),
 - Elektro pećima (pretapanjem), ili
 - Besemerovom ili Tomasovom konvertoru
- **Čelik se lije u odgovarajuće kalupe**
- **Čelični odlivak može da bude finalni proizvod** (bez dalje termomehaničke obrade) - na taj način se izrađuju proizvodi složene geometrije

Livenje ingota

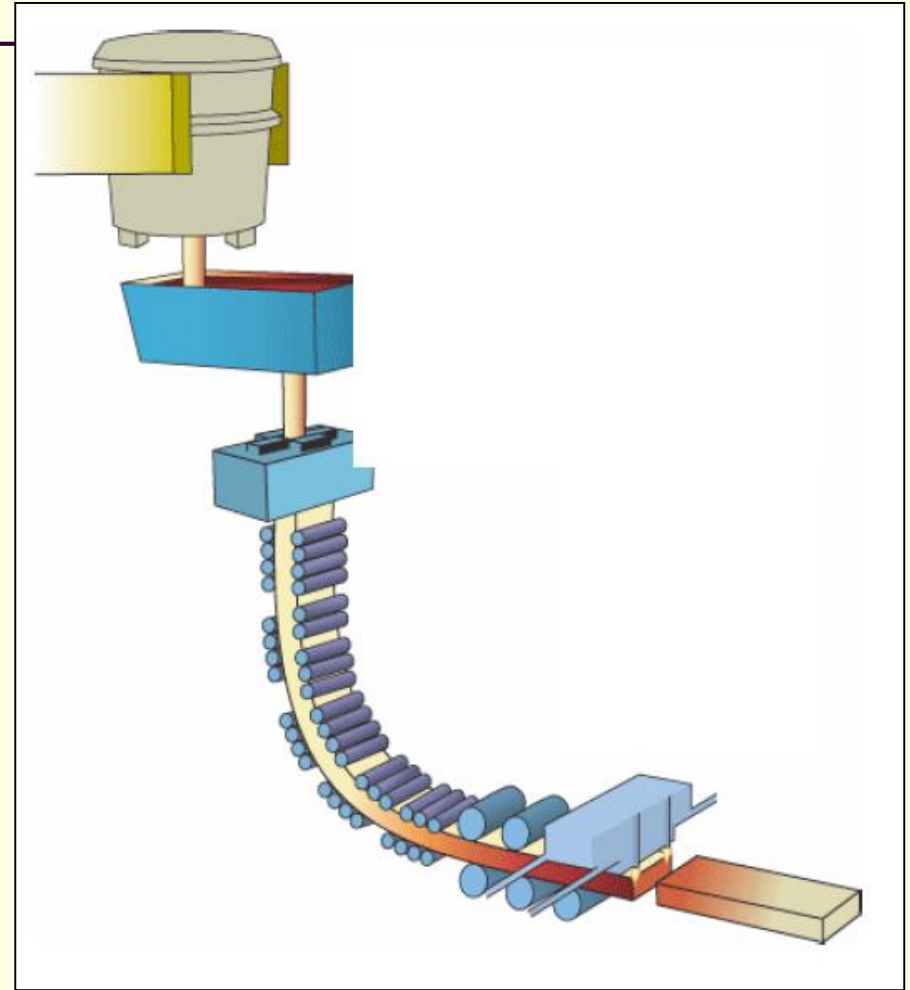
Naredna faza u dobijanju čelika je livenje u metalne kalupe (*kokile*) - gde tečni metal očvršćava u ingote



Livenje ingota i proces skupljanja materijala tokom očvršćavanja

Kontinualno livenje

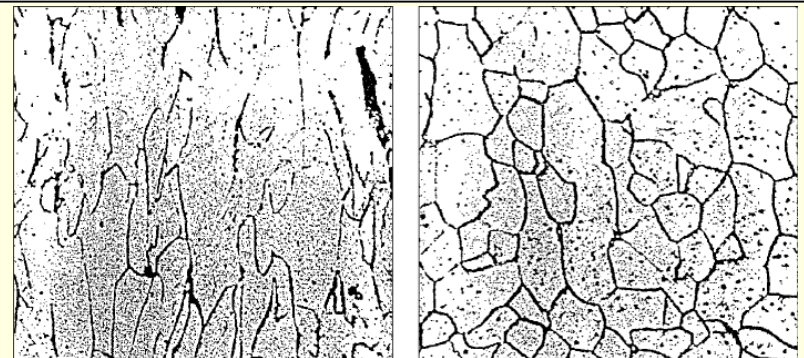
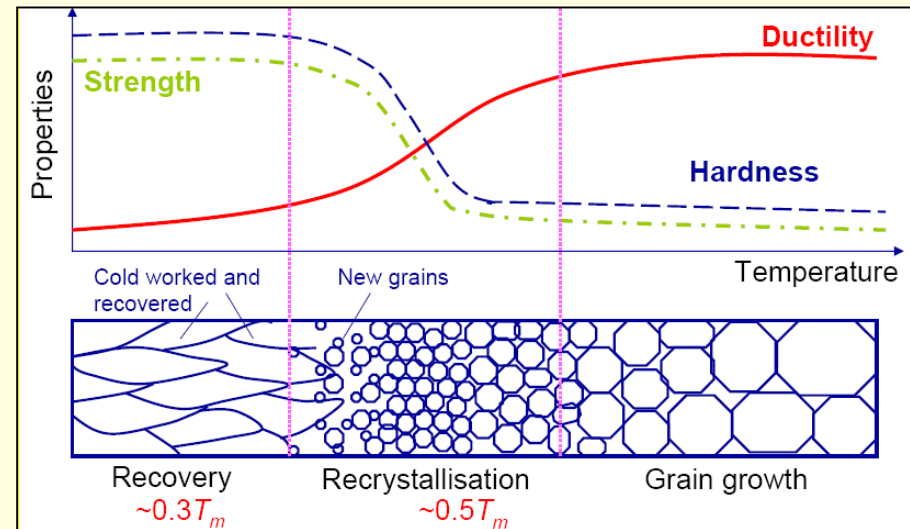
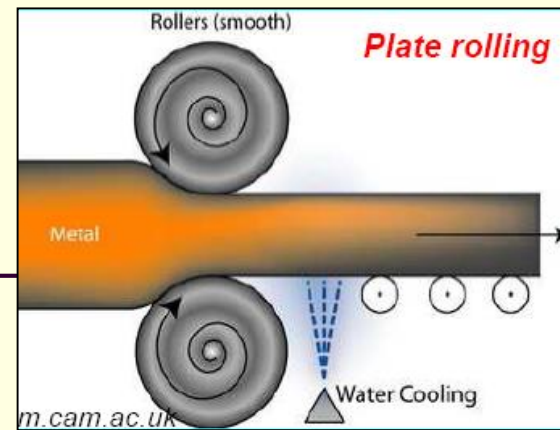
- Tradicionalni način livenja ingota se sve više zamenjuje kontinualnim livenjem.
- Kod kontinualnog livenja se smanjuje verovatnoća dobijanja lunkera a povećava se mogućnosti pojave uključaka.



Kontinualno livenje

Nakon toga odlivak ide na hladno/toplo valjanje itd.

- Proizvodi od valjanog čelika proizvoljne dužine mogu da budu proizvedeni:
 - šipke - izvlačenjem, kovanjem ili valjanjem;
 - žice - izvlačenjem ili valjanjem;
 - čelični profili – valjanjem ili izvlačenjem.
- Različiti profili mogu da budu tipa T, I, U, kao i šine itd.



Promena mehaničkih osobina sa temperaturom valjanja

Mikrostruktura pre i posle rekristalizacije

Podela čelika

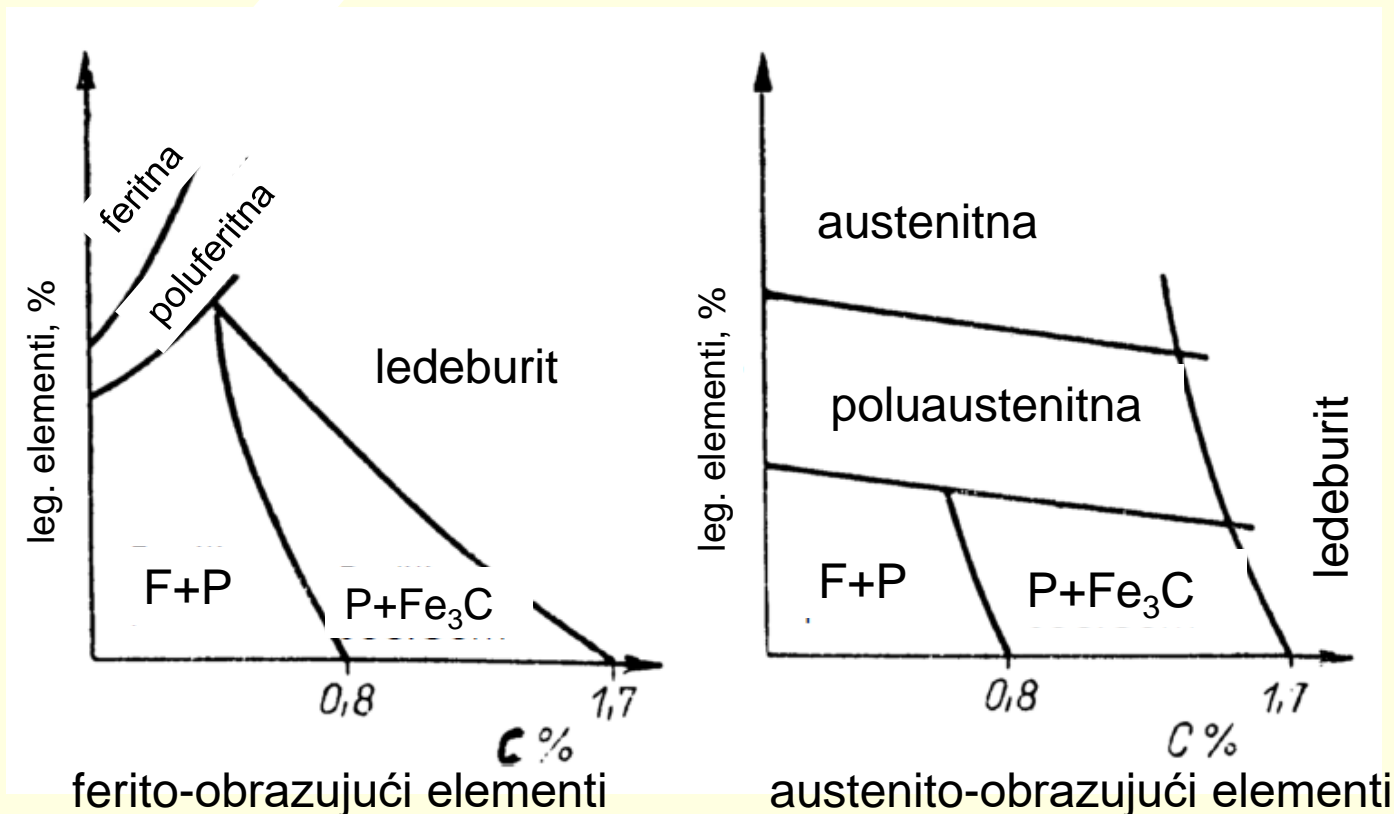
- Čelici mogu da se podele prema:
 - *hemijskom sastavu,*
 - *nameni,*
 - *strukturi,*
 - *načinu dobijanja,*
 - *kvalitetu,*
 - *obliku i stanju poluproizvoda.*
- **Prema hemijskom sastavu** čelici se dele na:
 - *ugljenične čelike,*
 - *legirane čelike.*

Podela čelika

- **Prema nameni** čelici se dele na:
 - konstrukcione čelike,
 - alatne čelike,
 - čelike sa posebnim svojstvima.
- **Prema strukturi** čelici se dele na:
 - feritne,
 - podeutektoidne,
 - eutektoidne,
 - nadeutektoidne,
 - ledeburitne,
 - austenitne i
 - martenzitne.

Sa prošlog časa: Uticaj legirajućih elemenata na mikrostrukturu čelika

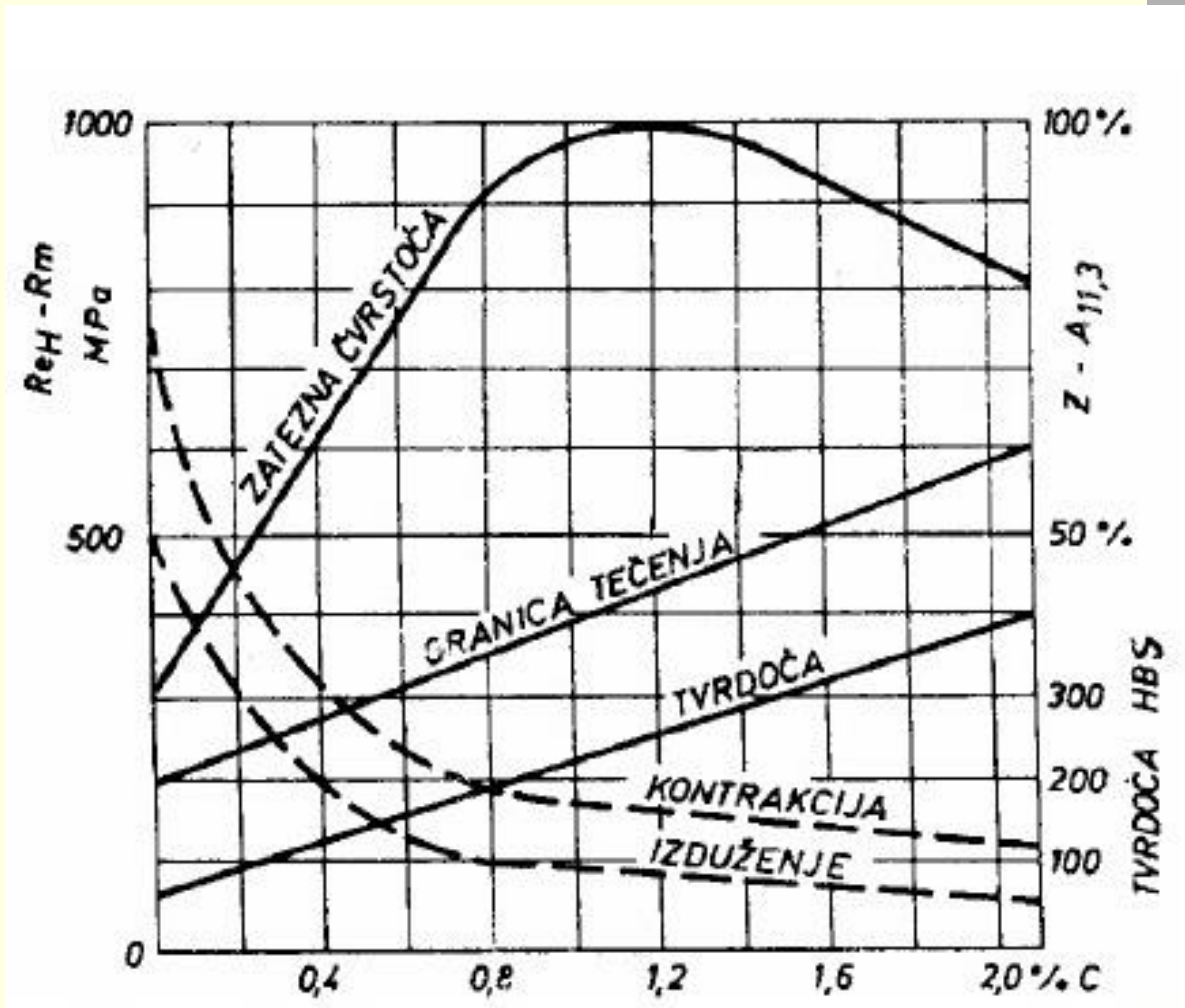
Ferito i austenito-obrazujući elementi utiču na finalnu mikrostrukturu (tako se javlja i struktura **ledeburita** u alatnim čelicima)



Ugljenični čelici

- *Ugljenični čelici* su legure železa i ugljenika (sa sadržajem C do 2,0%), u kojima su prisutne primese. Na ugljenične čelike otpada 90% svetske proizvodnje čelika, pa oni predstavljaju osnovni materijal u mašinskoj industriji.
- Prema sadržaju ugljenika, ovi čelici se dele na:
 - *niskougljenične* do **0,25% C**,
 - *srednjeugljenične* od **0,25% do 0,6% C**,
 - *viskokougljenične* preko **0,6% C**.
- Prema nameni, ugljenični čelici se dele na:
 - *konstrukcione*, do **0,6% C** i
 - *alatne*, preko **0,6% C**.

Uticaj %C na mehanička svojstva ugljeničnih čelika



Legirajući elementi u čeliku

- ❑ Legirani čelici osim ugljenika (i primesa) sadrže i druge legirajuće elemente, koji se dodaju radi poboljšanja zahtevanih svojstva. Legirani čelici se dele prema broju, sadržaju i vrsti legirajućih elemenata.
- ❑ **Prema broju** legirajućih elemenata, čelici se dele na jednostruko i višestruko legirane.
- ❑ **Prema ukupnom sadržaju** legirajućih elemenata, čelici se dele na:
 - ❑ *nisko legirane* – do 5% legirajućih elemenata i
 - ❑ *visoko legirane* – više od 5% legirajućih elemenata.

Tabela 6.1. Minimalni sadržaj legirajućih elemenata u čelicima

element	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	Co	Ti	Cu	Al
min. sadržaj (%)	0,60	0,80	0,30	0,30	0,10	0,08	0,01	0,10	0,05	0,4	0,10

Legirajući elementi u čeliku

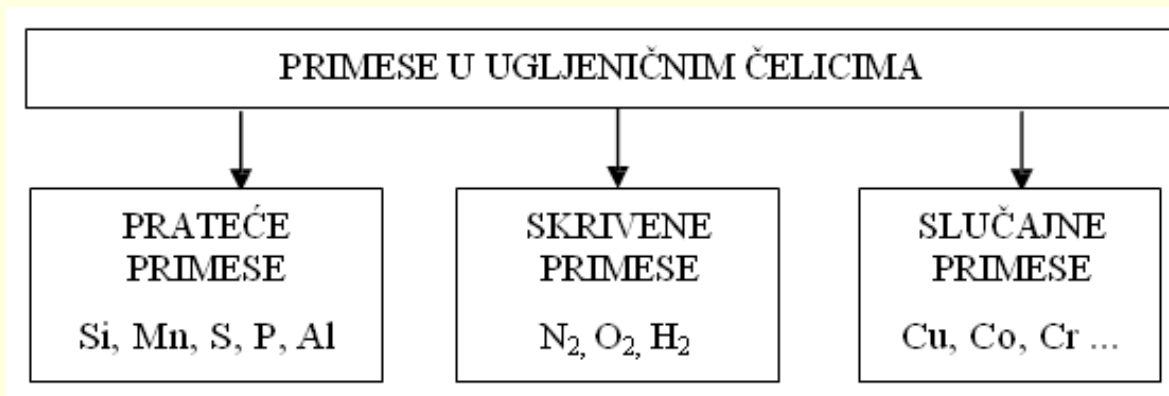
Legirajući elementi u čeliku mogu da:

- se rastvaraju u α i γ -železu, gradeći **čvrste rastvore**;
- grade sopstvene **karbide** ili se **rastvaraju u cementitu**;
- grade **intermetalna jedinjenja** ili jedinjenja sa nemetalima i
- budu u elementarnom obliku.

Element	Čvrst rastvor	Legirani cementit	Karbid	Jedinjenje	Element. stanje
Nikl	Ni			Ni ₃ Al	
Silicijum	Si			SiO ₂ M _x O _y	
Mangan	Mn	(Fe, Mn) ₃ C		MnS; MnOSiO ₂	
Hrom	Cr	(Fe, Cr) ₃ C	Cr ₇ C ₃ ; Cr ₂₃ C ₆		
Molibden	Mo		Mo ₂ C		
Volfram	W		W ₂ C		
Vanadijum	V		VC		
Titan	Ti		TiC		
Niobijum	Nb		NbC		
Aluminijum	Al			Al ₂ O ₃ ; AlN	
Olovo					Pb

Primeze u ugljeničnim čelicima

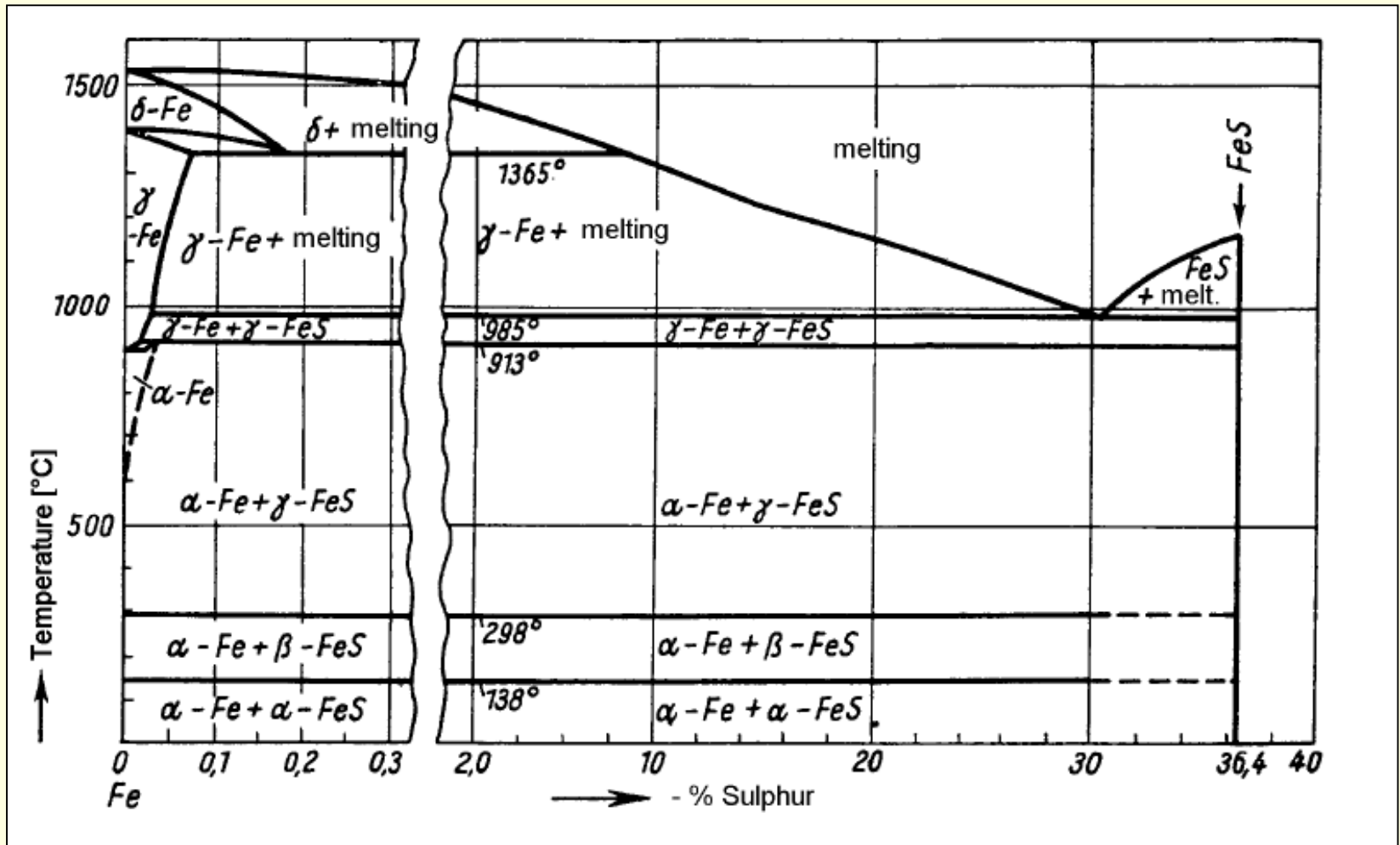
- **Prateće primeze** - iz rude železa (Mn, Si, P), iz goriva (S) i od sredstava za dezoksidaciju (Mn, Al i Si).
- **Skrivene primeze** u čeliku (N_2 , O_2 , H_2) rastvaraju se iz atmosfere.
- **Slučajne primeze** u čeliku (Cu, Pb, Sn, Sb i As) potiču iz polazne sirovine - rude, a njihova pojava i sadržaj vezani su za vrstu rude. ima ih u čeliku u sadržaju manjem od minimalno propisanog



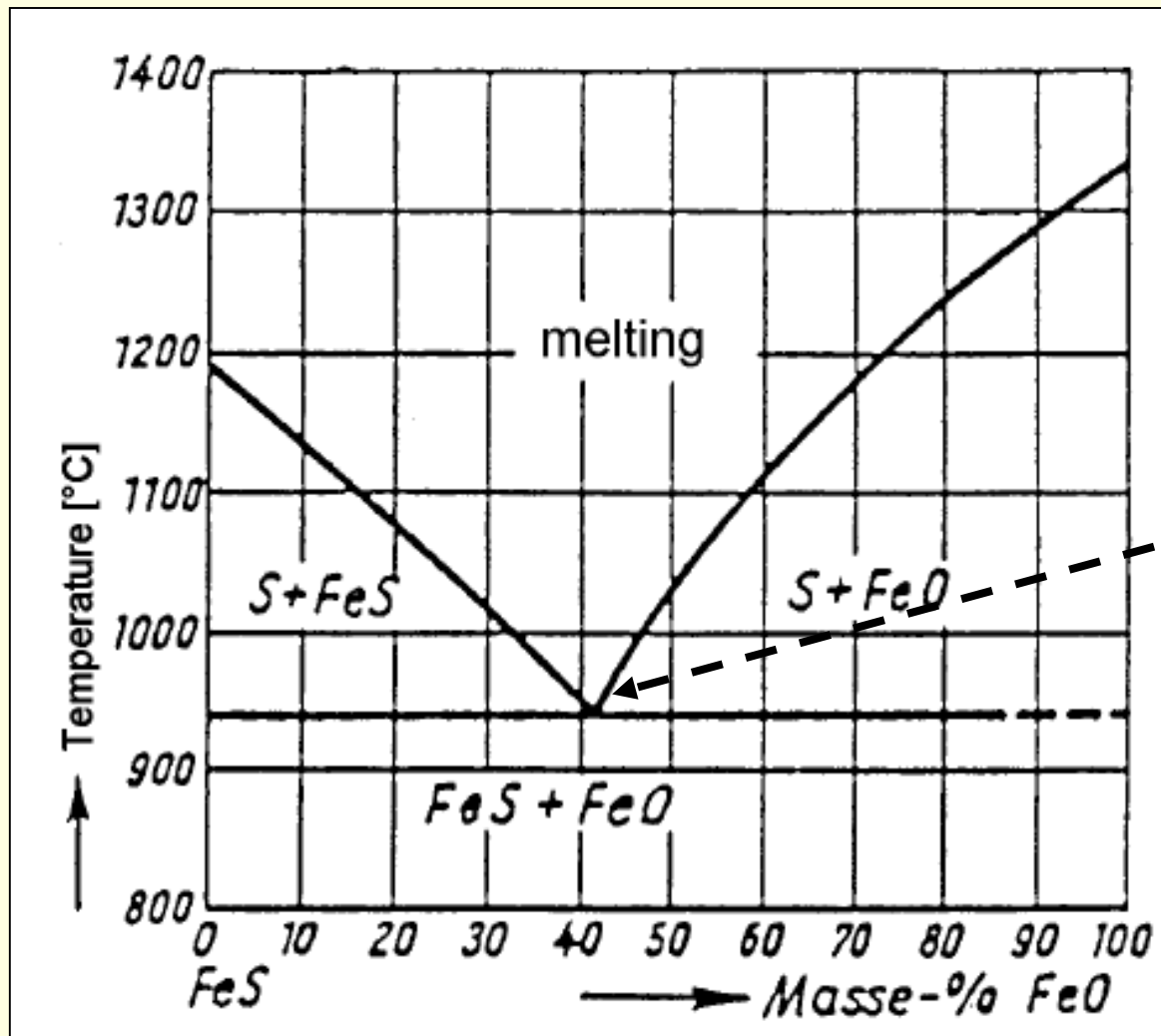
Sumpor S

- S ima malu rastvorljivost u čelicima i može da se smatra nerastvorljivim
- Sa Fe i O stvara niskotopive eutektikume koji su odgovorni za stvaranje toplih prslina (preko 950°C)
- na T oko 800°C izaziva tzv crveni lom
- S se izdvaja kod neumirenih čelika u sredini odlivka
- S otežava/onemogućava zavarljivost.
- Kod konstrukcionih čelika max dozvoljena granica se stalno smanjuje (bila je 0.04%)
- Kod kvalitetnijih čelika ona ide ispod 0.01%S
- S se vezuje sa Mn u MnS koji je deformabilan i izdužuje se kod valjanja

Dijagram stanja Fe-S - niskotopivi eutektikum



Dijagram stanja FeS-FeO – još jedan niskotopivi eutektikum

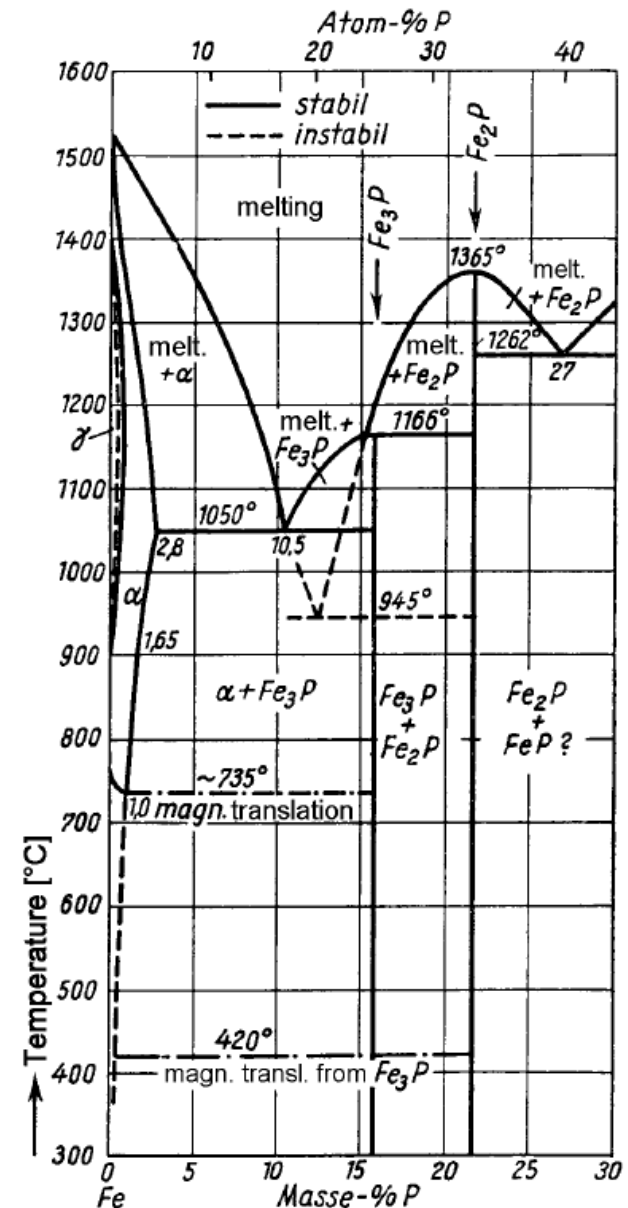


niskotopivi
eutektikum

Fosfor P

Fe-P

- P se rastvara u čelicima u malim količinama
- U većoj količini se izdvaja kao Fe_3P – plavi lom
- Smanjuje žilavost, zavarljivost, prelaznu temperaturu
- Čelici sa preko 0.6% P nisu zavarljivi
- Granice za konstrukcione čelike 0.01 % -0.035 %P i sve niže!



- sadržaj Si u čeliku daje informaciju o njegovoj dezoksidaciji
- čelici sa manje 0.1%Si su neumireni - segregacije
- Čelici koji sadrže preko 0.6%Si su krti i nisu pogodni za zavarivanje

- Mn ima veliki uticaj na čvrstoću i žilavost
- min 0.2%Mn da bi vezao S u MnS i obezbedio žilavost
- Uobičajeni sadržaj je 0.4 - 0.6 % Mn.
- Dezoksidator – čelici sa preko 0.6 %Mn se mogu smatrati umirenim
- Kod finoizranih čelika sadržaj Mn 1.0-1.6 %.
- Mn utiče na zavarljivost
- Čelici sa većim Mn sadržajem se ne koriste zbog loše žilavosti izuzev ako nisu Mn austenitni čelici

O

- Kiseonik se rastvara u čelicima do sadržaja od 0.003 %, i izaziva krtost
- U sadržaju većem od 0.007 % je prisutan u uključcima.
- Dezoksidacija sa Si, Al ili Mn

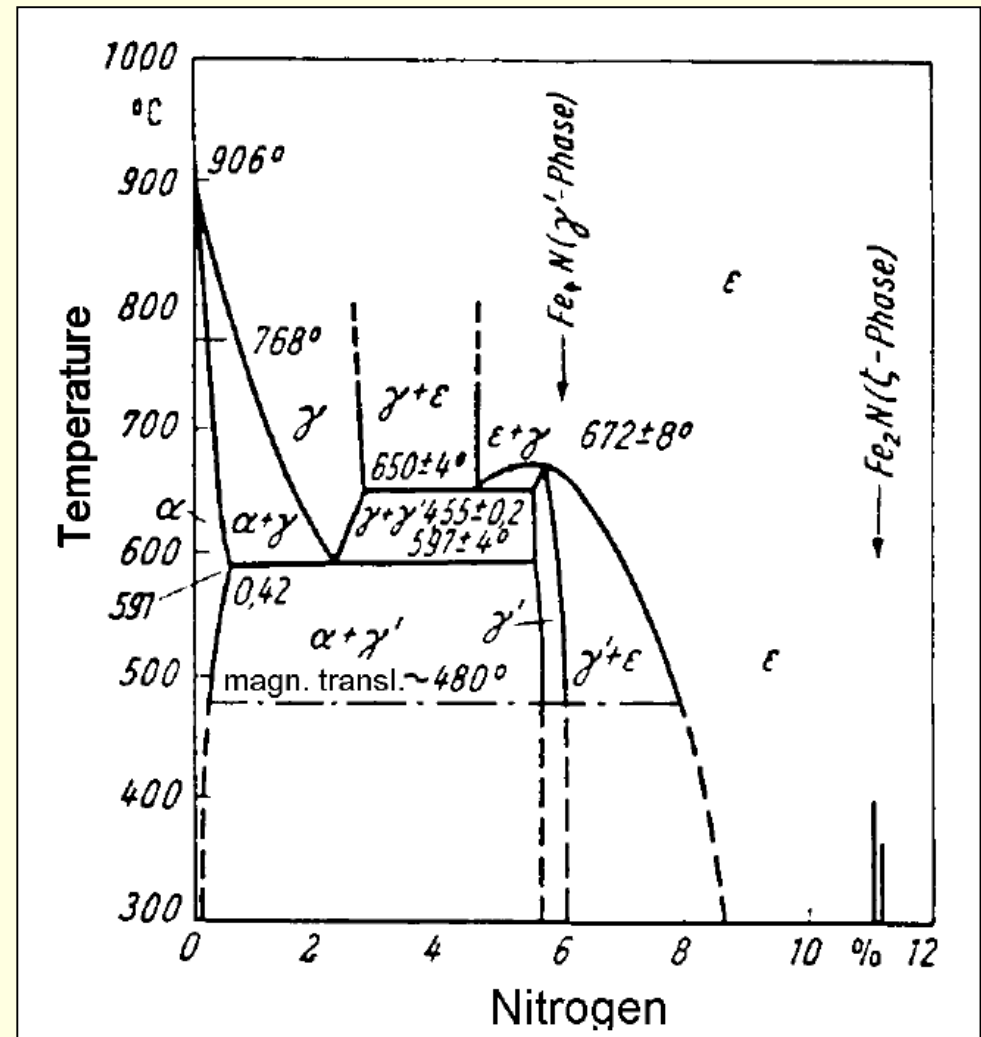
H

- Vodonik dovodi do pojave krtosti
- Rastvorljiv u čelicima do 0.0004 ml/100g na sobnoj T
- Ima veću rastvorljivost u martenzitu

Azot N

Fe-N dijagram

- Rastvara se u čelicima
- Dovodi do starenja ali i do stvaranja nitrida koji su stabilniji od karbida
- Ograničen sadržaj na manje od 0.01 % ili uz legiranje Al, Nb i V može i nešto viši sadržaj



ALATNI ČELICI

- Alatnim čelicima nazivaju se **ugljenični i legirani čelici**, koji imaju **visoku tvrdoću i otpornost prema habanju**, a upotrebljavaju se za izradu različitog alata
- Pored dobrih mehaničkih svojstava čelici za alate moraju da imaju i druga važna svojstva, kao što su:
 - dobra **toplotna postojanost**,
 - **otpornost prema razugljeničenju površinskog sloja i oksidaciji**, jer ove pojave smanjuju čvrstoću, tvrdoću i otpornost prema habanju;
 - odgovarajuća **toplotna provodljivost**, da bi se sprečilo pregrevanje, a time i smanjenje tvrdoće;
 - mali koeficijent linearnog širenja na temperaturama kojima je alat izložen u toku rada, tj. **dimenziona postojanost**;
 - dobra obrada brušenjem- za alate za merne instrumente.

Alatni čelici

Zahtevi:

- visoka tvrdoća i otpornost na habanje
- visoka čvrstoća i žilavost
- toplotna postojanost

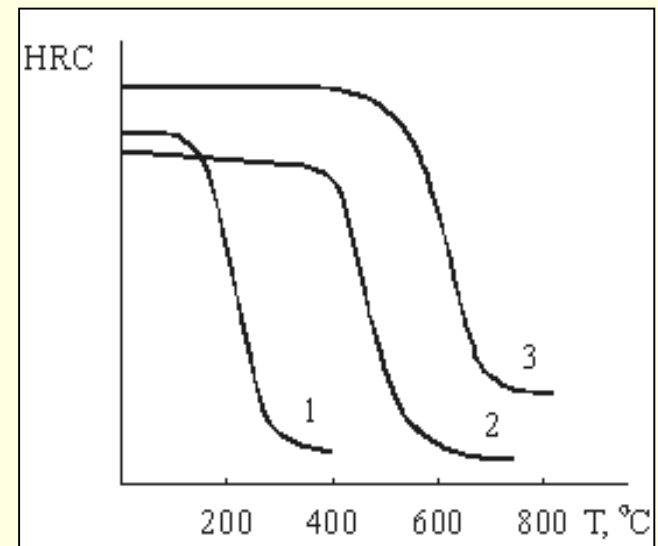
Alatni čelici se dele na:

- ugljenične alatne čelike (C = 0,6-1,4%)
- legirane alatne čelike (C = 0,4-1,6%)

Prema legirani alatni čelici se dele na:

- **1)** za obradu na hladno ($\rightarrow 200-250^{\circ}\text{C}$)
- **2)** polu toplotno postojane ($\rightarrow 300\dots 500^{\circ}\text{C}$)
 - za hladnu deformaciju
 - za toplu deformaciju
- **3)** toplotno postojane ($\rightarrow 500\dots 750^{\circ}\text{C}$)
 - visoka tvrdoća posle otpuštanja dobijena **karbidima**,
 - visoka tvrdoća posle otpuštanja dobijena **intermetalnim** jedinjenjima

Namena alatnih čelika zavisi od tvrdoće/čvrstoće na povišenim temperaturama



Ugljenični alatni čelici

- Ugljenični alatni čelici sadrže **0,6 – 1,4% C**.
- Karakteristična su im sledeća svojstva:
 - **visoka tvrdoća** (60 – 64 HRC),
 - **dobra otpornost na habanje** do 150°C - zbog toga se od ugljeničnih alatnih čelika ne izrađuje rezni alat za veće brzine rezanja gde ima zagrevanja
 - **imaju relativno dobru žilavost** - za izradu alata izloženog jačim **udarnim** opterećenjima.
 - od ugljeničnih alatnih čelika može se izrađivati alat jednostavnog oblika i manjih dimenzija.

Legirani alatni čelici

■ Legirani alatni čelici za rad u hladnom stanju

- Namijenjeni za oblikovanje i mehaničku obradu **do 200°C**.
- Osnovni legirajući elementi - **Cr**, a po potrebi se dodaju Mo, W i V.
- Ovi čelici se primenjuju za alate za procesanje i probijanje, udarne alate, alate za presovanje i vučenje, delove drobilica, mlinova i bagera, alate za poljoprivredu i merne alate.

■ Legirani alatni čelici za rad u toplom stanju

- namenjeni za izradu alata za:
 - kovanje i presovanje šipki i cevi,
 - za livenje pod pritiskom,
 - za izradu valjaka, matica, zakovica i čepova.
- Osnovni legirajući elementi kod ove vrste čelika su **Cr, Mo i V**, a često se dodaje i **W**.

Brzorezni alatni čelici

- Brzorezni alatni čelici su - zadržavaju visoku tvrdoću i otpornost prema habanju na povišenim temperaturama (**500...750°C**) koje se pojavljuju na površinama alata pri rezanju velikim brzinama.
- Dozvoljavaju **2–4 puta veće brzine rezanja**, a **postojanost je 10–30 puta veća** od ugljeničnih čelika.
- Brzorezni čelici se dele na:
 - **Mo i Co** brzorezni čelici - visoka otpornost na habanje i relativno dobra žilavost. Koriste se za izradu alata izloženih udarima u toku rada (noževi i glodači za grubu obradu, spiralne burgije).
 - **W** brzorezni čelici - za visoko opterećene alate pri velikim brzinama rezanja i za grubu obradu pod najtežim uslovima.

Brzorezni alatni čelici TO

1) tokom TO stvaraju **karbide** tokom otpuštanja na (500...650°C)

- W (18 or 9%) + Mo, V, Co
- TO: Austenitizacija (1200...1300°C)+3x otpuštanje (570...650°C) → 64...65 HRC

2) tokom TO stvaraju **intermetalike** tokom otpuštanja na (650...750°C)

- 0,1-0,3% C, 20-25% Co, 11-20% W, 7% Mo
- Co, W, Mo → Co_7W_6 ; $(\text{Co,Fe})_7\text{W}_6$ itd.
- TO: Austenitizacija (1200...1300°C) → 68 HRC
Otpuštanje (700...720°C) → 60 HRC

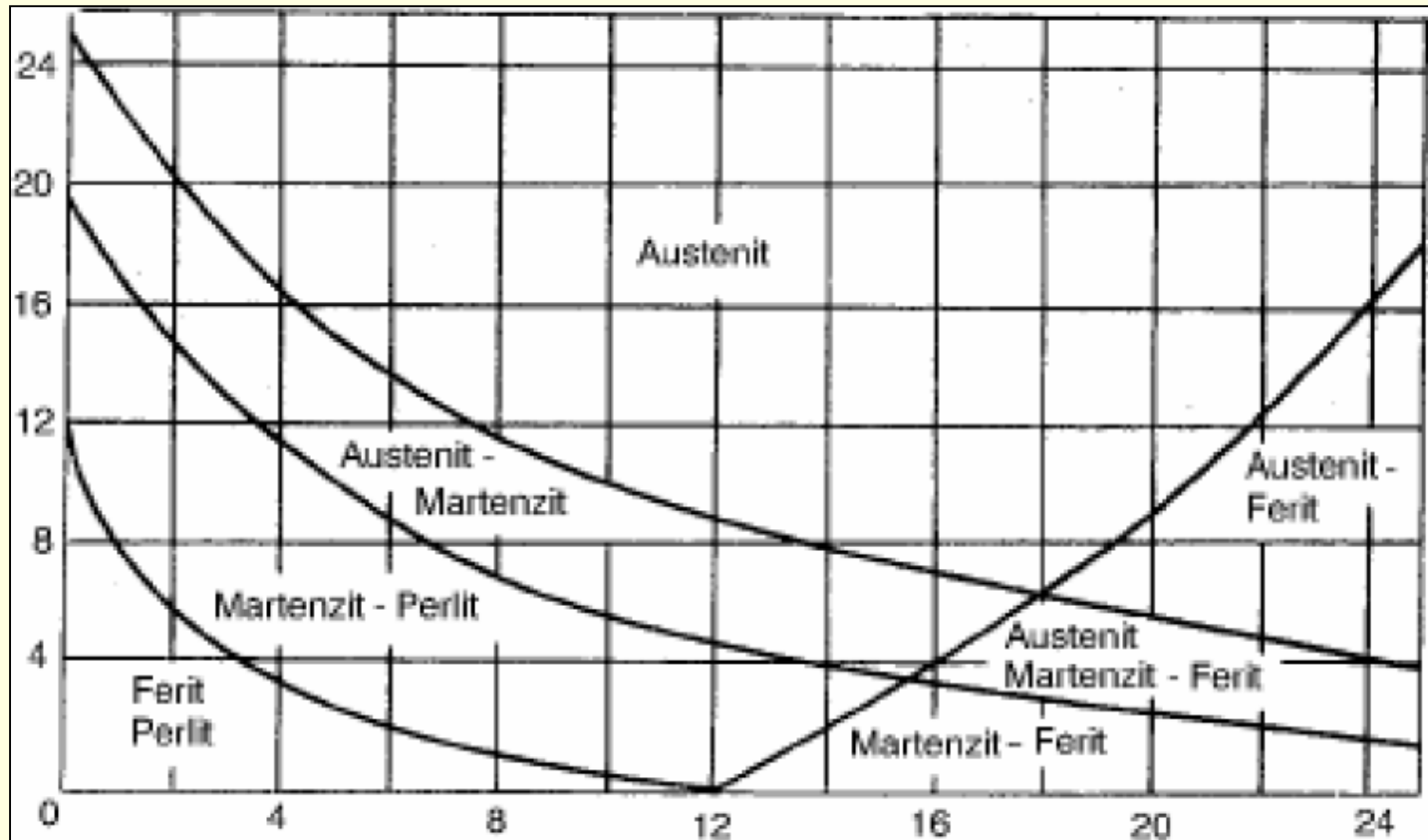
Visokolegirani nerđajući čelici

- Prvi put je uočeno 1892 god da su čelici legirani Cr otporni na kiseline
- 1912 Krupp je prvi istraživao Cr-Ni čelike i u to vreme je započela njihova proizvodnja
- Prvi dupleks čelici - 1930
- Masovna proizvodnja – posle II svetskog rata
- Visok kvalitet posle otkrića procesa uklanjanja ugljenika pri dobijanju čelika (O2 Ar - AOD)
- Najveće dostignuće novijeg datuma je uvođenje N kao legirajućeg elementa

Visokolegirani nerđajući čelici

- Postoji vrlo veliki broj tipova nerđajućih čelika za različite namene, tako da je nađeno kompromisno rešenje da se izvrši podela prema mikrostrukturi na sobnoj T na:
 - Feritne čelike
 - Martenzitne i čestično ojačane čelike
 - Dupleks (feritno austenitne) čelike
 - Austenitne čelike

Podela nerđajućih čelika prema mikrostrukturi



Maurerov dijagram za CrNi čelike

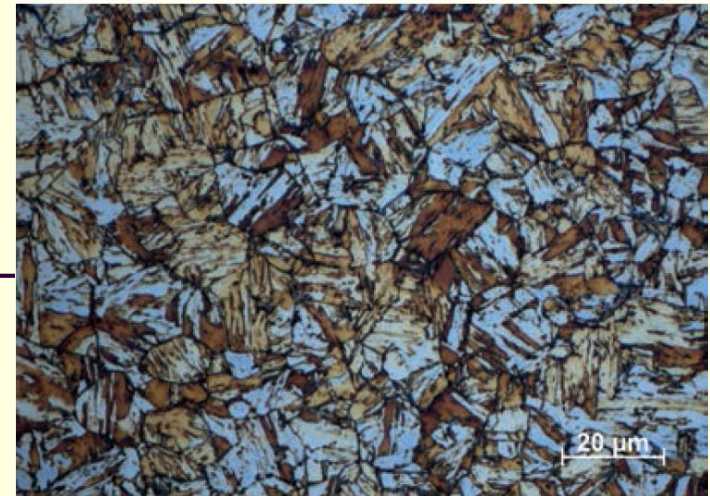
Feritni nerđajući čelici



- Sadrže **Cr 12-30% i 0,02-0,12%C**
- Vrlo mali sadržaj Ni
- Ne ojačavaju termičkom obradom
- Mo se dodaje da se podigne otpornost na koroziju
- Feritni čelici ili Cr čelici su magnetični
- Feritni čelici za povišene temperature (800-1150°C) sadrže nešto više C, a dodaju im se i Al i Si da bi im porasla otpornost na oksidaciju
- Feritni čelici za povišene temperature koriste se za atmosfere koje sadrže S (koji reaguje sa Ni) i kada su u pitanju mali radni naponi

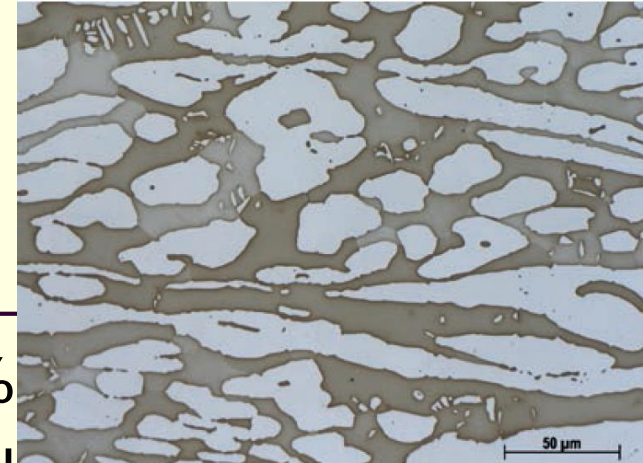
Martenzitni nerđajući čelici

- Najmanja grupa nerđajućih čelika
- Visok sadržaj C – 0,2-1,2%
- Visok sadržaj Cr – 12-18%
- Dodaje se i N za dodatno ojačavanje
- Vrlo mali sadržaj Ni (ako se doda može da se smanji sadržaj C i popravi zavarljivost) i Mo
- Čestično ojačavanje
- Svi su magnetični



Dupleks nerđajući čelici

- Feritno austenitna struktura (50% : 50%)
- Imaju osobine i austenitnih i feritnih čelika
- Visoka čvrstoća
- Visoka otpornost na rast prslina
- Nizak sadržaj **C (0,03-0,05%)**, **sadržaj Cr (21-28%)**
- Nizak sadržaj Ni 3,5-7%
- Dodaje se i **N** za dodatno ojačavanje
- Dodaje se Mo (0.3-4%) za povećanje otpornosti na koroziju
- Nekim klasama čelika se dodaje Mn umesto Ni (povećava rastvorljivost N)
- Magnetični su zbog ferita



tamno – ferit
svetlo - austenit

Austenitni nerđajući čelici

- Najveća grupa nerđajućih čelika koja uobičajeno sadrži 0,01-0,12%C, **17-36%Cr i 5-32%Ni**
- Dele se na:
 - Cr-Mn
 - Cr-Ni
 - Cr-Ni-Mo
 - sa visokim performansama
 - za visoke T
- Dobra čvrstoća
- Dobra zavarljivost
- Dobra žilavost (posebno na niskim T)
- Nemagnetični su posle rastvarajućeg žarenja

Austenitni nerđajući čelici

■ Cr-Ni čelici

- Za opštu upotrebu (kao 18-8)
- Nekim se klasama dodaje N za ojačavanje ili S za bolju obradivost
- Postoje i stabilizovane klase kojima se dodaju Ti i Nb da bi formirali ojačavajuće čestice (i sprečili senzitizaciju)

■ Cr-Mn čelici

- **Manji sadržaj Ni (oko 4%) jer ga menja Mn, a kao γ stabilizator se dodaje i N**
- sadržaj **Cr oko 17%**
- imaju višu čvrstoću

Austenitni nerđajući čelici

- **Cr-Ni-Mo čelici**
- Sadržaj Cr oko **17%**
- Sadržaj Ni oko **10-13%**
- Sadržaj **Mo 2-3%**
- **otporni na kiseline**
- Nekim se klasama dodaje N za ojačavanje ili S za bolju obradivost
- Postoje i stabilizovane klase kojima se dodaju Ti i Nb da bi formirali ojačavajuće čestice (i sprečili senzitizaciju)
- **sa visokim performansama** (super austenitni)
- Sadržaj Cr oko 17-25%
- Sadržaj Ni oko 14-25%
- Sadržaj Mo 3-7%
- Legiraju se N i Cu (za otpornost na neke kiseline)

Austenitni nerđajući čelici

- **za povišene T**
- Sadržaj Cr oko **17-25%**
- Sadržaj Ni oko **8-20%**
- ne sadrže Mo
- Dodaje se **Si** da bi podigao otpornost na oksidaciju
- Legiraju se N da se dobije bolja otpornost na puzanje
- Koriste se za temperature $>550^{\circ}\text{C}$
- Otporni su na oksidaciju ($800-1150^{\circ}\text{C}$) u gasovitoj sredini
- Nisu specijalno otporni na koroziju u vodenoj sredini

Uticaj legirajućih elemenata

Legirajući element	Funkcija u materijalu
Mn	Na niskoj T stabilizuje austenit, a na povišenim ferit u austenitnim Cr-Ni. Može delimično ili potpuno da zameni nikel. Podiže rastvorljivost N
Si	Podiže postojanost prema oksidaciji. Suviše visoka koncentracija silicijuma povećava sklonost ka pojavi prslina na povišenim temperaturama. Stabilizuje ferit i podiže čvrstoću
Al	Podiže otpornost na oksidaciju. Kod legura koje se TO izdvajanjem taloga podiže čvrstoću
Mo	Doprinosi hemijskoj postojanosti čelika u nekim korozionim sredinama, na primer, u nekim kiselinama, ili sredinama zasićenim jonima Cl ⁺ . Proširuje feritnu oblast . Utiče na smanjenje sklonosti ka pojavi toplih prslina. Kod martenzitnih čelika podiže tvrdoću zbog izdvajanja karbida.

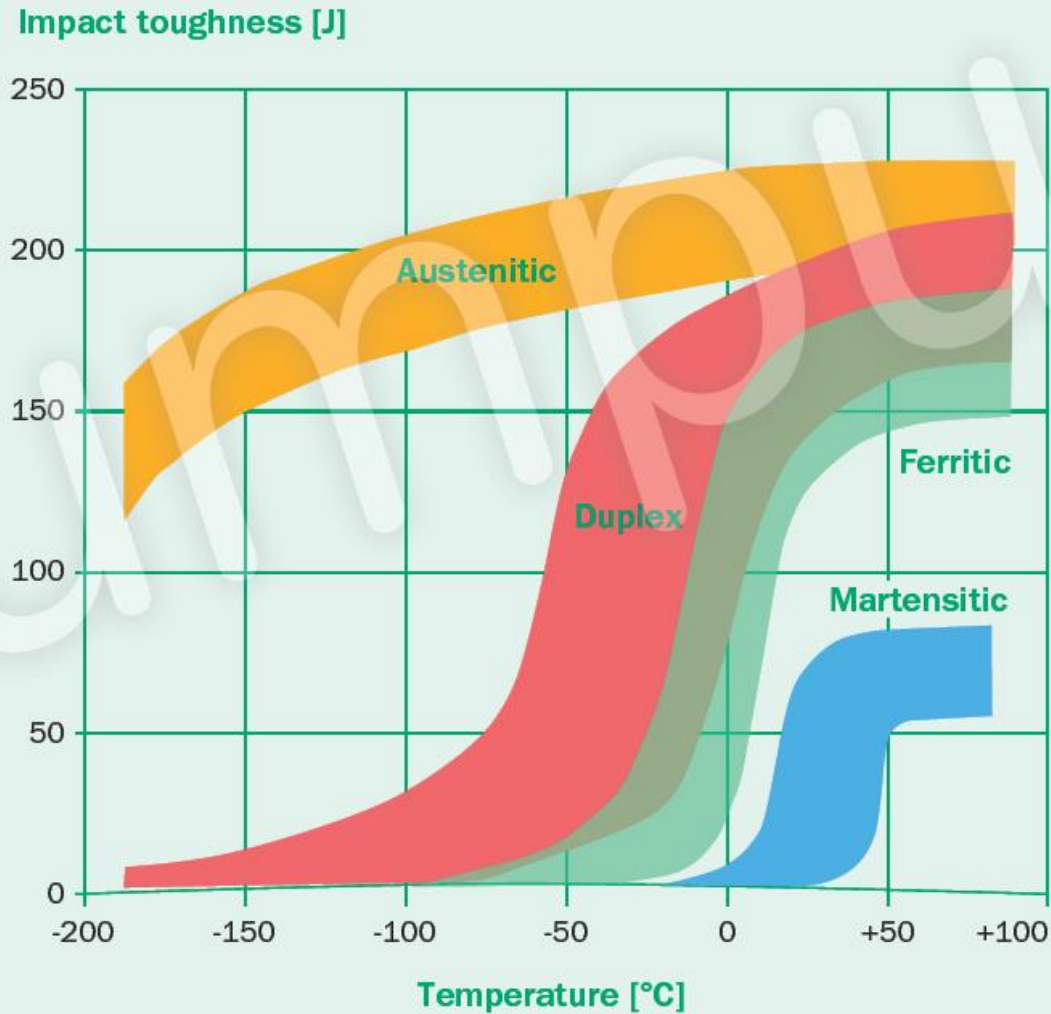
Uticaj legirajućih elemenata

Legirajući element	Funkcija u materijalu
W	Poboljšava mehaničke osobine pri visokim i niskim temperaturama
Ti	Obrazuje karbid titana i sprečavanje osiromašenja austenita hromom po granicama zrna (što se smatra osnovnim uzrokom interkristalne korozije). Sadržaj titana u austenitnim hrom-nikl čelicima je četiri puta veći od sadržaja ugljenika (0,4-0,5%). Značajno podiže čvrstoću.
Nb	Kao i titan obrazuje karbide i sprečava obrazovanje i izlučivanje karbida hroma. Dopušteni sadržaj niobijuma u čelicima je oko deset puta veći od sadržaja ugljenika.
N	Ima <u>snažno</u> dejstvo na proširenje γ područja i može potpuno ili delimično zameniti nikl u nerđajućim čelicima (1% azota ekvivalentan je 10% nikla)
Cu	Poboljšava hemijsku postojanost u nekim korozionim sredinama.

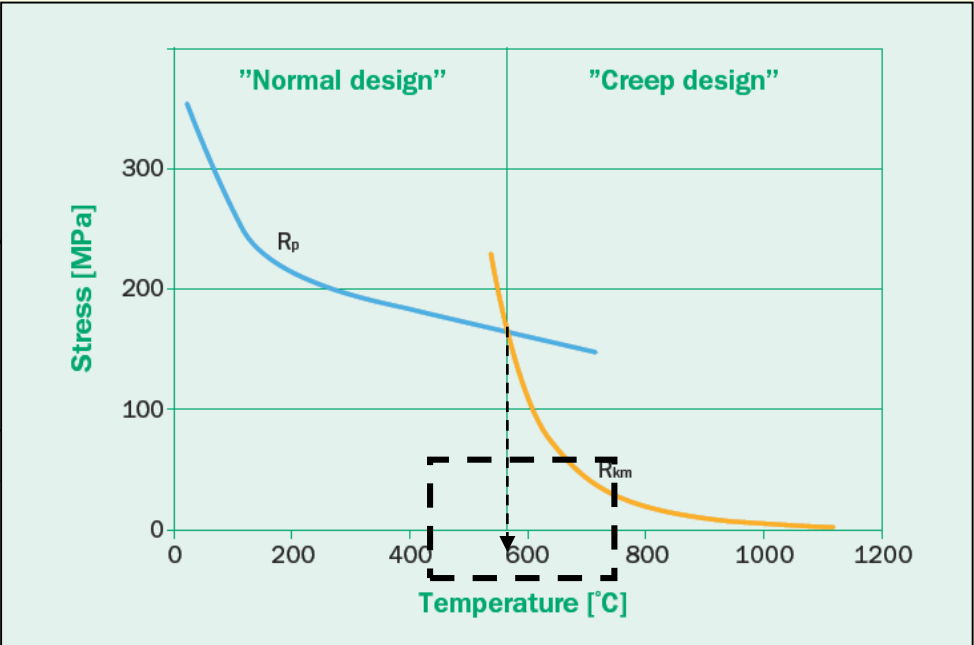
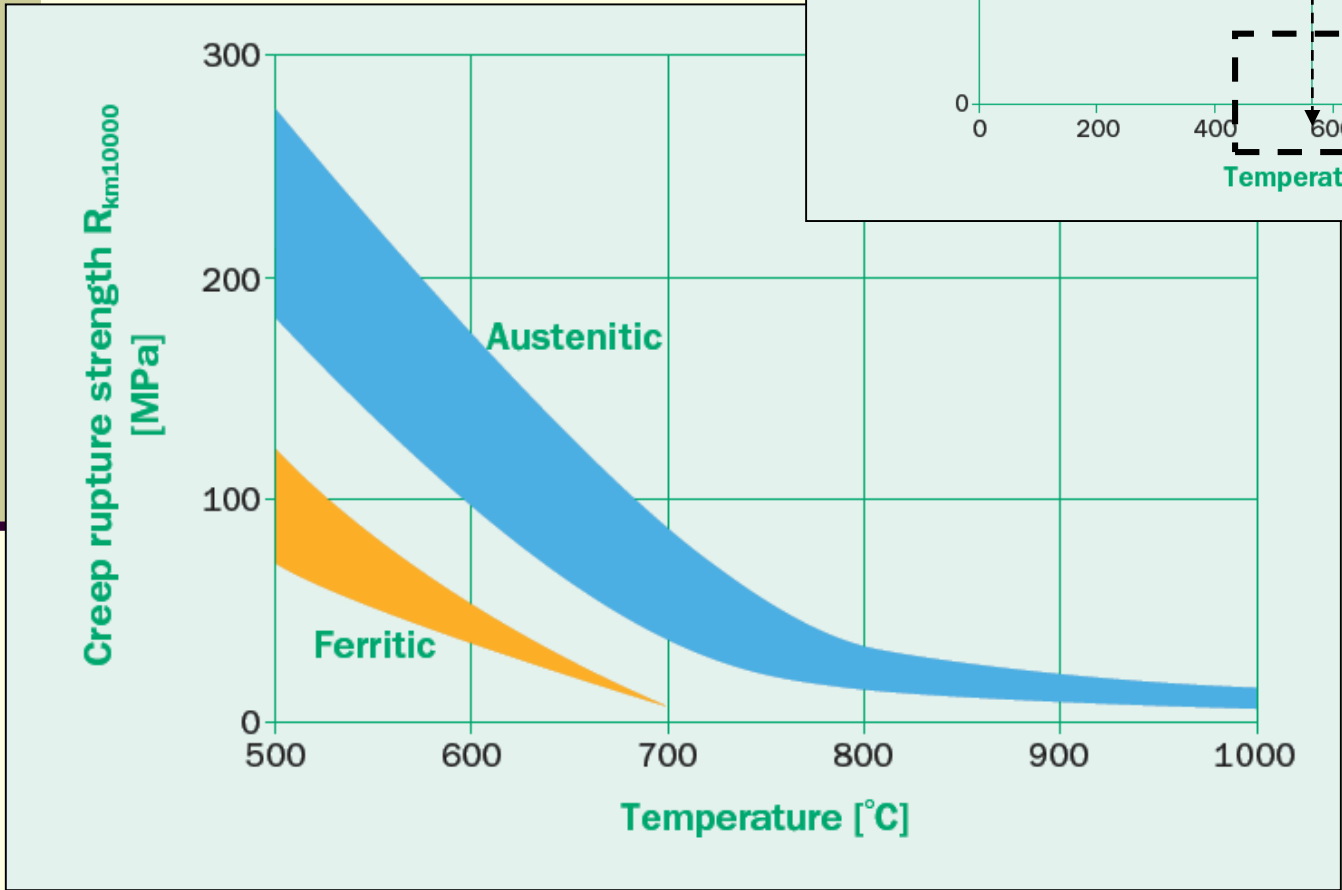
Osobine nerđajućih čelika

- **Električna provodnost**
 - manja od ugljeničnih čelika
- **Termička provodnost**
 - 40-50% manja od ugljeničnih čelika
- **T topljenja niža**
 - Ugljenični: 1480-1540 °C
 - Martenzitni: 1400-1530 °C
 - Feritni: 1400-1530 °C
 - Austenitni: 1370-1450 °C
- **Koeficijent linearnog širenja**
 - Veći od običnih ugljeničnih čelika
- **Čvrstoća**
 - Visoka na sobnoj i povišenim T
- **Stanje površine**
 - formira filmove
- **Gustina**
 - austenitni čelici imaju najveću gustinu 7.9-8.1g/cm³

Žilavost nerđajućih čelika



Otpornos na puzanje nerđajućih čelika



početak puzanja
na $T <$ od oko 600 °C

Toplotno postojani čelici

Grupe materijala za povišene temperature prema SRPS EN 12952

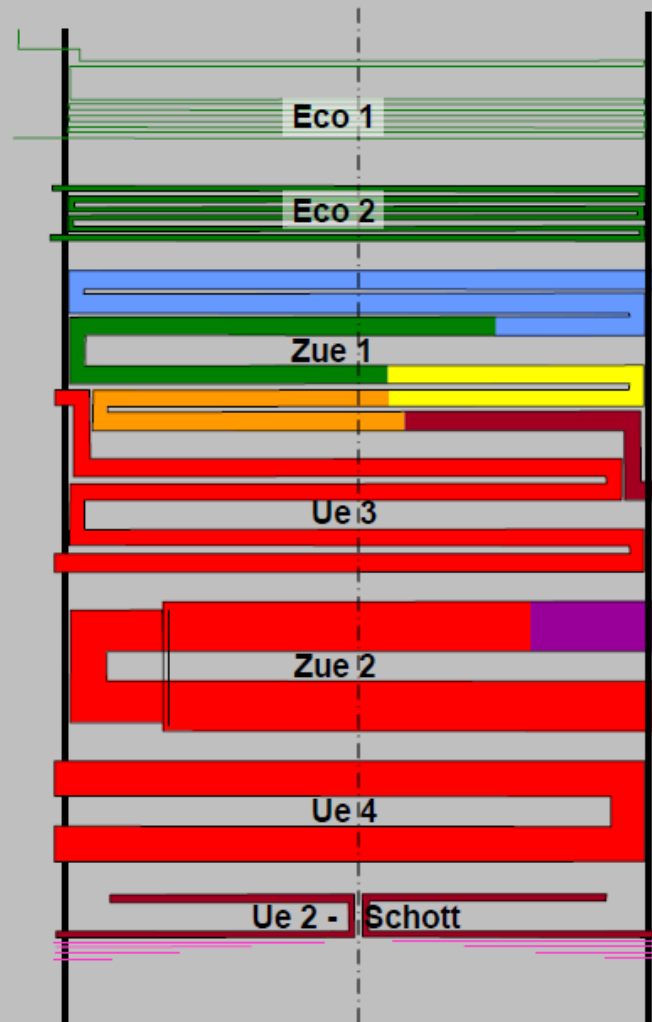
Materijal	Termička obrada	SRPS EN CEN ISO/TR 15608	Materijal	Termička obrada	Grupa TR ISO 15608
ploča i traka EN 10028-2			cev, šavna EN 10217-2		
P235GH	N	1.1	PH195	N	1.1
P265GH	N	1.1	PH235	N	1.1
P295GH	N	1.2	PH265	N	1.1
P355GH	N	1.2	16Mo3	N	1.1
16Mo3	N	1.1	otkovak EN 10222-2		
13CrMo4-5	NT	5.1	X16CrMo5 1	A	5.3
13CrMo4-5	NT Q	5.1	X16CrMo5 1	NT QT	5.3
13CrMo4-5	Q	5.1	X20CrMoV11-1	QT	6
10CrMo 9-10	NT	5.2	X10CrMoVNb9-1	NT	6
10CrMo 9-10	NT Q	5.2	14MoV6-3	NT QT	4.1
10CrMo 9-10	Q	5.2	11CrMo9-10	N	5.2
11CrMo 9-10	NT Q	5.2	11CrMo9-10	NT QT	5.2
11CrMo 9-10	Q	5.2	16Mo3	N	1.1
cev, bešavna EN 10216-2			16Mo3	QT	1.2
P195GH	N	1.1	16Mo3	QT	1.1
P235GH	N	1.1	13CrMo4-5	N NT QT	5.1
P265GH	N	1.1	13CrMo4-5	N NT QT	5.1
8MoB5-4	N	5.1			
16Mo3	N	1.2			
X11CrMo9-1+l	I	5.4			
X11CrMo9-1	NT	5.4			
X11CrMo5	I	5.3			
X11CrMo5	NT	5.3			
X11CrMo5+NT2	NT	5.3	NT normalizovano i otpušteno I izotermno žareno QT kaljeno i otpušteno N normalizovano Q kaljeno		
13CrMo4-5	NT	5.1			
10CrMo 9-10	NT	5.2			
11CrMo 9-10	QT	5.2			
X10CrMoVNb9-1	NT	6.4			
15NiCuMoNb5-6-4	NT	4.2			
X20CrMoV11-1	NT	6.4			
10CrMo5-5	NT	5.1			

Toplotno postojani čelici – svi čestično ojačani čelici

Precipitate	Structure	Parameter (Å)	Composition
NbC	fcc	a=4.47	NbC
NbN	fcc	a=4.40	NbN
TiC	fcc	a=4.33	TiC
TiN	fcc	a=4.24	TiN
Z-phase	tetragonal	a=3.037 c=7.391	CrNbN
M ₂₃ C ₆	fcc	a=10.57-10.68	Cr ₁₆ Fe ₅ Mo ₂ C(e.g.)
M ₆ C	diamond cubic	a=10.62-11.28	(FeCr) ₂₁ Mo ₃ C; Fe ₃ Nb ₃ C; M ₅ SiC
Sigma	tetragonal	a=8.80 c=4.54	Fe,Ni,Cr,Mo
Laves phase	hexagonal	a=4.73 c=7.72	Fe ₂ Mo, Fe ₂ Nb
χ-phase	bcc	a=8.807-8.878	Fe ₃₆ Cr ₁₂ Mo ₁₀
G-phase	fcc	a=11.2	Ni ₁₆ Nb ₆ Si ₇ , Ni ₁₆ Ti ₆ Si ₇

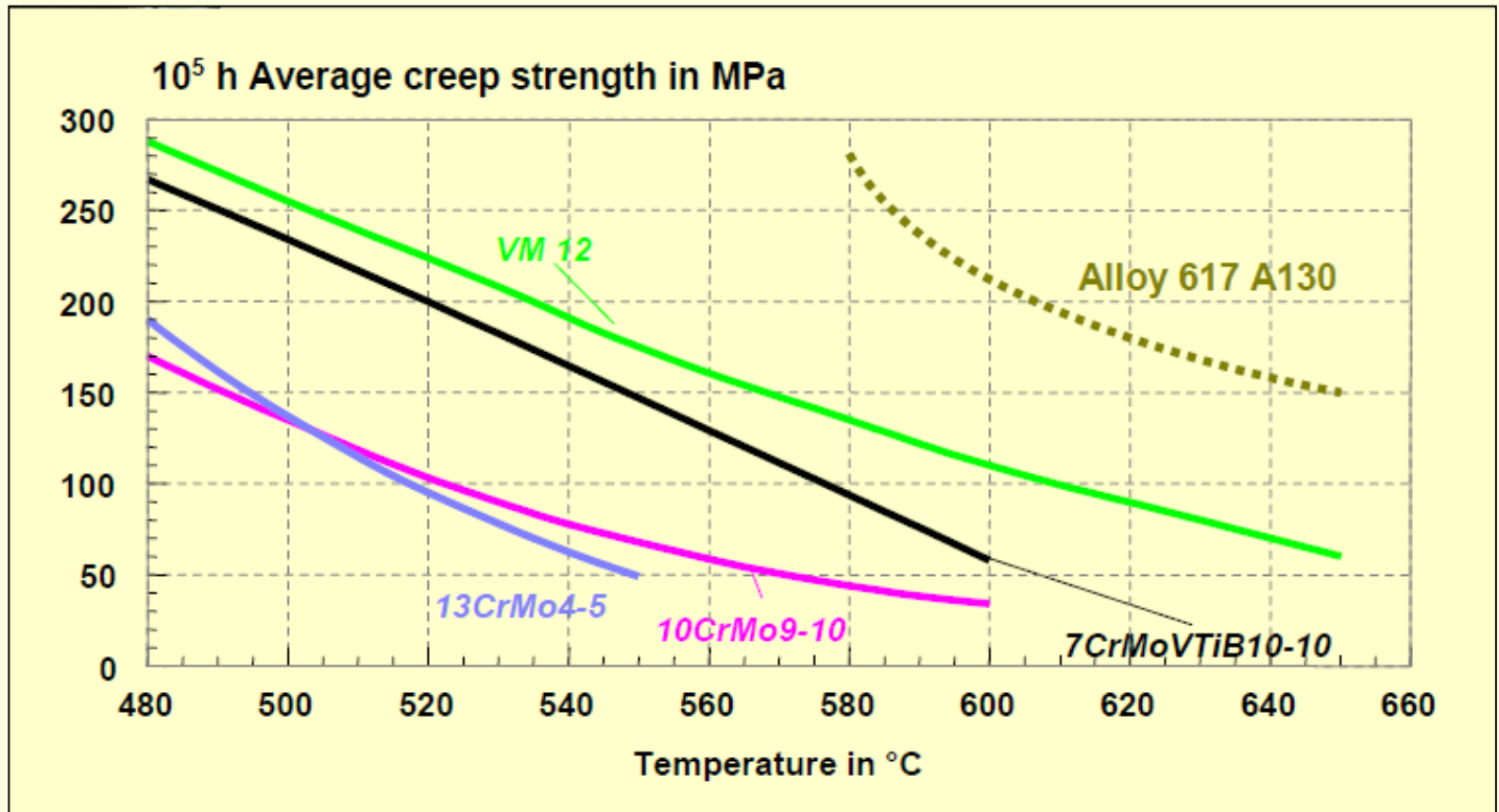
Uloga toplotno postojanih čelika – cilj 700°C

- 16Mo3
- P265GH
- 13CrMo4-5
- 10CrMo9-10
- X20CrMoV11-1
- Super 304H
- HR3C
- VM12

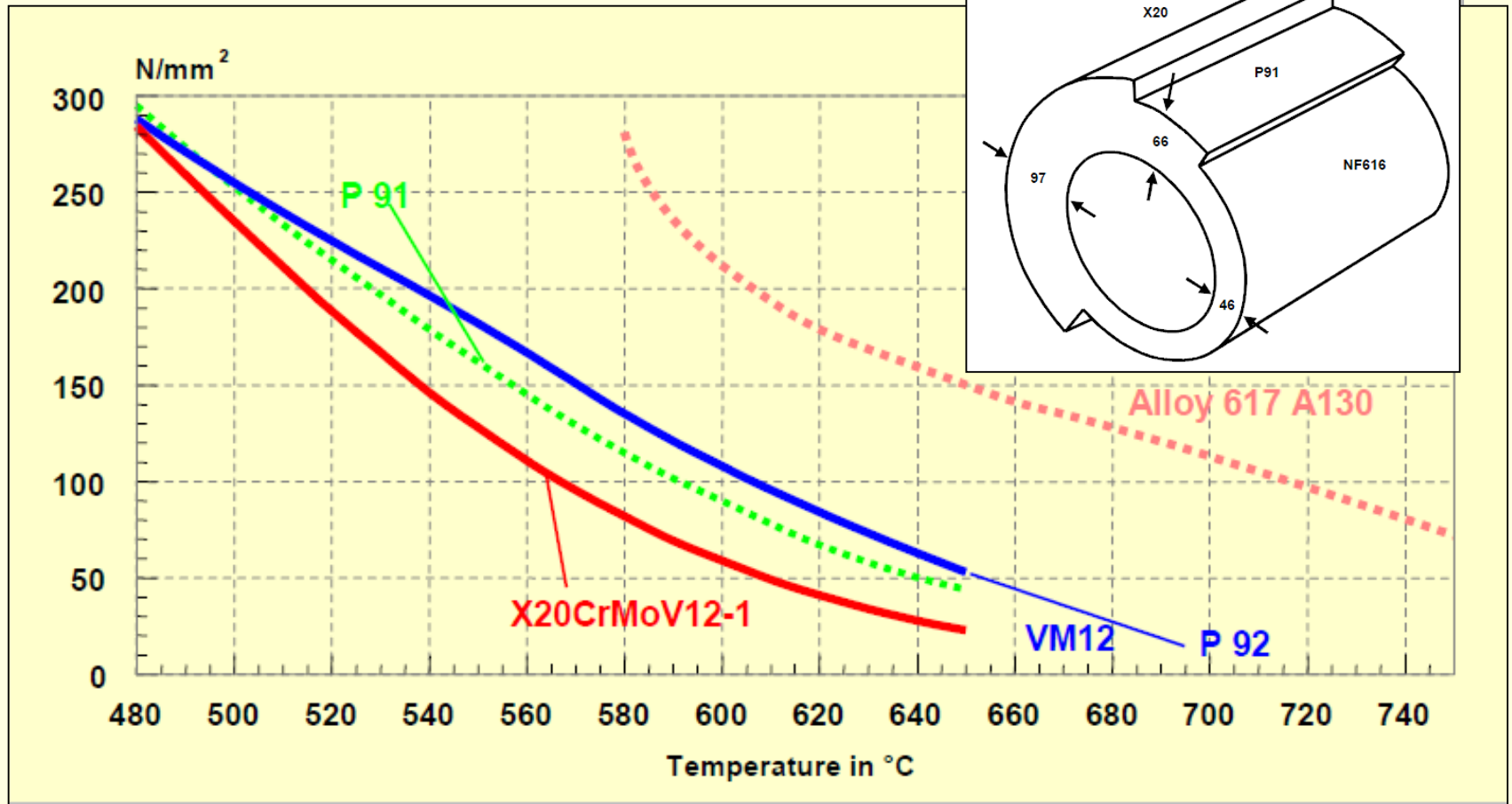


grejne površine kotla modernog termoenergetskog postrojenja

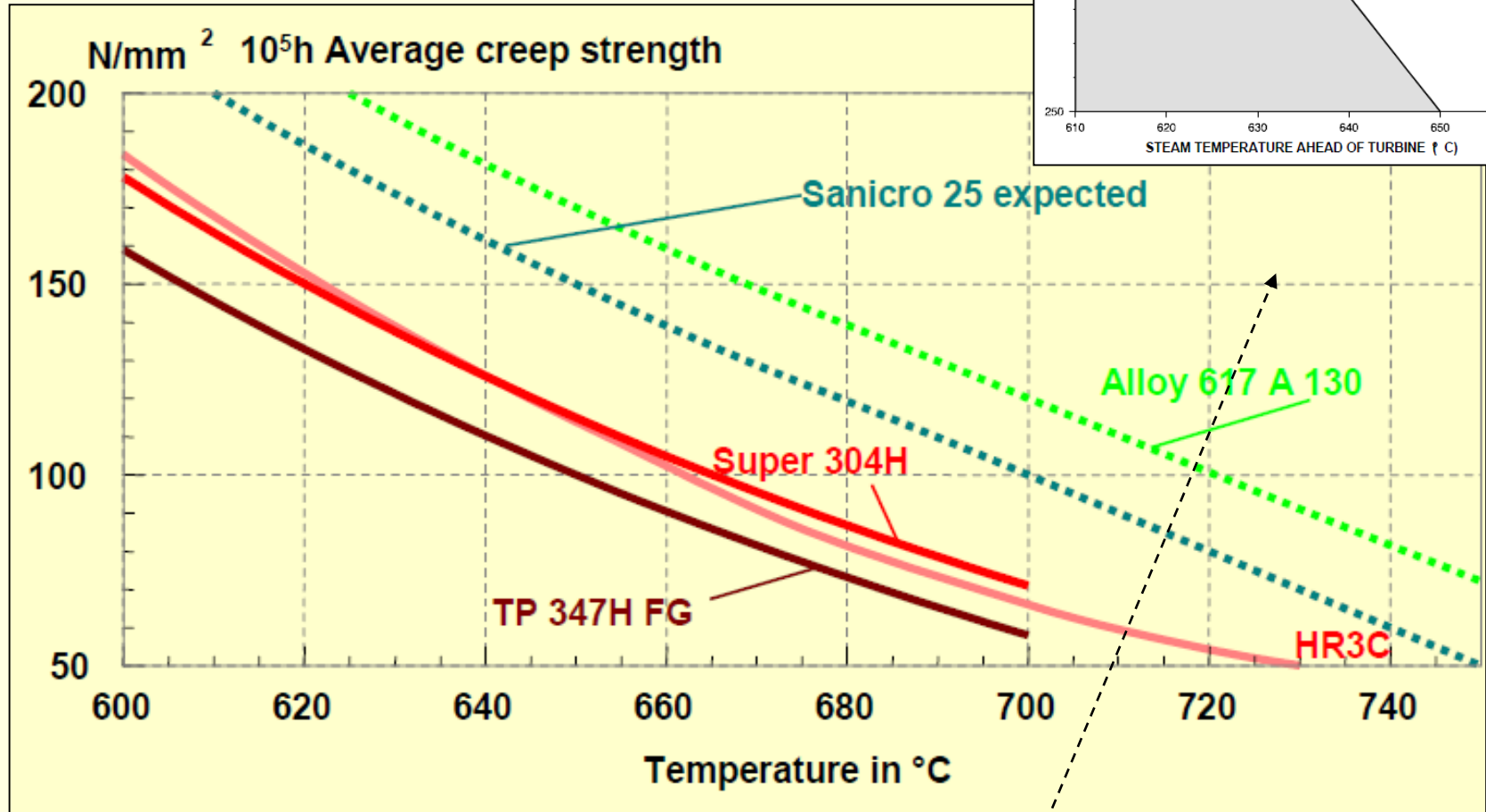
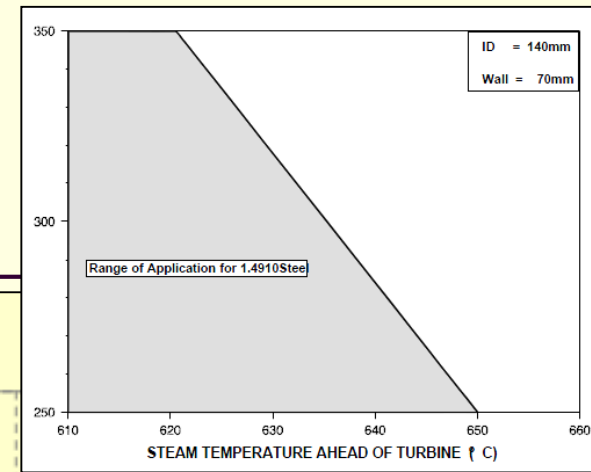
Feritni toplotno postojani (α ferit)



Martenzitni toplotno postojani čelici (često feritni)



Austenitni toplotno postojani čelici i legure na bazi Ni



parametri primene austenitnog toplotno postojanog čelika – do 650°C

Toplotno postojani čelici

{PRIVATE }Table 3.1.1. Chemical Compositions of Boiler Tube Materials

{PRIVATE }MATERIAL	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	V	Nb	W	N	Cu (Ce)	Ti	B
15Mo3 (1.5415)	0.12 0.20	0.10 0.35	0.40 0.90	max 0.035	max 0.03	-	-	-	0.25 0.35	-	-	-	-	-	-	-
13CrMo44 (1.7335)	max 0.15	max 0.50	0.30 0.61	-	-	-	0.80 1.25	-	0.44 0.65	-	-	-	-	-	-	-
T22 (10CrMo910) (1.7380)	0.08 0.15	max 0.50	0.30 0.60	-	-	-	1.90 2.60	-	0.087 1.13	-	-	-	-	-	-	-
T23 (HCM2S)	0.04 0.10	max 0.50	0.30 0.60	max 0.03	max 0.01	<0.03 (sol)	1.90 2.60	-	max 0.30	0.20 0.30	0.02 0.08	1.45 1.75	max 0.03	-	-	max 0.006
T24 (7CrMoVTiB10-10)	0.05 0.10	0.15 0.45	0.30 0.70	Max 0.02	Max 0.01	Max 0.02	2.20 2.60	-	0.90 1.10	0.20 0.30	-	-	Max 0.012	-	0.05 0.10	0.0015 0.0070
P 91/T 91 (X10CrMoVNb91) (1.4903)	0.08 0.12	0.20 0.50	0.30 0.60	max 0.02	max 0.01	max 0.040	8.50 9.50	max 0.40	0.85 1.05	0.18 0.25	0.06 0.10	-	0.05 0.08	-	-	-
E 911	0.09 0.13	0.10 0.30	0.30 0.60	max 0.02	max 0.01	max 0.025	8.50 9.50	0.10 0.35	0.90 1.10	0.15 0.25	0.06 0.10	0.90 1.10	0.05 0.08	-	-	-
P92 (NF 616)	max 0.15	max 0.50	max 1.00	max 0.02	max 0.01	-	8.00 13.00	-	max 1.00	0.10 0.30	max 0.10	1.50 2.50	0.02 0.15	-	-	max 0.01
HCM 12	max 0.12	max 0.50	0.30 0.70	max 0.03	max 0.03	-	11.0 13.0	-	0.80 1.20	0.20 0.30	max 0.20	0.80 1.20	-	-	-	max 0.01
P122 (HCM12A)	0.06 0.14	max 0.70	max 0.70	max 0.03	max 0.02	-	10.00 12.60	max 0.70	0.20 0.60	0.15 0.30	0.02 0.10	1.50 2.50	0.02 0.10	0.30 1.70	-	max 0.005
X20CrMoV121 (1.4922)	0.17 0.23	max 0.50	max 1.00	max 0.03	max 0.03	-	10.00 12.50	0.30 0.80	0.80 1.20	0.25 0.35	-	-	-	-	-	-
E1250	0.05 0.15	0.30 0.75	5.50 7.00	max 0.03	max 0.03	-	14.00 16.00	9.00 12.00	0.80 1.20	0.15 0.40	0.75 1.20	-	-	-	max 0.05	0.003 0.009
12R72 X10CrNiMoTiB1515	0.08 0.12	0.30 0.80	1.50 2.00	max 0.03	max 0.02	-	14.00 16.00	14.00 16.00	1.00 1.40	-	-	-	-	-	0.30 0.60	0.004 0.008
17-14CuMo	0.11	-	-	-	-	-	15.9	14.5	2.5	-	0.43	-	0.01	3.10	0.24	-
X8CrNiMoVNb1613 (1.4988)	0.04 0.10	0.30 0.60	max 1.50	max 0.035	max 0.015	-	15.50 17.50	12.50 14.50	1.10 1.50	0.60 0.85	max 10xC	-	-	-	-	-

Toplotno postojani čelici

Table 3.1.1. (Continued) Chemical Compositions of Boiler Tube Materials

{PRIVATE}MATERIAL	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	V	Nb	W	N	Cu (Ce)	Ti	B
X8CrNiMoNb1616 (1.4981)	0.04 0.08	0.30 0.60	max 1.50	max 0.035	max 0.015	-	15.50 17.50	15.50 17.50	1.60 2.00	-	max 10xC	-	-	-	-	0.08
X3CrNiMoN1713 (1.4910)	max 0.04	max 0.75	max 2.00	max 0.035	max 0.015	-	16.00 18.00	12.00 14.00	2.00 2.80	-	-	-	0.10 0.18	-	-	-
AISI T316	max 0.08	max 1.00	max 2.00	max 0.03	max 0.045	-	16.00 18.00	10.00 14.00	2.00 3.00	-	-	-	-	-	-	-
AISI T321	max 0.08	max 1.00	max 2.00	max 0.03	max 0.045	-	17.00 19.00	9.00 12.00	-	-	-	-	-	-	5 x C	-
AISI T347	max 0.08	max 1.00	max 2.00	max 0.03	max 0.045	-	17.00 19.00	9.00 13.00	-	-	10 x C	-	-	-	-	-
AISI T304	max 0.08	max 1.00	max 2.00	max 0.03	max 0.045	-	18.00 20.00	8.00 12.00	-	-	-	-	-	-	-	-
Super 304	0.07 0.13	max 0.30	max 1.00	max 0.04	max 0.010	-	17.00 19.00	7.50 10.50	-	-	0.30 0.60	-	0.05 0.12	2.50 3.50	-	-
NF709	max 0.20	max 1.00	max 1.50	max 0.03	max 0.010	-	18.00 22.00	22.00 28.00	1.0 2.0	-	0.10 0.40	-	0.05 0.20	-	0.02 0.20	0.002 0.010
Alloy 800	max 0.10	max 1.00	max 1.50	max 0.015	-	0.15 0.60	19.00 23.00	30.00 35.00	-	-	-	-	-	max 0.75	0.15 0.60	-
AISI T310	max 0.25	max 1.50	max 2.00	max 0.03	max 0.045	-	24.00 26.00	19.00 22.00	-	-	-	-	-	-	-	-
Valinox T310N	0.05 0.07	0.30 0.50	1.00 1.40	max 0.01	max 0.025	-	24.40 25.00	20.60 21.50	max 0.20	-	0.40 0.50	-	0.18 0.24	max 0.20	-	-
HR3C (1.6974)	0.04 0.10	max 0.75	max 2.00	max 0.03	max 0.030	-	24.00 26.00	17.00 23.00	-	-	0.2 0.6	-	0.15 0.35	-	-	0.005
HR6W	max 0.10	max 1.00	max 2.00	max 0.030	max 0.030	-	21.00 25.00	35.00 45.00	-	-	max 0.40	4.00 8.00	-	-	max 0.20	-
AC66 (1.4877)	0.04 0.08	max 0.30	max 1.00	-	-	max 0.025	26.00 28.00	31.00 33.00	-	-	0.6 1.0	-	-	(0.05) (0.10)	-	-

Čelici sa specijalnom namenom

Magnetični čelici

- Magnetno meki materijali:
 - čisto Fe ($C < 0,05\%$)
 - elektrotehničke legure (1...4% Si)
- Magnetno tvrdi materijali:
 - visoko ugljenični alatni čelici (1,1...1,3% C)
 - Cr-čelici (*oko* 1% C; 1,5...3% Cr)
 - Co-čelici (*oko* 1% C; 1,5...3% Cr; 5...15% Co)
 - Fe-Ni-Al-legure (*alniko*) (11...14% Al; 22...34% Ni)

Specijalni čelici

Za niske temperature (kriogene) - zahtev: niska prelazna T

Klase za niske T

- do -60°C (nelegirani i niskolegirani čelici)
- do -100°C – Ni čelici sa niskim sadržajem – 2...5% Ni + Cr, V, Ti
- do -190°C (tečni N_2) – austenitni nerđajući čelici
- ispod -190°C (tečni H_2 , O_2) – visokolegirani koroziono otporni čelici – Cr > 10%; Ni > 20%

■ Hvala na pažnji 😊