

Mašinski materijali 3

- *razni izvori*

1

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.
- 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 ili kontinualno
- **Čelični odlivak može da bude finalni proizvod** - na taj način se izrađuju proizvodi složene geometrije

2

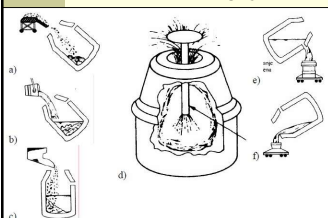
Konvertorski postupak dobijanja čelika

U konvertorima se rafiniše gvožđe iz visokih peći i u njih se dodaju:

- metalni otpad
- rastopljeni metal
- topitelj
- uduvava se kiseonik (O_2) da redukuje sadržaj ugljenika

Uduvavanjem O_2 ostvaruje se reakcija sa Fe: $2Fe + O_2 = 2FeO$

Oksid FeO reaguje sa C - reguliše se sadržaj C: $FeO + C = Fe + CO$



Konvertorski postupak:

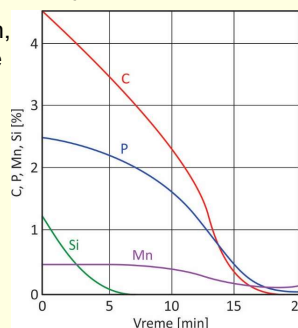
- metalni otpad
- rastopljeni metal
- topitelj
- uduvanje O_2
- izbacivanje šljake

Dezoksidacija – pred izlivanje dodaju se **Mn, Si i Al**.

Oksid FeO reaguje sa Si, Mn, Al, ali i sa P čime se reguliše sadržaj primesa u čeliku:

- $2FeO + Si = SiO_2 + 2Fe$
- $FeO + Mn = MnO + Fe$
- $3FeO + 2Al = Al_2O_3 + 3Fe$
- $5FeO + 2P = P_2O_5 + 5Fe$

Toplota oslobođena iz svih ovih reakcija je dovoljna da čelik ostane u tečnom stanju – egzotermna reakcija.

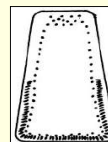


Zaostali gasovi

- Tokom livenja tečni metal lako rastvara gasove (O_2 , N_2 , H_2 , CO_2 i CO)
- Prema količini zaostalih gasova u toku očvršćavanja čelici se dele na **neumirene, poluumirene i umirene**.

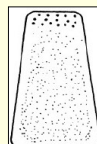
• **Neumireni** (oznaka FU prema SRPS EN 10025),

- nepotpuna dezoksidacija Mn i Al
- pore uz površinu ingota – lakša obrada na hladno
- limovi i šipke
- smanjena KV, Rd i zavarljivost



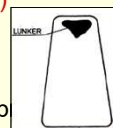
• **Polumireni**

- nepotpuna dezoksidacija Mn, Al i Si
- pore u gornjem delu odlivka
- profili i limovi
- ekonomični



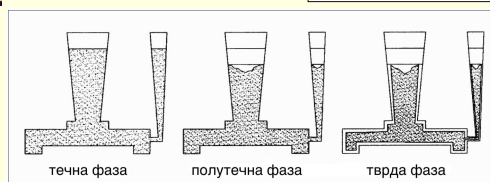
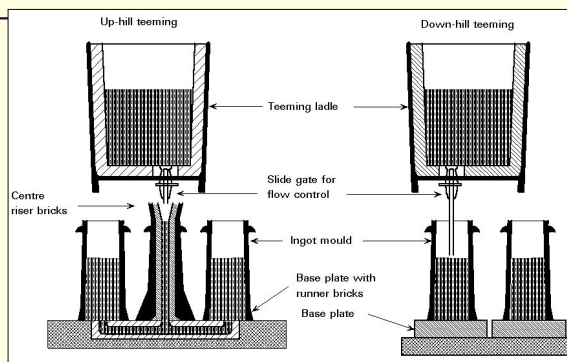
• **Umireni** (oznaka FN i FF prema SRPS EN 10025)

- potpuna dezoksidacija Mn, Al i Si
- oksidi nakon dezoksidacije ostaju u čeliku lunke (lunker je greška skupljanja)
- pogodni za rad u bilo kojim uslovima jer imaju dobre mehaničke osobine



Livenje ingota

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

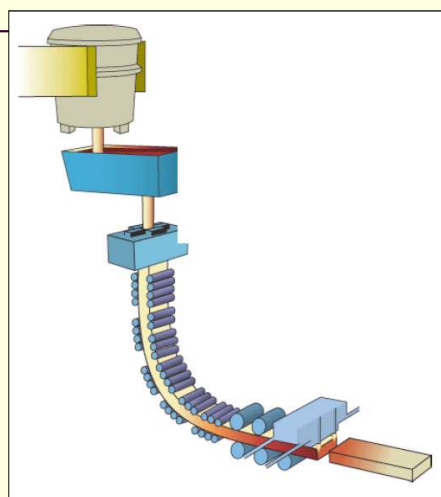


- Livenje ingota i proces skupljanja materijala tokom očvršćavanja

5

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.



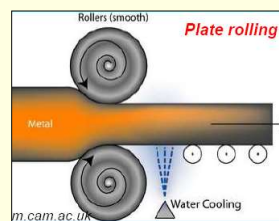
Kontinualno livenje

6

Nakon livenja odlivak ide na hladno/toplo valjanje itd.

- Proizvodi od valjanog čelika proizvoljne dužine mogu da budu proizvedeni u obliku:
 - šipke - izvlačenjem, kovanjem ili valjanjem;
 - žice - izvlačenjem ili valjanjem;
 - čelični profili – valjanjem ili izvlačenjem.

Primer: lopatice turbina, cevi, šine, limovi
različiti profili tipa T, I, U, itd.



7

Podela čelika

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

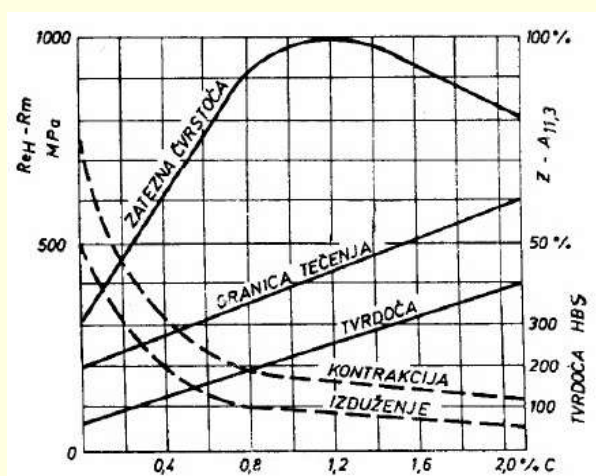
8

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**.

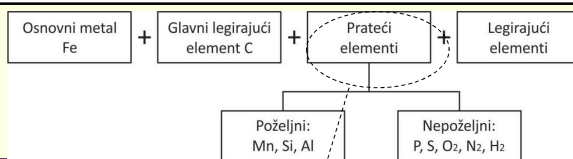
9

Uticaj %C na mehanička svojstva ugljeničnih čelika

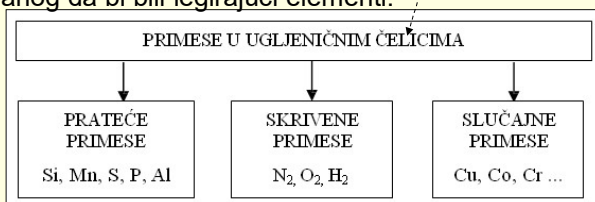


10

Primeze u ugljeničnim čelicima



- **Primeze u čelicima mogu da budu:**
- **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) koje 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 da bi bili legirajući elementi.

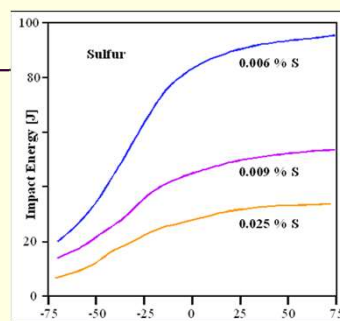


11

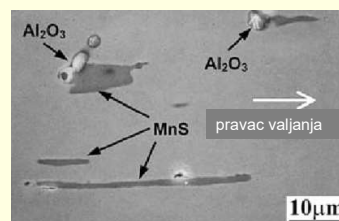
Sumpor S

- Sumpor ima malu rastvorljivost u čelicima i može da se smatra nerastvorljivim.
- Kod konstrukcionih čelika max dozvoljena granica se stalno smanjuje (bila je 0.04%, ali već je ispod 0.02% za neke čelike).
- Kod kvalitetnijih čelika max sadržaj S ide ispod 0.01%, a sada je kod nekih čelika u standardima iz 2019-2020.god. max S sadržaj 0.005%
- Kod neumirenih čelika izdvaja se u sredini odlivka.
- Otežava/onemogućava zavarivanje.

S se vezuje sa Mn u MnS koji je deformabilan i izdužuje se kod valjanja.
 $T_t = 1610^{\circ}\text{C}$



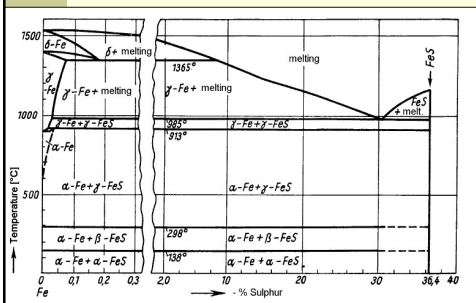
Smanjuje žilavosti čelika na sa porastom sadržaja S



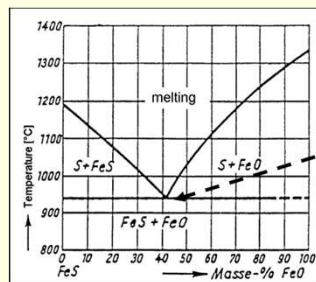
12

Niskotopljivi eutektikumi S

- Sa Fe i O stvara niskotopljive eutektikume koji su odgovorni za stvaranje toplih prslina (preko 950°C)
- Na T od oko 800°C izaziva tzv crveni lom.



Dijagram stanja Fe-S



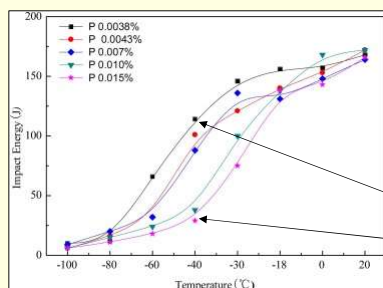
Dijagram stanja FeS-FeO

niskotopljivi
eutektikum

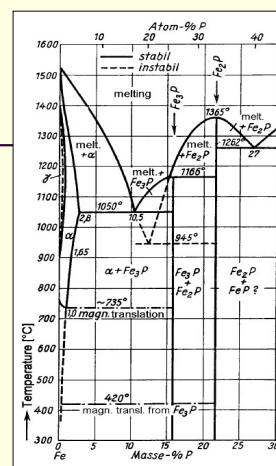
13

Fosfor 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 0.005-0.035 %P i sve su niže!



Smanjenje žilavosti čelika na -40°C, sa porastom sadržaja P 0.0038% 0.015%

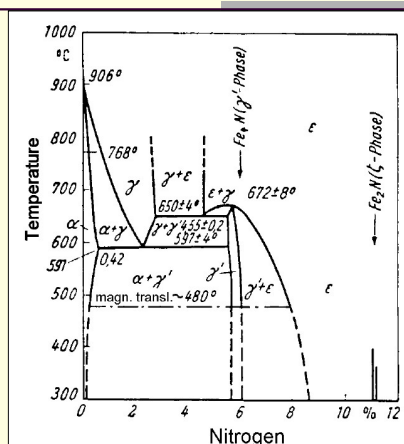


Dijagram stanja Fe-P

14

Azot N

- Rastvara se u čelicima
- Izdvaja se u vidu nitrida
- **Dovodi do starenja čelika** 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



Dijagram stanja Fe-N

15

Ostali elementi

Si

- 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

- Mn ima veliki uticaj na **čvrstoću, žilavost i dinamičku čvrstoću**
- potrebno je min 0.2%Mn da bi vezao S u MnS i obezbedila žilavost
- uobičajeni sadržaj Mn je 0.4 - 0.6 %.
- dezoksidator – čelici sa preko 0.6 %Mn se mogu smatrati umirenim.
- kod finostrukturnih čelika sadržaj Mn 1.0-1.6 %.
- Mn utiče na zavarljivost
- čelici sa većim sadržajem Mn se ne koriste zbog loše žilavosti izuzev ako nisu austenitni čelici sa Mn

16

Ostali elementi

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 je u čelicima do 0.0004 ml/100g na sobnoj T
- Ima veću rastvorljivost u martenzitu

17

Podela legiranih čelika

- 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 i nameni.
- **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.

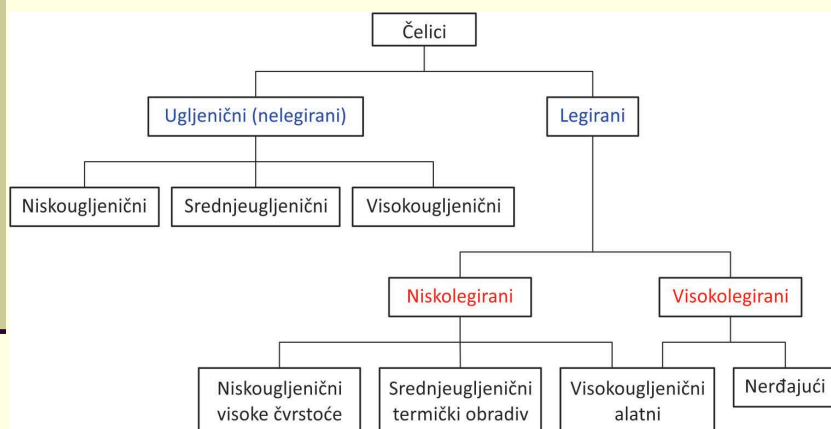
Min sadržaj legirajućih elemenata u čelicima, %

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

- **Prema nameni** čelici se dele na:
 - konstrukcione čelike,
 - alatne čelike,
 - čelike sa posebnim svojstvima.

18

Legirajući elementi u čeliku



19

Legirajući elementi u čeliku

Legirajući elementi u čeliku mogu da:

- grade **čvrste rastvore** odnosno - rastvaraju u α i γ -železu,
- 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_3Al	
Silicijum	Si			$\text{SiO}_2\text{M}_x\text{O}_y$	
Mangan	Mn	$(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$		MnS ; MnOSiO_2	
Hrom	Cr	$(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$	Cr_7C_3 ; Cr_{23}C_6		
Molibden	Mo		Mo_2C		
Volfram	W		W_2C		
Vanadijum	V		VC		
Titan	Ti		TiC		
Niobijum	Nb		NbC		
Aluminijum	Al			Al_2O_3 ; AlN	
Olovo					Pb

Jedan legirajući element može da učestvuje u više reakcija u čeliku npr. da gradi čvrste rastvore i karbide, itd.

20

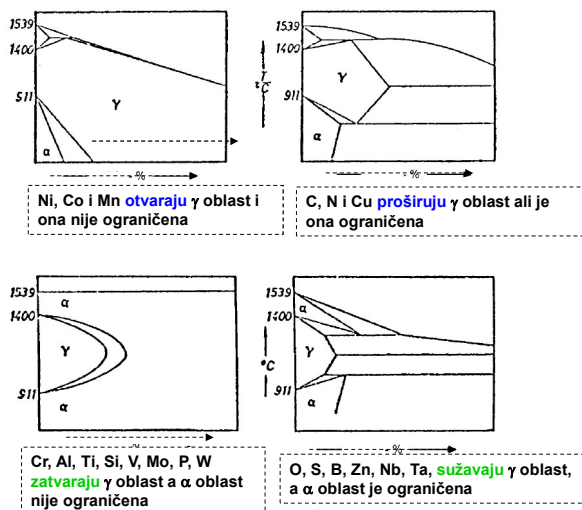
Legirajući elementi u čeliku

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

21

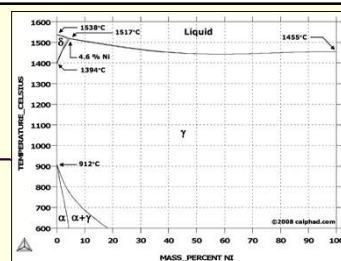
Legirajući elementi – menjaju dijagram stanja

- **austenito-obrazujući γ** : **Ni, Co, Mn** otvaraju γ oblast, dok je **C, N i Cu** je proširuju
- **ferito-obrazujući α** : **Cr, Al, Ti, Si, V, Mo, P, W** zatvaraju γ oblast, dok je **O, S, B, Zn, Nb, Ta** dodatno sužavaju



Primer: Austenito-obrazujući elementi

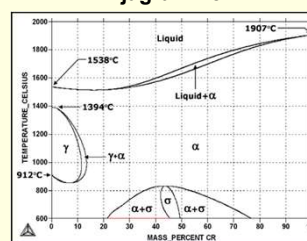
- 18%Cr i 8%Ni - austenitni čelik
- **Hatfieldov** čelik sa 13%Mn, 1,2%Cr i 1%C. U ovom čeliku u Mn i C stabilizuju austenit.



Primer: Ferito-obrazujući elementi

- Legure Fe-Cr koje sadrže **više od 13%Cr** su feritne na svim temperaturama do početka topljenja.
- Niskougljenični čelici sa oko 3%Si su feritni i koriste se za transformatorske limove.

Dijagram Fe-Ni



Dijagram stanja Fe-Cr

Odstupanja - Cr

- Uobičajeno je da se suprotni efekti legirajućih elemenata poništavaju, međutim postoje i odstupanja...
- Najbolji primer je hrom (Cr) – ako se u čelik koji sadrži Ni doda Cr u količini od oko **18%** onda **Cr pomaže da se stabilizuje γ faza (austenit) iako je Cr ferito-obrazujuć element.**

23

Karbido-obrazujuć elementi

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

Karbido-obrazujuć elementi – legirani karbidi

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

24

Stabilizatori karbida

- Stabilnost karbida zavisi od prisustva drugih elemenata u čeliku.
- Npr. **Mn**, koji je slab karbidoobrazujući element, je jak stabilizator karbida.
- U praksi se **Cr najčešće koristi kao stabilizator karbida**
- Uticaj elemenata na stabilizaciju karbida:

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

Rastuće

Grafito obrazujući elementi

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

Uticaj legiranja na rast zrna

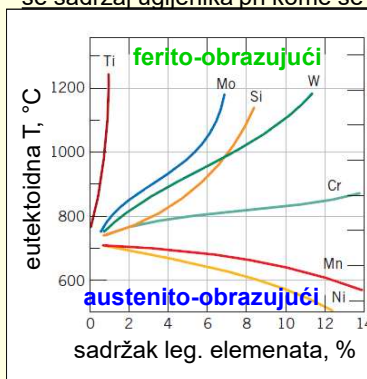
Rafinirajući efekat imaju Ti, V, Nb, Al, Zr jer formiraju **fine karbide, nitride i karbonitride na granicama zrna** koji sprečavaju migraciju granica (npr. V, koji dodat u malim količinama, oko 0,1%, sprečava rast zrna formiranjem karbida i nitrida; fino-zrni čelici - poznati su kao "mikrolegirani" čelici).

Kompleksni karbidi W i Mo takođe sprečavaju rast zrna.

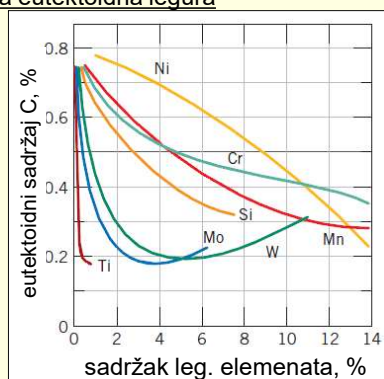
Al-N čestica, ograničava rast zrna na temperaturama koje se obično koriste u termičkoj obradi.

Uticaj legirajućih elemenata na eutektoidnu tačku

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



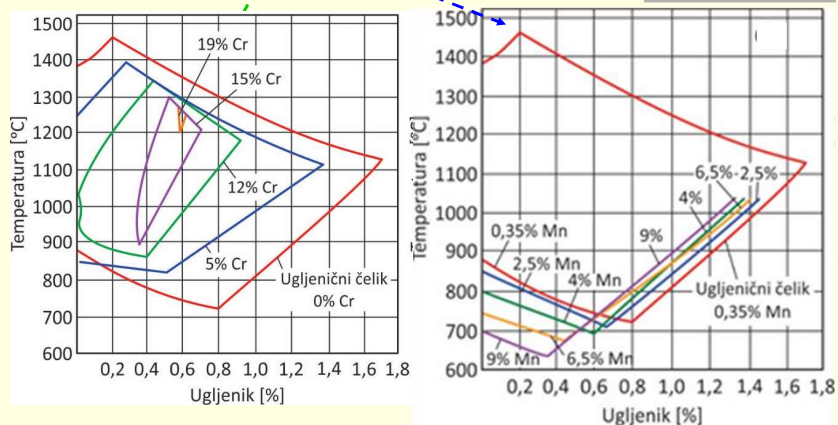
Uticaj sadržaja legirajućih elemenata na **A1 temperaturu**



Uticaj sadržaja legirajućih elemenata na **eutektoidni sadržaj C**

Primer: Uticaj sadržaja legirajućih elemenata na **eutektoidni sadržaj C**

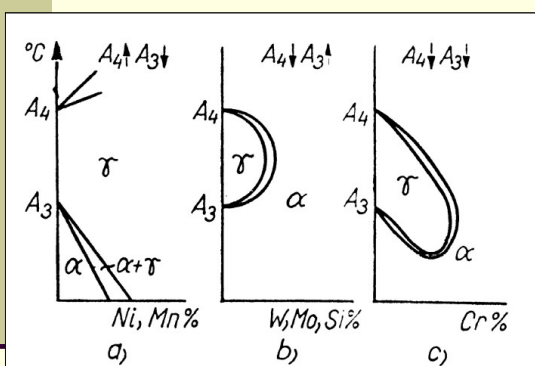
Uticaj sadržaja **Cr** i **Mn** na položaj eutektoidne tačke



Sa porastom sadržaja legirajućih elemenata, eutektoidna legura se formira na nižem sadržaju %C.

27

Pomeranje temperature A3 i A4 sa legiranjem



Podsećanje na karakteristične temperature (Fe):

1536°C - $\delta \rightarrow L$

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

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

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

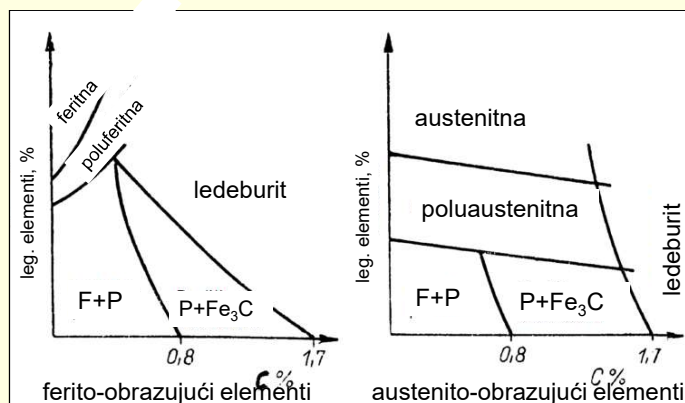
723°C - **A1** eutektoidna transformacija

Uticaj legirajućih elemenata na A4 i A3 temperature

28

Uticaj legirajućih elemenata na mikrostrukturu čelika

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



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

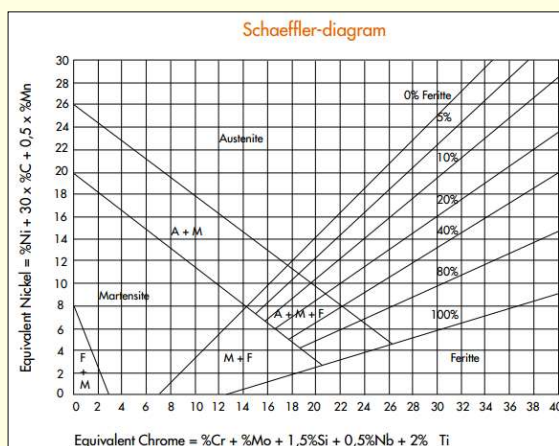
29

Primer: Šeflerov dijagram (Schäffler - De Long)

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

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

•ne može da prikaže udeo karbidne faze!



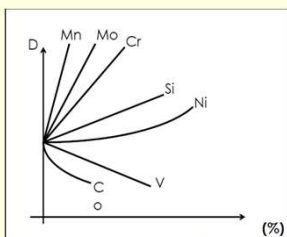
$$Cr_{eq} = (Cr) + 2(Si) + 1.5(Mo) + 5(V) + 5.5(Al) + 1.75(Nb) + 1.5(Ti) + 0.75(W)$$

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

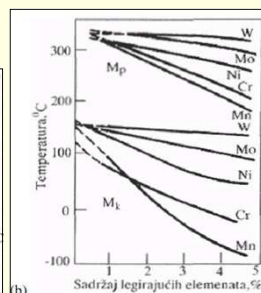
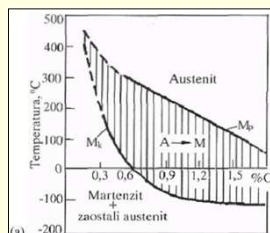
30

Uticaj legirajućih elemenata na temperaturu martenzitne transformacije

- Svi legirajući elementi, **snižavaju** M_s i M_f temperaturu **izuzev Co i Al**.
- **C ima veći uticaj na M_s temperaturu od svih legirajućih elemenata.**
- Sa porastom sadržaja leg. elemenata takođe:
 - **raste** sadržaj zaostalog austenita
 - **opada** kritična brzina hlađenja.
 - **uglavnom raste prokaljivost**



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

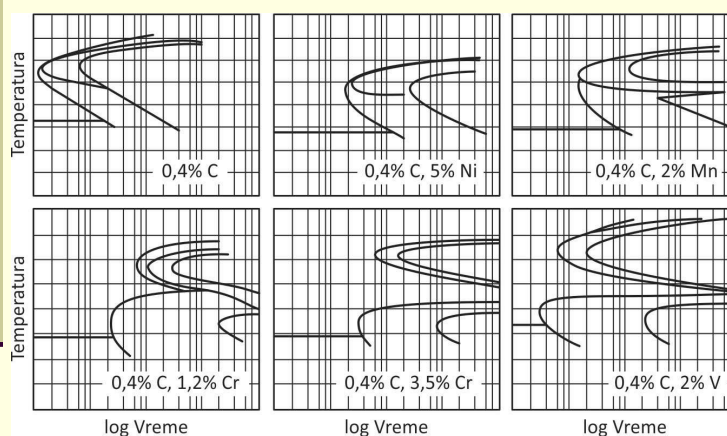


- a) Uticaj sadržaja C na M_p (M_s) i M_k (M_f);
b) Uticaj legirajućih elemenata na M_p (M_s) i M_k (M_f)

31

Uticaj leg. elemenata na izgled TTT dijagrama

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

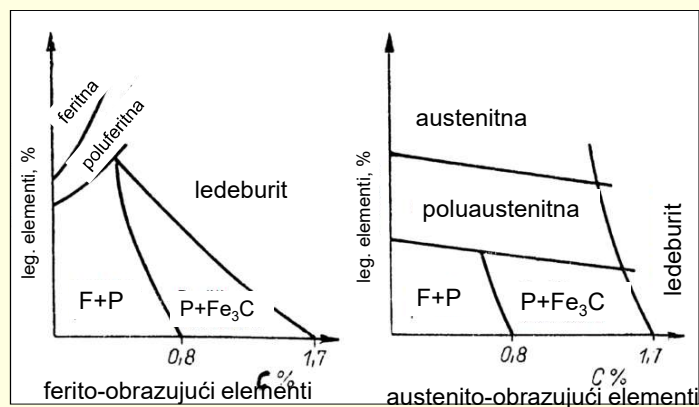


Svi legirajući elementi (osim Co) pomeraju krive transformacije u TTT dijagramu **u desno**

32

Uticaj legirajućih elemenata na mikrostrukturu čelika

Prema strukturi čelici se dele na: feritne, podeutektoidne, eutektoidne, nadeutektoidne, ledeburitne, austenitne i martenzitne.



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

33

ALATNI ČELICI

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

- 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 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.

34

ALATNI ČELICI

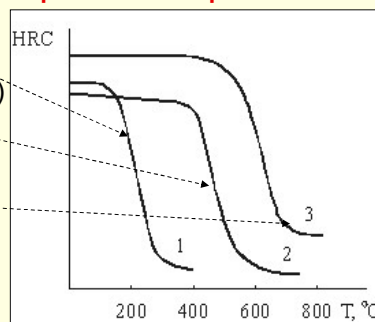
Alatni čelici se dele na:

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

Namena alatnih čelika zavisi od tvrdoće/čvrstoće na povišenim temperaturama

Legirani alatni čelici mogu da budu:

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



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 zbog većeg zagrevanja
 - **imaju relativno dobru žilavost** - za izradu alata izloženog jačim **udarnim** opterećenjima.
 - **od ugljeničnih alatnih čelika mogu da se izrađuju alati jednostavnog oblika i manjih dimenzija.**

Legirani alatni čelici

■ Legirani alatni čelici za rad u hladnom stanju:

- Namenjени za oblikovanje i mehaničku obradu **do 200°C**.
- Osnovni legirajući elementi - **Cr**, a po potrebi i Mo, W i V.
- Ovi čelici se primenjuju za alate za prosecanje 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, zakovica, itd.
- Osnovni legirajući elementi kod ove vrste čelika su **Cr, Mo i V, a često se dodaje i W.**

37

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.

38

Brzorezni alatni čelici TO

Tokom termičke obrade brzorezni čelici mogu da ojačavaju izdvajanjem karbida ili intermetalne faze:

- 1) stvaraju **karbide** tokom TO ako su legirani
W (18 or 9%) + Mo, V, Co
 - TO: Austenitizacija (1200...1300°C)+3x otpuštanje (570...650°C) → 64...65 HRC
- 2) stvaraju **intermetalne faze** tokom TO i sadrže
20-25% Co, 11-20% W, 7% Mo (0,1-0,3% C)
 - Legirajući elementi Co, W, Mo obrazuju ojačavajuće intermetalne faze → Co_7W_6 ; $(\text{Co,Fe})_7\text{W}_6$ itd.
 - TO: Austenitizacija (1200...1300°C) → 68 HRC
 Otpuštanje (700...720°C) → 60 HRC

39

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 otkrica procesa uklanjanja ugljenika pri dobijanju čelika (O2 Ar - AOD).
- Najveće dostignuće novijeg datuma je uvođenje N kao legirajućeg elementa.

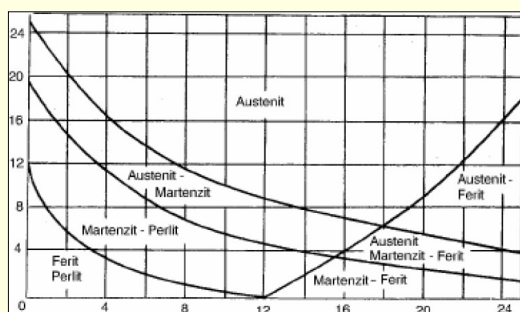
40

Osobine nerđajućih čelika

- **Električna otpornost**
 - Veća od ugljeničnih čelika
- **Termička provodnost**
 - 40-50% manja od ugljeničnih čelika
- **T topljenja nešto 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**
 - formiraju filmove
- **Gustina**
 - austenitni čelici imaju najveću gustinu - 7.9-8.1g/cm³

41

Podela nerđajućih čelika prema mikrostrukturi



**Maurerov dijagram
za CrNi čelike**

Postoji 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

42

Feritni nerđajući čelici

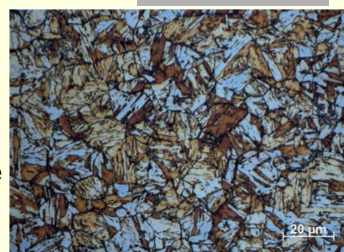
- Sadrže **Cr 12-30% i 0,02-0,12%C**
- Vrlo mali sadržaj Ni
- Ne ojačavaju termičkom obradom
- Mo se dodaje da se podigne otpornost na koroziju
- Feritni čelici (ili Cr čelici) su **magnetični**
- Feritni čelici za povišene temperature (800-1150°C) sadrže nešto više C, a dodaju im se i Al i Si da bi 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 **niski radni naponi jer im je niža čvrstoća.**
- Ojačavaju hladnom deformacijom



43

Martenzitni nerđajući čelici

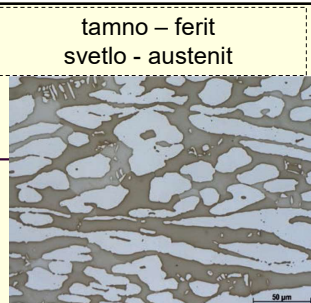
- Najmanja grupa nerđajućih čelika
- Visok sadržaj C – 0,2-1,2%
- Visok sadržaj Cr – 12-18%
- Dodaje se i N za dodatno ojačavanje
- Vrlo mali sadržaj Ni (ako se doda može da se smanji sadržaj C i popravi zavarljivost) i Mo
- **Martenzit se dobija termičkom obradom**
- Čestično ojačavanje i **visoka čvrstoća**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



44

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** i 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**



45

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 temperature
- Dobra čvrstoća
- Dobra zavarljivost
- Dobra žilavost (za niske T)
- **Nemagnetični** su posle rastvarajućeg žarenja

46

Austenitni nerđajući čelici

- **Cr-Ni čelici**
 - Za opštu upotrebu (kao npr. CrNi 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 sprečila 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
- **Cr-Ni-Mo čelici**
 - Sadržaj **Cr oko 17%, Ni 10-13%, 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)

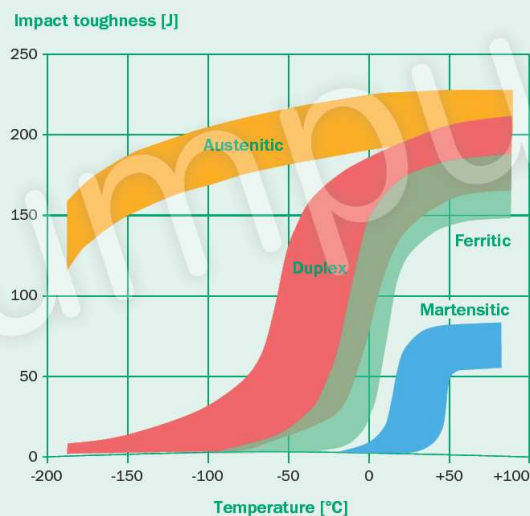
47

Austenitni nerđajući čelici

- **sa visokim performansama** (super austenitni)
 - Sadržaj Cr 17-25%, Ni 14-25%, Mo 3-7%
 - Legiraju se N i Cu (za otpornost na neke kiseline)
- **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

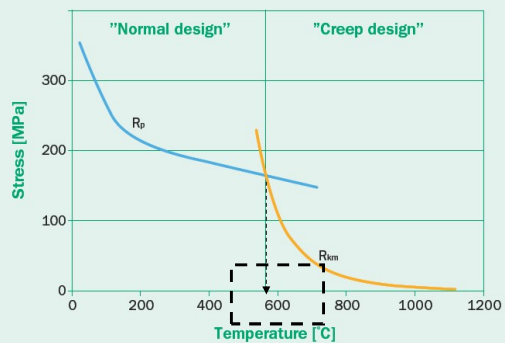
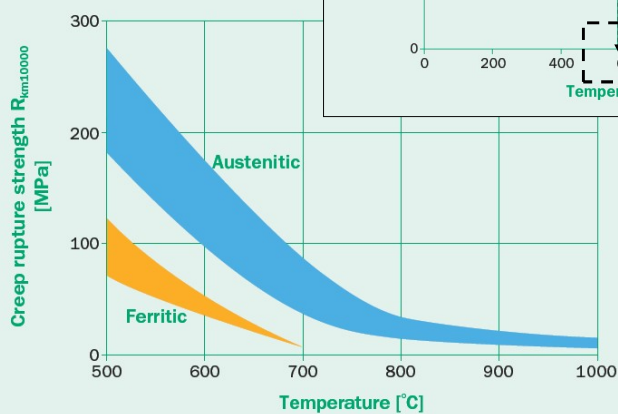
48

Žilavost nerđajućih čelika



49

Otpornos na puzanje nerđajućih čelika



početak puzanja
na $T < \text{od oko } 600^\circ\text{C}$

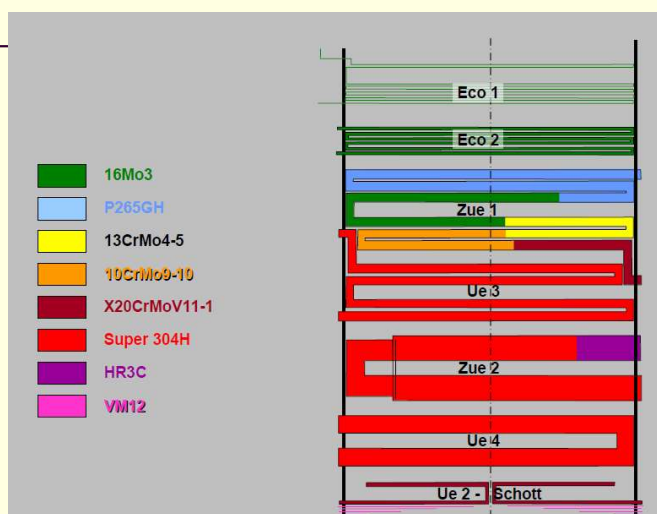
50

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
γ-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

51

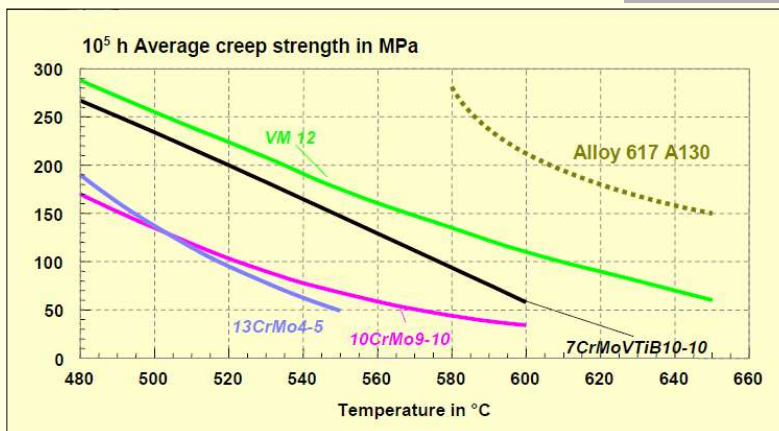
Uloga toplotno postojanih čelika – cilj 700°C



grejne površine kotla modernog termoelektričnog postrojenja

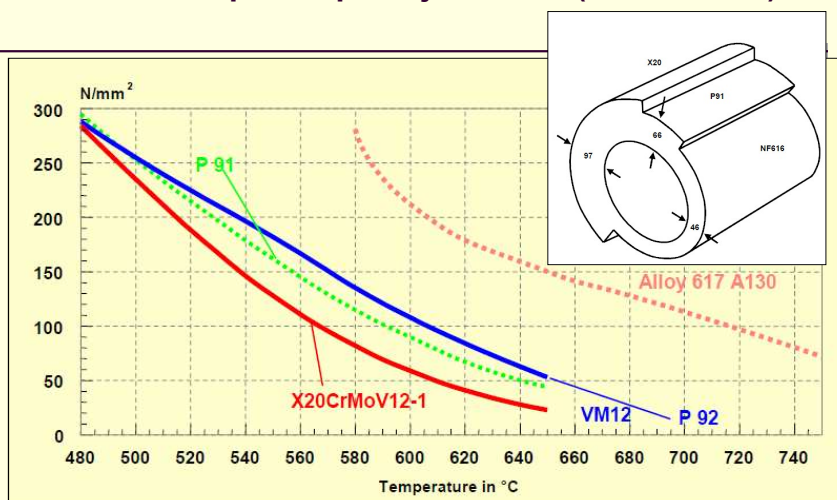
52

Feritni toplotno postojani (α ferit+P/S/B)



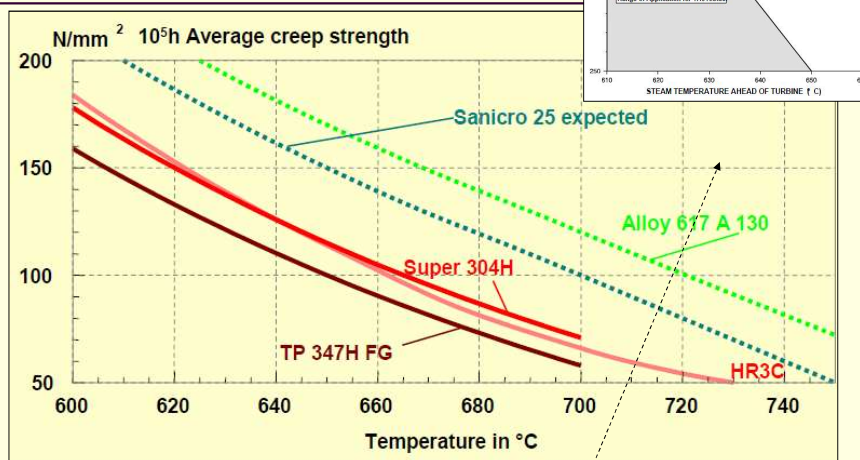
53

Martenzitni toplotno postojani čelici (često feritni)



54

Austenitni toplotno postojani čelici i legure na bazi Ni



parametri primene austenitnog toplotno postojanog čelika – do 650°C

55

Feritni toplotno postojani čelici – grupe za zavarivanje

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+H	I	5.4			
X11CrMo9-1	NT	5.4			
X11CrMo5	I	5.3			
X11CrMo5	NT	5.3			
X11CrMo5+NT2	NT	5.3			
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			

NT normalizovano i otpušteno
I izotermno žareno
QT kaljeno i otpušteno
N normalizovano
Q kaljeno

56

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 (Ct)	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	-	-	-	1.50 2.60	-	0.087 1.13	-	-	-	-	-	-	-
T23 (HCM25)	0.04 0.10	max 0.50	0.30 0.60	max 0.03	max 0.01	-0.03 (val)	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 (Ct)	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 2.60	-	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	-	-	-
AlSi 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 3.80	-	-	-	-	-	-	-
AlSi 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	-
AlSi 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	-	-	-	-	-
AlSi 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	-
AlSi 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 (1.4677)	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 (lako se magnetišu/razmagnetišu):
 - čisto Fe ($C < 0,05\%$)
 - elektrotehničke legure (1...4% Si)
- Magnetno tvrdi materijali (teško se magnetišu/razmagnetišu):
 - 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)

59

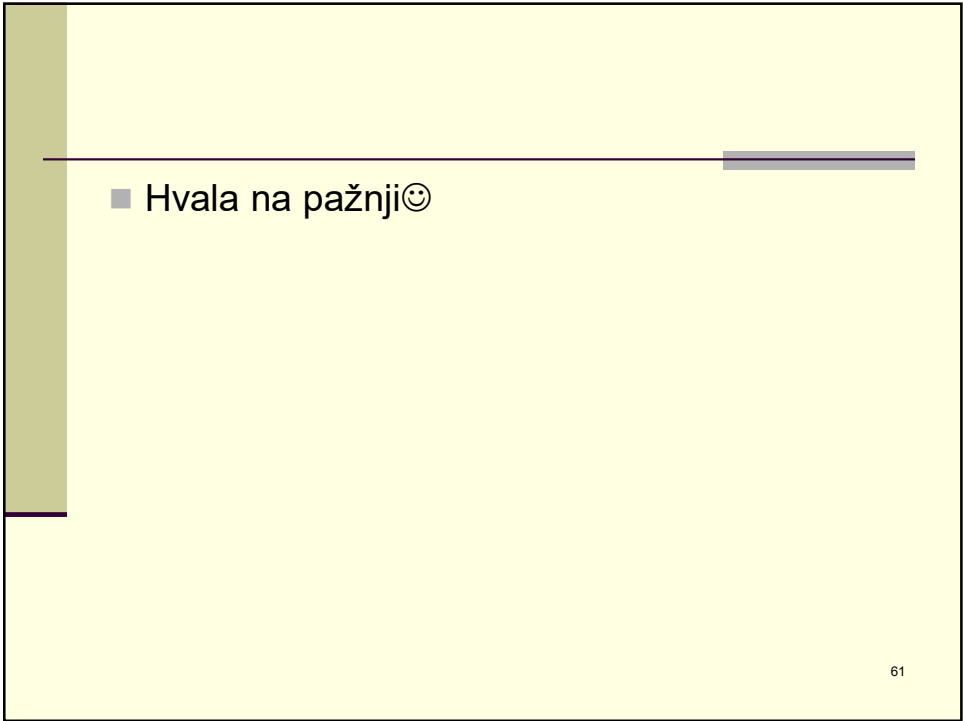
Specijalni čelici

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%

60



■ Hvala na pažnji😊