

# Mašinski materijali 3

---

## Titan i legure titana



# Titan - Ti

- Ti - otkriven 1791 (UK W.Gregor)
- $\rho = 4.5\text{g/cm}^3$  - laki metal srebrnkaste boje
- $T_t = 1668\text{ }^\circ\text{C}$
- U prirodi **10. najzastupljeniji element** ali se retko koristio zbog visoke reaktivnosti sa gasovima dok nije usavršena njegova proizvodnja i zaštita
- Čvrstoća 240-350 MPa, **legiranjem čvrstoća raste i 1400MPa, ali je skoro dvostruko lakši od čelika**
- Dobra plastičnost/duktilnost
- $E = 112.5\text{ GPa}$
- Stabilne osobine nekih legura do  $600^\circ\text{C}$
- Nemagnetičan
- Biokompatibilan
- **Skup** – oko 6 x skuplji od Al

# Titan - Ti

- Osobine:
  - netoksičan
  - biokompatibilan,
  - iako vrlo reaktivan ima odličnu **otpornost na koroziju** kada se formira stabilan oksid na površini ( $\text{TiO}_2$ ) koji ga štiti od daljeg napredovanja korozije
  - ima dobru otpornost na eroziju,
  - lako se boji,...
  - trenutno najpovoljniji odnos čvrstoća/gustina kod metala

Legure Ti se koriste za izradu

1. koroziono otporne opreme
2. konstrukcija visoke čvrstoće

# Poređenje Ti sa drugim metalima

## Poređenje Ti sa drugim metalima

### Osobine

Tt. °C

gustina, g/cm<sup>3</sup>

toplotna provodljivost

električna otpornost, μΩcm

toplotni kapacitet

koeficijent linearnog širenja x 10<sup>6</sup> /°C

Modul elastičnosti, GPa

| Ti     | Mg    | Al    | Fe    | Cu    |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1665   | 650   | 660   | 1535  | 1083  |
| 4.51   | 1.74  | 2.7   | 7.86  | 8.94  |
| 0.0407 | 0.35  | 0.57  | 0.17  | 0.92  |
| 55.4   | 4.40  | 2.68  | 10.0  | 1.72  |
| 0.126  | 0.245 | 0.211 | 0.109 | 0.093 |
| 8.9    | 25.7  | 24.0  | 11.9  | 16.4  |
| 112    | 45    | 72.5  | 200   | 122.5 |

dobre osobine

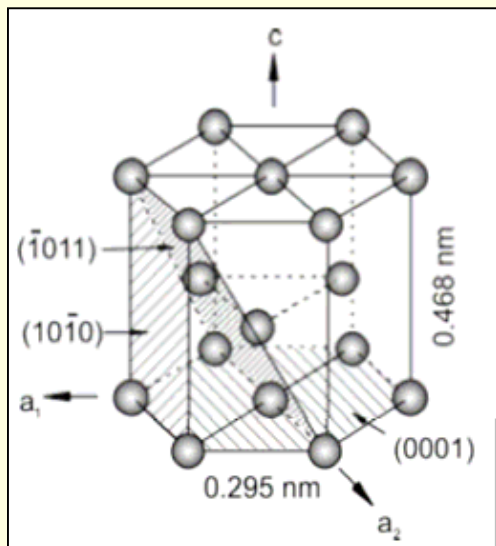
loše osobine

teško mogu da budu u sklopu  
jer se različito ponašaju  
pri zagrevanju/hlađenju

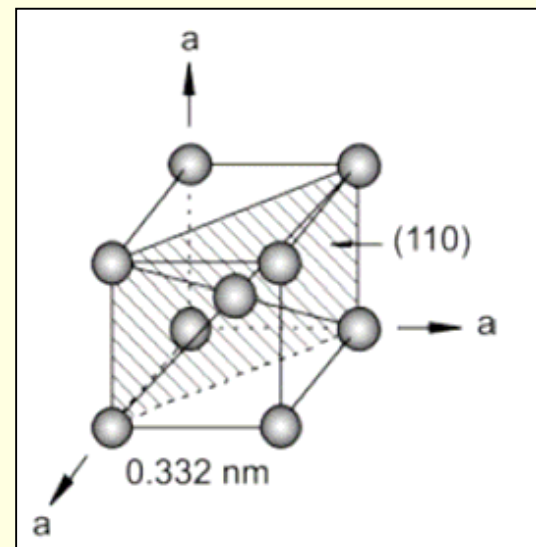
# Titan - polimorfija

**Titan je polimorfan – ima dve rešetke:**

- $\alpha$  rešetka – stabilna do  $882^{\circ}\text{C}$   
heksagonalna gusto pakovana rešetka HGP



- $\beta$  rešetka – stabilna iznad  $882^{\circ}\text{C}$   
kubna zapreminski centrirana rešetka KZC

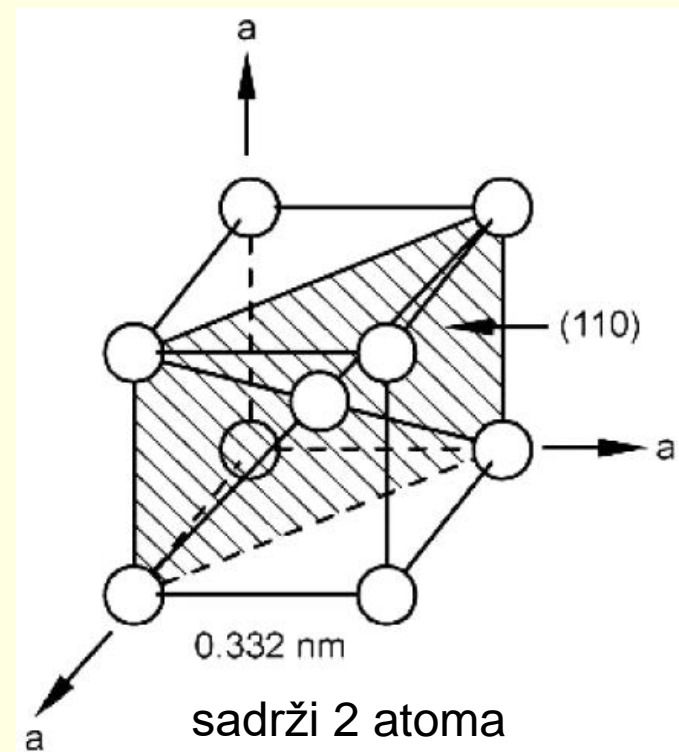
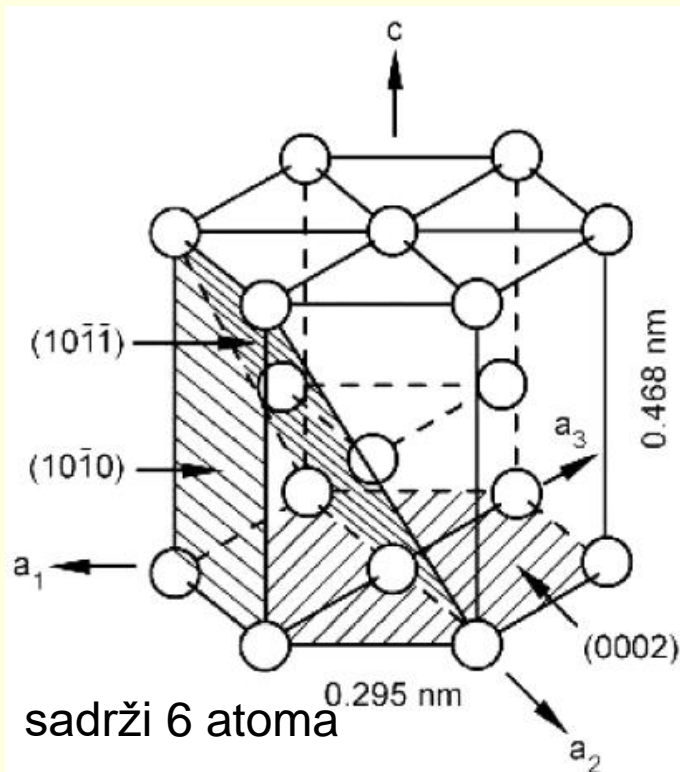


# Stabilnost faza

- $\alpha$  – faza je stabilna ispod  $882^{\circ}\text{C}$
- $\beta$  – faza je stabilna iznad  $882^{\circ}\text{C}$
- $882^{\circ}\text{C}$  je temperatura *fazne transformacije*

HGP -  $\alpha$  faza

KZC -  $\beta$  faza



# Legure Ti

- Primele N, C, O, povećavaju čvrstoću i tvrdoću, a smanjuju plastičnost, zavarljivost i otpornost na koroziju
- Ti apsorbuje gasove (posebno na  $T > 500^\circ\text{C}$  ali se oni i rastvaraju u njemu (dodatkom O, N  $\rightarrow$  raste  $2x$  HB $\uparrow$ ))
- Titan sa legirajućim elementima **gradi:**
  - **supstitucijske čvrste rastvore i**
  - **i intersticijske čvrste rastvore**

Legirajući elementi mogu da budu  $\alpha$  ili  $\beta$  stabilizatori:

$\alpha$  stabilizatori podižu temperaturu fazne transformacije iznad  $882^\circ\text{C}$

$\beta$  stabilizatori spuštaju temperaturu fazne transformacije

| $\alpha$ stabilizatori |                | $\beta$ stabilizatori |  |
|------------------------|----------------|-----------------------|--|
| intersticijski         | supstitucijski | intersticijski        | supstitucijski   |
| O, N, C                | Al, Pb         | H                     | Ag, Au, Nb, Cr, Co,<br>Cu, Fe, Mn, Mo, Ni,<br>Pd, Pt, Ta, W, V |

# Podela legura Ti

-Čist Ti na sobnoj T → samo  $\alpha$  – faza

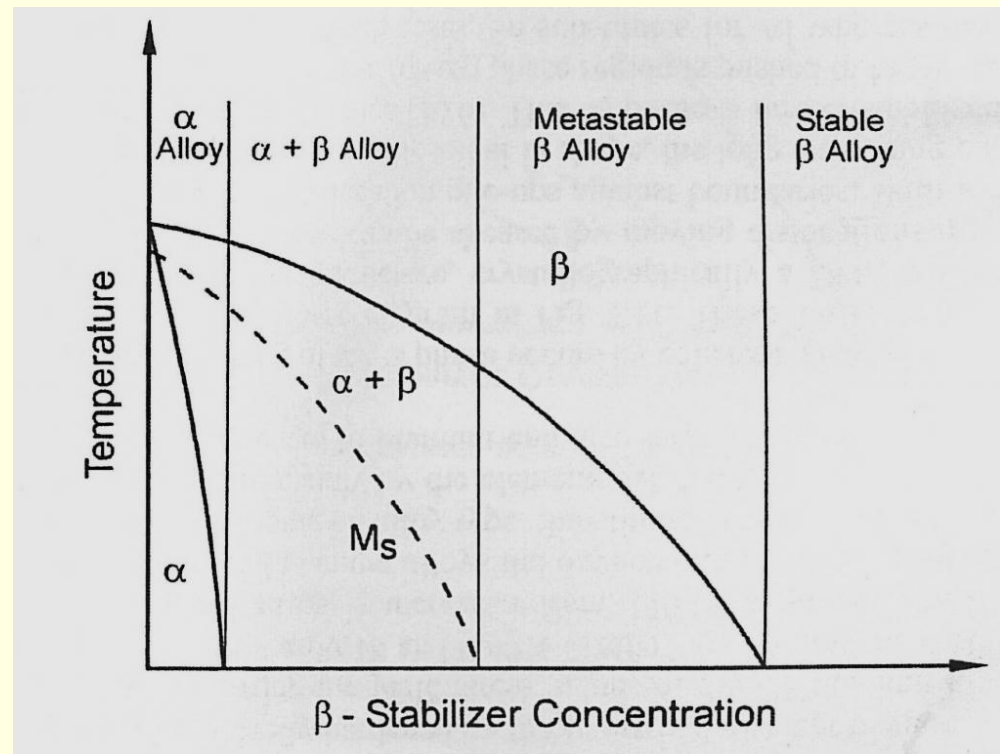
-Prisustvom  $\alpha$  –stabilizatora (i/ili mali sadržaj  $\beta$ -stabilizatora) → samo je  $\alpha$  – faza stabilna na sobnoj T → tzv.  $\alpha$  – **legure**

-Povećanjem sadržaja  $\beta$ -stabilizatora,  $\beta$  - faza postaje stabilna na sobnoj T i prvo se pojavljuje  $\alpha + \beta$  **područje**

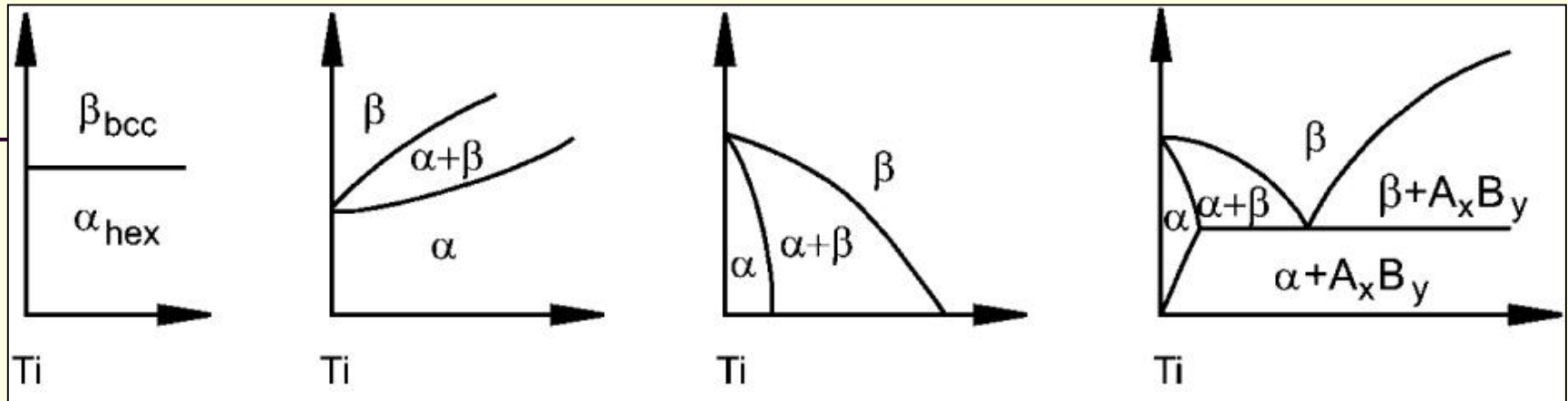
-Daljim povećanjem sadržaja  $\beta$ -stabilizatora,  $\alpha$  faza se *formira samo pod određenim uslovima* (npr. tokom žarenja ispod temperature transformacije) -

**metastabilne  $\beta$ -legure**

-Sa daljim porastom sadržaja  $\beta$ -stabilizatora temperatura početka fazne transformacije se spušta ispod sobne temperature - na sobnoj temperaturi stabilna je  $\beta$  faza -**stabilne  $\beta$ -legure**



# Uticaj legirajućih elemenata na T fazne transformacije



Neutralni

$\alpha$  - stabilizatori

$\beta$  - stabilizatori  
čvrstog rastvora

$\beta$  - stabilizatori  
eutektoidne reakcije

## Neutralni elementi – **Zr, Sn**

$\alpha$  – stabilizatori **Al, O, N, C** - podižu T fazne transformacije (proširuju  $\alpha$  oblast)

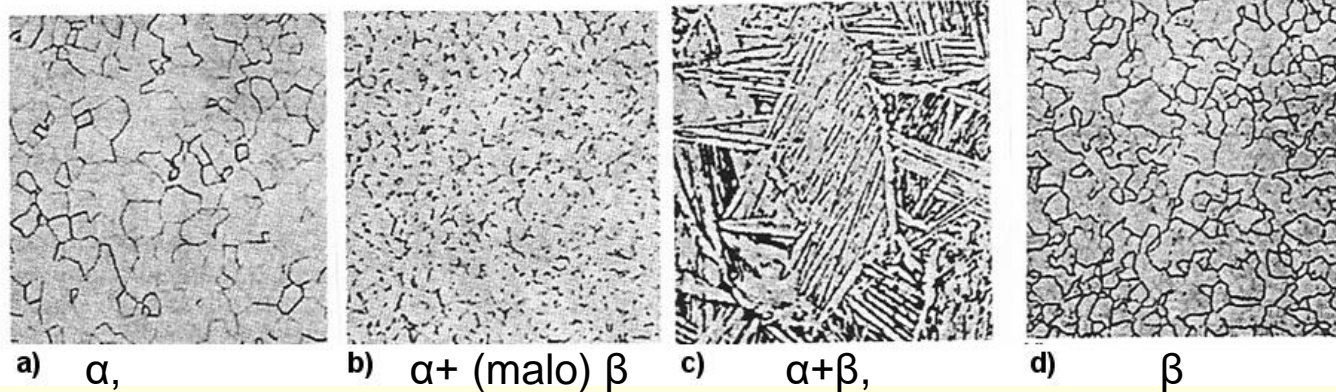
$\beta$  – stabilizatori čvrstog rastvora **Fe, Cr, Mo, Mn, V, Ta, Nb** snižavaju T fazne transformacije (proširuju  $\beta$  oblast)

$\beta$  – stabilizatori eutektoidne reakcije – **Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, H**  
utiču i na pojavu eutektoidne reakcije - stvaranje intermetalnih čestica  $A_xB_y$

# Podela i označavanje legura Ti

| Tip legure       | Oznaka         | % leg. elem.                 | Rm<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Re<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | A<br>[%] | Primena  |
|------------------|----------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------|--|
| čist Ti          | nelegiran      | -                            | 484                        | 414                        | 25       | kućišta mlaznih motora, koroziono otp. delovi proc. i nautičke opreme                            |
| $\alpha$         | Ti-5Al-2.5Sn   | 5% Al, 2,5% Ti               | 826                        | 784                        | 16       | lopaticice gasnih turbina, oprema za procesnu industriju   |
| $\alpha + \beta$ | Ti-6Al-4V      | 6% Al, 4% V                  | 947                        | 877                        | 14       | implanti visoke čvrstoće, strukturne komponente letelica   |
| $\alpha + \beta$ | Ti-6Al-6V-2Sn  | 6% Al, 2% Sn, 6% V, 0,75% Cu | 1050                       | 985                        | 14       | strukturne komponente mlaznih motora i lopaticice visoke čvrstoće                                |
| $\beta$          | Ti-10V-2Fe-3Al | 10% V, 2% Fe, 3% Al          | 1223                       | 1150                       | 10       | najbolji odnos čvrstoće i žilavosti od svih Ti legura, najodgovorniji delovi aero-kosm. letelica |

# Podela legura Ti



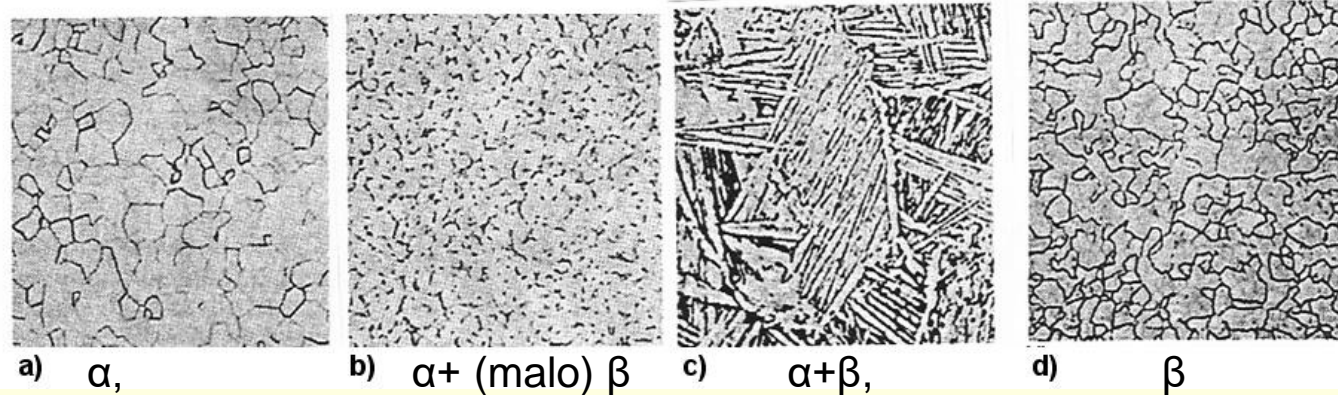
## $\alpha$ legure,

- legiraju se prvenstveno sa oko 3-8%Al, sadrže još i Sn i Zr,
- nisu za termičku obradu
- Stabilne na visokim T
- deformaciono ojačavaju
- imaju visoku čvrstoću i žilavost (700-900MPa)
- lako se zavaruju,
- otporne su na koroziju i puzanje.

## $\alpha + \beta$ legure,

- legirane su **Al + V, Mo, Cr**
- povećanje čvrstoće može da se postigne TO (kaljenje +starenje)
- **Rm = 1000-1400 MPa, A=16%,**
- Ograničena zavarljivost
- Najpoznatija legura iz ove grupe Ti-6Al-4V.

# Podela legura Ti



## ■ metastabilne $\beta$ legure,

- legirane **V, Nb, Cr**
- dobro se oblikuju u hladnom stanju i
- povećanje čvrstoće može da se postigne TO
- lako zavarljive

## ■ stabilne $\beta$ legure.

- najjači  $\beta$  stabilizatori su **Fe, Mo i V**
  - TO mogu da dobiju  $\alpha + \beta$  strukturu i tako da ojačaju
  - dobro se oblikuju u hladnom stanju.
- Primer  $\beta$  legure: **Ti-10V-2Fe-3Al** otporna na zamor

# Ojačavanje kod legura Ti

Glavni mehanizmi ojačavanja legura Ti su:

1. intersticijskim čvrstim rastvorom
  2. supstitucijskim čvrstim rastvorom
  3. čestično ojačavanje
  4. deformaciono ojačavanje
  5. ojačavanje faznom transformacijom
1. Primer **intersticijskog ojačavanja** je rastvaranje kiseonika (O)
    - Povećanjem sadržaja O u tehnički čistom Ti sa 0.18% na 0.4 %, čvrstoća raste sa 180 MPa na 480 MPa (!)
    - Uobičajen sadržaj kiseonika u komercijalnim legurama Ti je **0.08 – 0.20 %** jer viši sadržaj kiseonika izaziva krtost

# Ojačavanje kod legura Ti

---

## 2. Ojačavanje **supstitucijskim čvrstim rastvorom**

- $\alpha$ -stabilizatori koji formiraju supstitucijski čvrsti rastvor (Al) ojačavaju  $\alpha$ -fazu (legura Ti-5Al-2.5Sn  $\rightarrow$  800 MPa)
- Neki potpuno rastvorljivi  $\beta$ -stabilizatori ojačavaju  $\beta$ -fazu (Mo, Fe, Ta), dok drugi imaju zanemarljiv uticaj (Nb)

## 3. **Intermetalne čestice** (čestično ojačavanje)

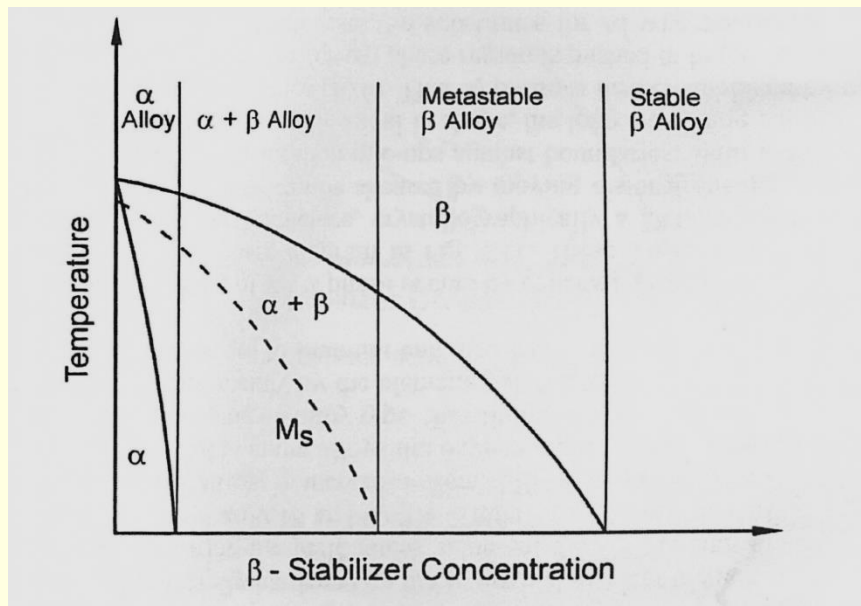
- Aluminidi, nitridi, carbidi, silicidi, ...

## 4. **Deformaciono ojačavanje i rafinacija zrna**

- Plastičnom deformacijom, tj. oblikovanjem (ekstruzijom, kovanjem, itd) raste gustina dislokacija i čvrstoća

## 5. Ojačavanje faznom transformacijom $\beta \rightarrow \alpha$

- Titan ima martenzitnu transformaciju!
- Martenzitna transformacija je moguća kod:  
 $\alpha + \beta$  legura i nekih  $\alpha$ -legura (vidi idijagram)
- Kod metastabilnih  $\beta$ -legura kao proizvod transformacije izdvajaju se  $\alpha$ -čestice
- $\beta$ -legure nemaju martenzitnu transformaciju ali TO mogu da postignu  $\alpha + \beta$  strukturu

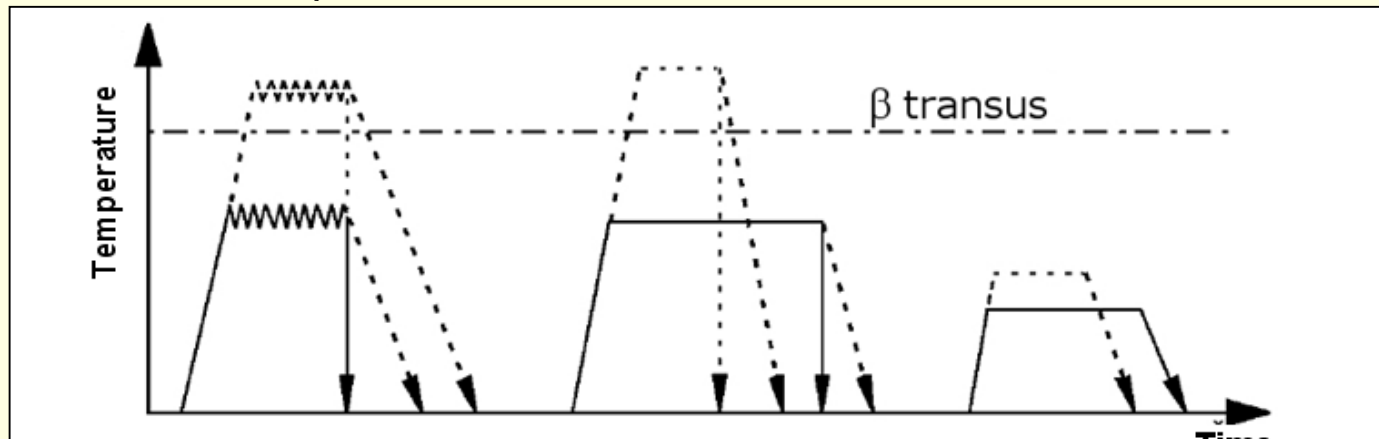


# Termička obrada (TO) legura Ti

- TO se izvodi zbog:
  1. TO1 - smanjenja zaostalih napona - iz proizvodnje
  2. TO2 - žarenje kojim se postiže duktilnost i dimenziona i strukturna stabilnost posebno kod  $\alpha+\beta$  legura
  3. TO3 - povećanje čvrstoće rastvarajućim žarenjem i starenjem (martenzitna transformacija za  $\alpha+\beta$  legure, a metastabilne  $\beta$  legure čestično ojačavanje)
  4. TO4 - optimizacija specijalnih svojstava – puzanje, zamor, žilavost loma
  
- Za legure Ti prema strukturi se koriste sledeće TO:
  - $\alpha$  legure – ne menjaju se značajno sa TO tako da se izvodi TO1 i TO2.
  - $\alpha+\beta$  legure TO2 i TO3
  - $\beta$  legure (metastabilne) TO1, TO2 i TO3,

# TO3 – martenzitna transformacija

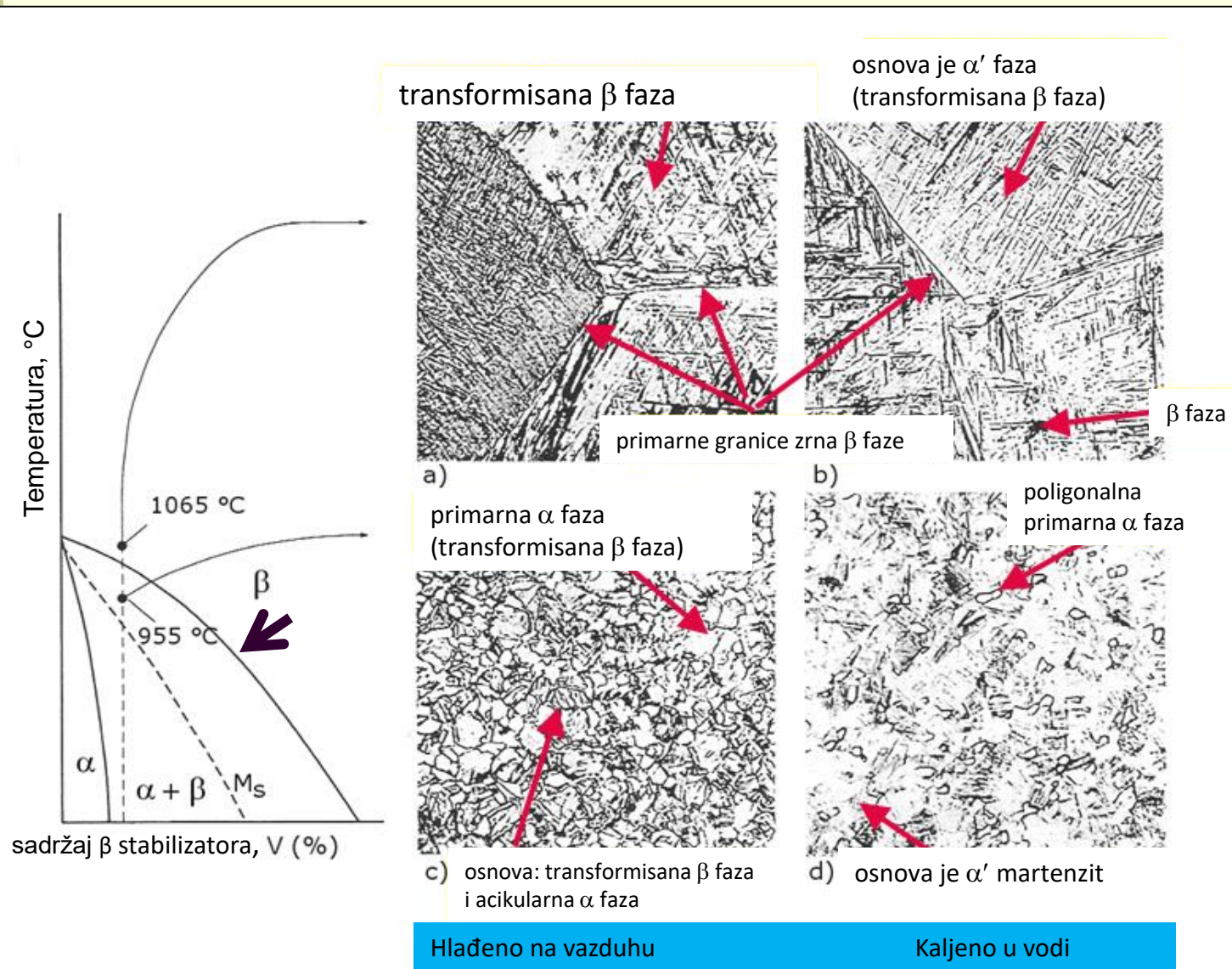
- Martenzitna transformacija se postiže zagrevanje do  $\beta$ -oblasti (850...950 °C) i brzim hlađenjem (kaljenje)
- Nakon toga sledi starenje (450-600 °C)
- Dodatno je moguće otvrdnuti površinu nitriranjem (750-900 HV)



deformacija    rastvarajuće žarenje    otpuštanje

**Povećanja sadržaja  $\beta$  stabilizatora utiče na sniženje temperature transformacije  $\alpha - \beta$ : niže temperature TO**

# Uticaj povećanja sadržaja V ( $\beta$ stabilizatora) na sniženje temperature transformacije $\alpha - \beta$



# Martenzit kod legura Ti

---

- Martenzit kod legura titana je rezultat brzog hlađenja
- Tokom starenja martenzit se razlaže na  $\alpha$  i  $\beta$  fazu

Postoje **3 vrste** martenzita kod Ti:

- **HGP** - martenzit  $\alpha'$  nastaje pri nižim sadržajima  $\beta$  stabilizatora, kao što su Mo i V
- **Ortorombični** - martenzit  $\alpha''$ , nastaje pri višim sadržajima  $\beta$ , duktilniji
- **KPC** - martenzit  $\alpha''$  - samo u legurama sa Mo, V i Al.

# Cirkonijum i legure cirkonijuma

# Cirkonijum - Zr

- Zr - otkriven 1789 u Nemačkoj – grupa prelaznih metala
- $T_f = 1855 \text{ }^\circ\text{C}$  – refraktorni metal (prema široj klasifikaciji)
- $\rho = 6.51 \text{ g/cm}^3$  lakši od čelika i Cu
- U prirodi **18. najzastupljeniji element**
- Biokompatibilan
- Nemagnetičan
- Zavarljiv (TIG od konvencionalnih postupaka)
- **Mala apsorpcija neutrona pogodan za nuklearnu industriju.**
- **Otporan na zamor** – takođe bitno zbog nuklearki
- Dobra mehanička svojstva na visokim temperaturama.
- Jedna od najvažnijih osobina Zr je izuzetna otpornost na koroziju u širokom spektru agresivnih sredina, posebno u prisustvu vode i pare, zbog **formiranja zaštitnog oksidnog filma na površini.**
- **Skup**

# Osobine Zr

- Zr je relativno mek materijal u svom čistom obliku, **Rm=330 do 600 MPa**, ali se koristi tamo gde je potrebna otpornost na koroziju i visoke temperature.
- **Legure cirkonijuma** (npr. Zr-2, Zr-4): **Rm= 500-800 MPa**.
- **Tvrdoća: 120-160 HV** i viša uz dodatak Nb i Cr
- Veoma duktilan metal, **A=30-50%** što ga čini pogodnim za hladnu obradu, kovanje i izvlačenje. Duktilnost mu se malo smanjuje legiranjem
- **Modul elastičnosti** iznosi oko **97 GPa**, što je niže od čelika (210 GPa), ali slično kao kod drugih lakih metala poput Ti i Al.
- **Otpornost na visoke temperature**: dobre osobine na visokim temperaturama do oko **800-1000 °C**.
- **Legure cirkonijuma** koje se koriste u nuklearnim reaktorima mogu izdržati **dugotrajno izlaganje visokim temperaturama bez značajne degradacije mehaničkih osobina**.

# Cirkonijum - Zr

---

Primena legura i čistog Zr:

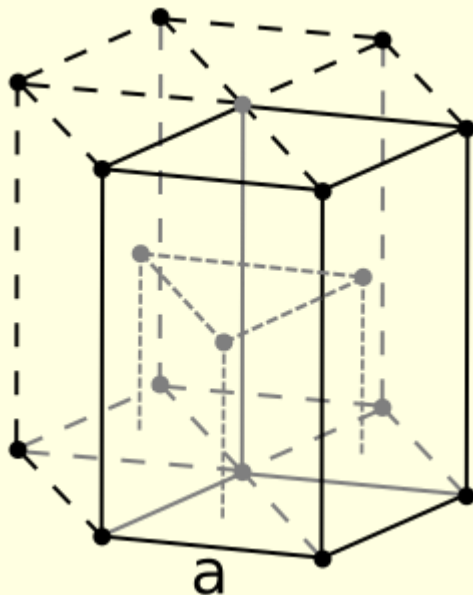
- **Nuklearna industrija:** Koristi se za oblaganje radioaktivnih šipki (gorivo) u nuklearnim reaktorima zbog niske apsorpcije neutrona i otpornosti na koroziju.
- **Procesna industrija:** Zr legure su otporne na koroziju u kiselim sredinama pa se koriste u procesnoj industriji.
- **Medicinska tehnika:** Zbog svoje biokompatibilnosti, koristi se za izradu zubnih i ortopedskih implantata.
- **Aerokosmotehnika:** Cirkonijum se koristi za izradu delova zbog visoke otpornosti na koroziju i visoke temperature.

# Cirkonijum - polimorfija

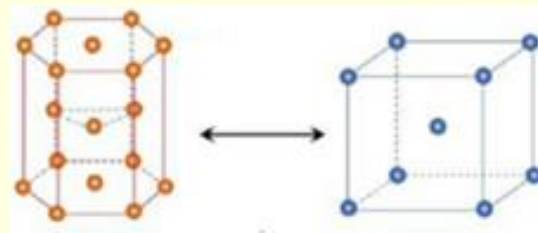
**Zr je polimorfan kao Ti – ima dve rešetke i faznu transformaciju:**

■  $\alpha$  rešetka – stabilna do  $860^{\circ}\text{C}$   
heksagonalna gusto pakovana rešetka HGP

■  $\beta$  rešetka – stabilna iznad  $860^{\circ}\text{C}$   
kubna zapreminski centrirana rešetka KZC

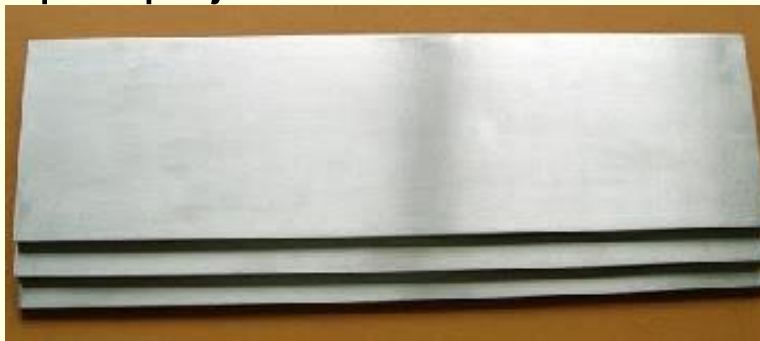


- Tokom termičke obrade legura Zr, dolazi do fazne transformacije, što utiče na mehaničke osobine legure
- Legiranjem se stabilišu određene faze
- Slično kao kod Ti legure, moguće kaljenje



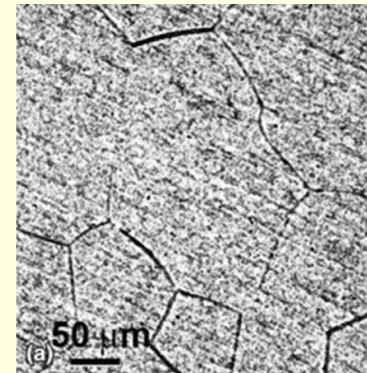
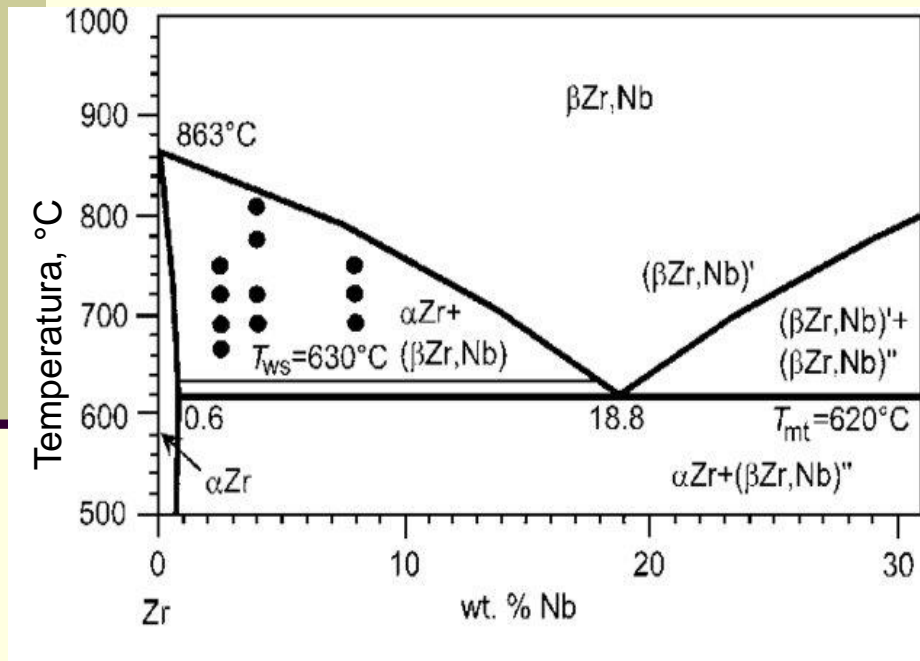
# Podela legura cirkonijuma prema EN

- **Čisti cirkonijum (Zr)** Zr visoke čistoće sa minimalnim sadržajem nečistoća
  - Koristi se u industriji gde su potrebna izuzetno visoka otpornost na koroziju i minimalna apsorpcija neutrona, kao što su nuklearni reaktori i u hemijskoj industriji
  - EN oznake za čisti cirkonijum označavaju visok stepen čistoće bez značajnih dodataka legirajućih elemenata
- **Cirkonijum-Niobijum (Zr-Nb) legure** -EN oznaka: Zr702 (nema Nb) i Zr705 (ASTM) koji se koriste u nuklearnoj industriji. Koristi se u reaktorima jer zadržava stabilnost na visokim temperaturama i ima nisku apsorpciju neutrona.

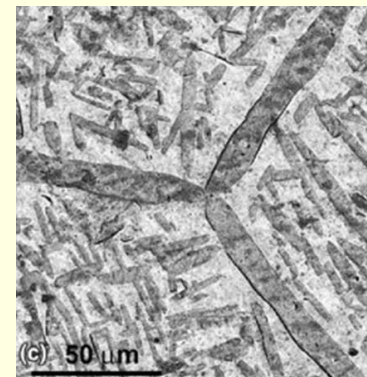


# Legure Zr

- Zr sa 2,5% Nb zbog visoke čvrstoće ( $R_m=650\text{MPa}$ ), otpornosti na puzanje i otpornosti na zračenje koristi se u nuklearnoj industriji i za cevovode.



Legura sa 8%Nb  
žarena na 660°C

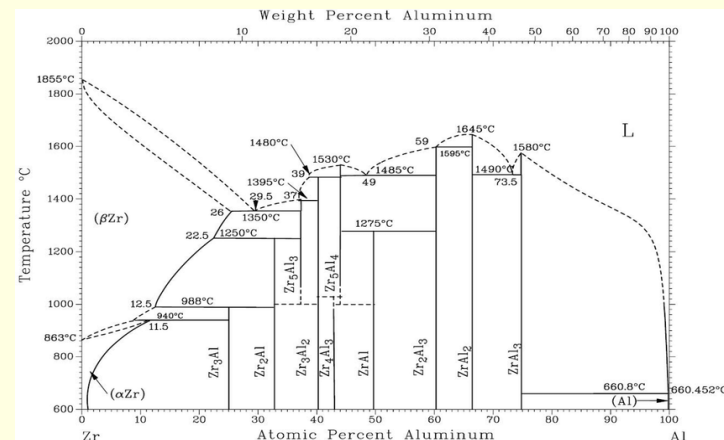


Legura sa 4%Nb  
žarena na 720°C

$\beta$  Zr svetla faza  
 $\alpha$  Zr tamna faza

# Podela legura cirkonijuma prema EN

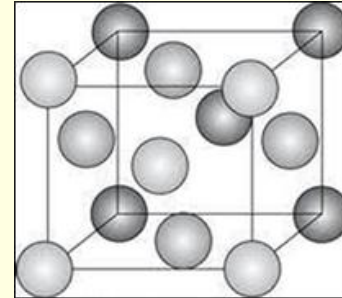
- **Zr-Hf legure** - nisu striktno standardizovane u EN.
- **Zr sa dodatkom Sn, Fe, Ni i Cr -legure sa poboljšanim osobinama.** Najčešće se koriste u nuklearnim reaktorima zbog visoke otpornosti na koroziju i niske apsorpcije neutrona.
  - Npr. Zircaloy-2 (Zr+male količine Sn, Fe, Cr i Ni) i Zircaloy-4 (Zr+Sn, Fe, Cr, bez Ni) imaju  $R_m=500-600$  MPa, visoku otpornost na koroziju i zamor
- **Legure Zr + Al**, imaju visoku čvrstoću, otpornosti na koroziju i malu gustinu, nalazi široku primenu u vazduhoplovnoj, automobilskoj i medicinskoj industriji.



# Nikl i njegove legure

# Tehnički čist Ni

- Otkriven 1751 u Švedskoj
- $\rho = 8.908 \text{ g/cm}^3$
- $T_t = 1453^\circ\text{C}$
- Ni ima KPC rešetku do temperature topljenja - nije polimorfan
- Ni je magnetičan (još i Fe i Co) do  $T_{\text{Kiri}} = 345^\circ\text{C}$ , a iznad Kiri temperature je nemagnetičan
- Osnova za mnoge legure (a posebno za superlegure)



# Tehnički čist Ni i niskolegirani Ni

---

- Dobra svojstva su mu:
  - dobre mehaničke i električne osobine
  - otpornost na koroziju,
  - vatrootpornost (otpornost na oksidaciju na visokim temperaturama),
  - čvrstoća na visokim temperaturama i
  - otpornost na puzanje.
- Primena:
  - u prehrambenoj, hemijskoj i naftnoj industriji,
  - parnim i gasnim turbinama, avio tehnici, termoelktranama
  - industrijskim pećima za električne otpornike,
  - u elektronici i drugim granama tehnike.

# Tehnički čist Ni

- Tehnički čist Ni:  $R_e=148$  MPa,  $R_m= 462$  MPa i  $A=47$  %
- Relativno niska čvrstoća raste:
  - legiranjem,
  - termičkom obradom (nije moguće usitniti zrno TO) i
  - hladnom plastičnom deformacijom (tako je moguće usitniti zrno).
- Zbog austenitne strukture poseduje dobru zavarljivost
- **Ograničen je sadržaj ugljenika - max 0,02%C (pri većem sadržaju C se izdvaja grafit koji smanjuje duktilnost)**

# Klasifikacija legura Ni

- Podela prema mehanizmima ojačavanja:
  - Legure ojačane čvrstim rastvorom
  - Taložno ojačane legure (starenjem) –  
(TO kao kod legura Al - rastvarjuće žarenje+hlađenje+starenje)
  - Disperzno ojačane legure oksidima, karbidima,...

Tipični primeri legura koje grade **supstitucijske čvrste rastvore**

| Tip        | Primer sastava | Naziv       |
|------------|----------------|-------------|
| Ni 99-99,8 | 99,5Ni         | Nikl        |
| Ni-Cu      | 66,5Ni31,5Cu   | Monel 400   |
| Ni-Cr      | 76Ni16Cr8Fe    | Inconel 600 |
| Ni-Cr-Fe   | 32,5Ni21Cr46Fe | Inconel 800 |
| Ni-Mo      | 61Ni28Mo2,5Co  | Hastelloy B |
| Ni-Cr-Mo   | 54Ni15,5Cr16Mo | Hastelloy C |
| Ni-Si      | 82Ni9Si3Cu     | Hastelloy D |

# Klasifikacija legura Ni

---

Prema ISO TR 15608 nikel i njegove legure se dele na:

- Grupa 41: Čist nikel
- Grupa 42: Ni-Cu- legure MONEL
- Grupa 43: Ni-Cr – legure INCONEL
- Grupa 44: Ni-Mo-legure HASTALLOY (dodatak Cr)
- Grupa 45: Ni-Fe-Cr –legure INCOLOY
- Grupa 46: Ni-Cr-Co-legure
- Grupa 47: Ni-Fe-Cr-Cu
- Grupa 48: Ni-Fe-Co –legure

Dobru zavarljivost imaju legure: Ni-Cu (42), Ni-Fe-Cr (45) i Ni-Mo (44)

# Uticaj legirajućih elemenata na Ni

Ni - može da rastvori supstitucijski veliku količini legirajućih elemenata Cu, Cr, Fe, Mo i W.

- **Cu** – podiže otpornost prema kiselinama
- **Cr** - povećava otpornost prema **oksidaciji na visokim T** (formira pasivni sloj na površini)
  - moguće do 50% Cr, uobičajeno **15-30 %Cr**;
- **Fe** – primarno smanjuje cenu Ni legura
  - Prihvatljivo je više od 50%Fe, čime se podiže otpornost na  $H_2SO_4$  (i dalje se ubrajaju u legure Ni)
  - **povećava rastvorljivost C↑** i otpornost prema obogaćivanju površinskih slojeva ugljenikom na visokim T (glavni problem kod legura Ni)

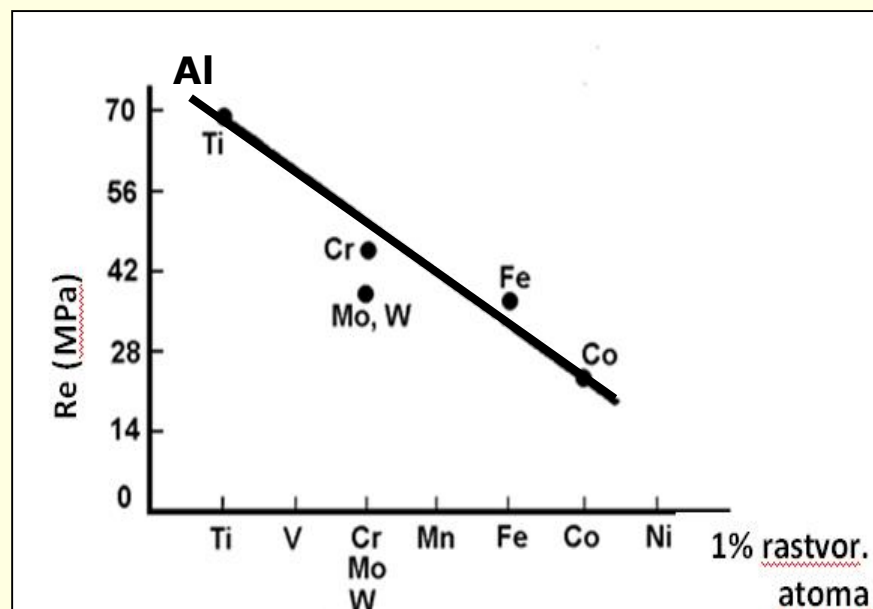
# Uticaj legirajućih elemenata na Ni

- **Co – podiže otpornost na S**
  - povećava rastvorljivost C u Ni;
- **Mo, W – podižu otpornost na kiseline i visoke T.**
  - Sa 28 % Mo (Hastelloy B) legura je otporna i na 60% koncentracije kiselina.
- **Si – potiče iz procesa dezoksidacije stabilizuje karbide i nepoželjna intermetalna jedinjenja – ali u slučaju kada se traži otpornost na toplu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Si je glavni legirajući element koji obezbeđuje ovu otpornost;**
  - 9-11%Si sadrže legure za livenje i ne obrađuje se mehanički.

## Legure Ni ojačane supstitucijskim čvrstim rastvorom (neke su superlegure)

- legirajući elementi grade supstitucijske čvrste rastvore sa Ni

- MONEL Ni-Cu
- INCONEL Ni-Cr
- HASTALLOY Ni-Mo-Cr
- INCOLOY Ni-Cr-Fe



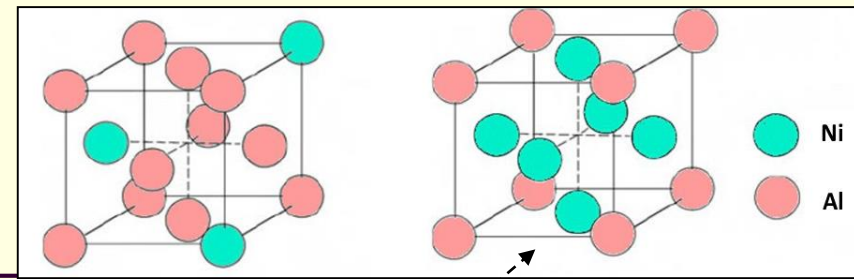
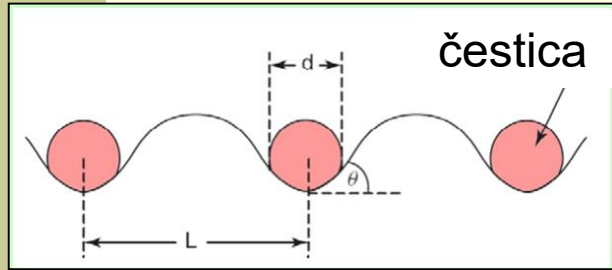
Uticaj dodatka 1% legirajućeg elementa u superlegurama na porast napona tečenja

- Koroziono postojane
- Toplotno postojane
- Lako zavarljive
- Srednje čvrstoće

# Ni-Cu legure (MONEL)

- U upotrebi od početka 20 veka (1901) International Nickel Company (INCO)
- **Sadrže do oko 65% Ni, a najpoznatija Monel legura je sa ~30%Cu,**
- Moneli se koriste kao antikorozijske legure u prehrambenoj i hemijskoj industriji u kojim nisu dovoljno otporni nerđajući čelici
- Takođe: cevi, pumpe, limovi, ventili, razmenjivači, brodogradnja

| Mehaničke osobine | 90Ni-10Cu | 70Ni-30Cu |
|-------------------|-----------|-----------|
| Re (MPa)          | 140       | 170       |
| Rm (MPa)          | 320       | 420       |
| A (%)             | 40        | 42        |



## Taložno ojačane legure Ni

- Legure sa Al, Ti i/ili Nb

- Taložno ojačane česticama  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$  koje su najpovoljnije kao koherentni talog
- **TO rastvarajuće žarenje+brzo hlađenje+starenje**
- Izrazito otporne na puzanje do  $1000^\circ\text{C}$
- Ograničena zavarljivost

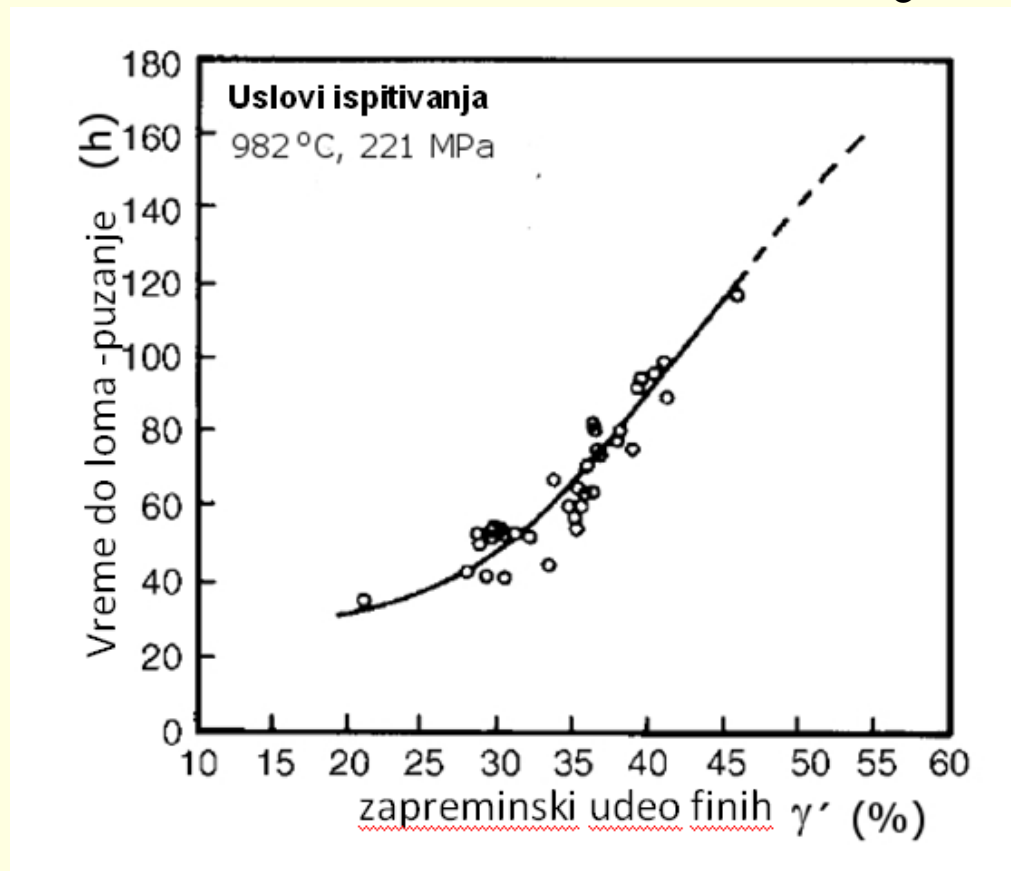
KPC rešetka  $\gamma$  osnove (čvrsti rastvor levo) i  $\gamma'$  čestica (desno) kojima taložno ojačava legura

## Disperzno ojačane legure Ni

- Dodaju se čestice tipa oksida, karbida, itd. – takođe čestično ojačane.
- Otporne na puzanje do  $\sim 1200^\circ\text{C}$
- Nisu zavarljive

## Puzanje - taložno ojačane legure Ni

- Taložno ojačane legure česticama  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$



Otpornost na puzanje raste sa povećanjem udela finih  $\gamma'$  čestica



# Superlegure

# Superlegure generalno

- legure na bazi Fe-Ni ( $\rho=7.9-8.3 \cdot \text{g/cm}^3$ )
- legure na bazi Co ( $\rho= 8.3-9.4 \cdot \text{g/cm}^3$ )
- legure na bazi Ni ( $\rho= 7.8-8.9 \cdot \text{g/cm}^3$ )
- Ni + Al+ Ir + Rh (gustina  $8.5-12.4 \cdot \text{g/cm}^3$ ) 4. generacija

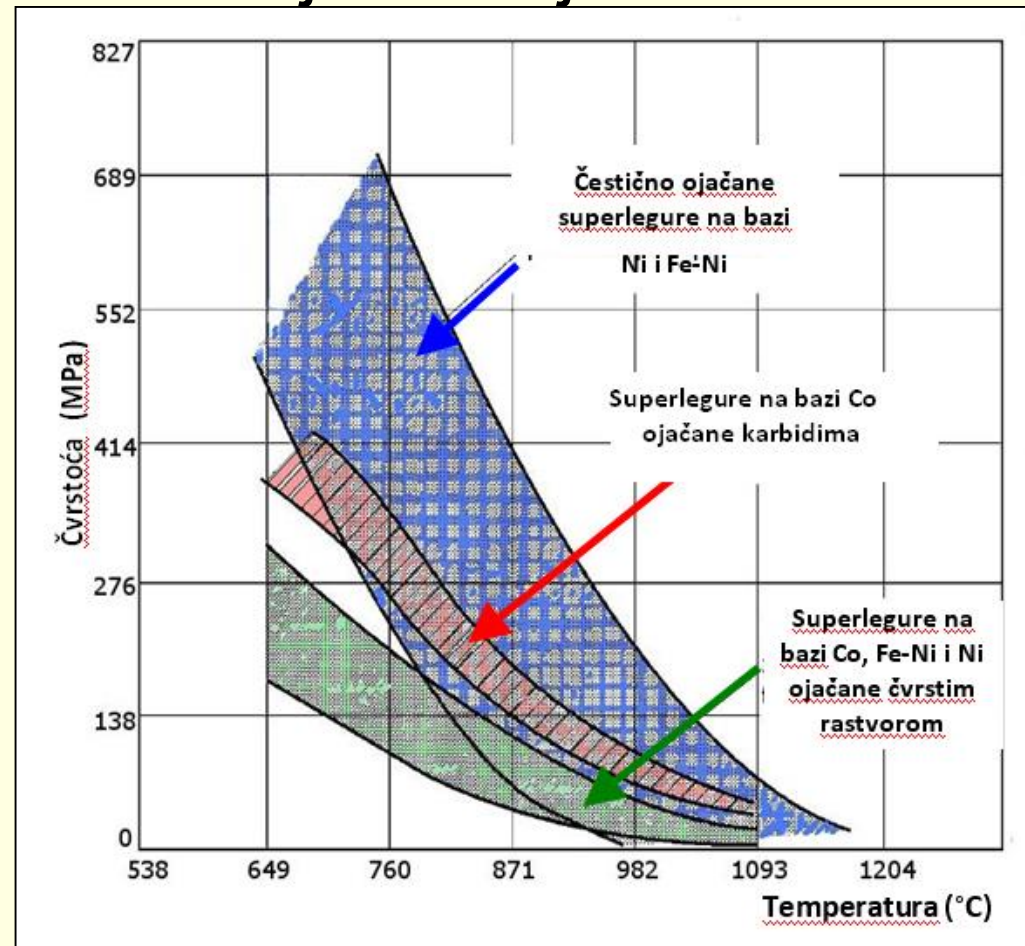
**Iridijum** (lat. iris - duga)  
najotporniji metal na koroziju  
KPC rešetka  
 $\rho=22.56 \text{ g/cm}^3$   
HV=1760 MPa  
E=528 GPa

**Rodijum** (gr. rodon – ruža)  
plemeniti metal  
KPC rešetka  
 $\rho=12.45 \text{ g/cm}^3$   
HV=246 MPa  
E=275 GPa

# Superlegure generalno

## Podela prema mehanizmima ojačavanja:

- Legure ojačane čvrstim rastvorom
- Taložno ojačane legure (starenjem)
- Disperzno ojačane legure oksidima, karbidima,...



# Glavni legirajući elementi superlegura

## Fe-Ni

| Element | Ni   | Fe    | Ti  | Al    | Mo  | Co   | Cr   | Nb  | W     | C     |
|---------|------|-------|-----|-------|-----|------|------|-----|-------|-------|
| %       | 9-44 | 29-67 | 0-3 | 0.3-1 | 0-3 | 0-20 | 0-25 | 0-5 | 0-2.5 | <0.35 |

## Co

| Element | Co    | Ni   | Ti  | Al    | Mo   | Fe   | Cr    | Nb  | W    | C   |
|---------|-------|------|-----|-------|------|------|-------|-----|------|-----|
| %       | do 62 | 0-35 | 0-3 | 0-0.2 | 0-10 | 0-21 | 19-30 | 0-4 | 0-15 | 0-1 |

## Ni

| Element | Ni      | Ti  | Al  | Mo   | Co   | Cr   | Nb    | W    | C     |
|---------|---------|-----|-----|------|------|------|-------|------|-------|
| %       | 37-79.5 | 0-5 | 0-6 | 0-28 | 0-20 | 5-22 | 0-5.1 | 0-15 | <0.30 |

+ Zr, La, Mn, Si, Cu, B, Ce, Mg, V, Ta, Hf

# Glavni legirajući elementi superlegura

| Uloga legirajućih elemenata kod superlegura |                   |                           |                             |
|---|-------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Efekat                                      | na bazi Fe-Ni     | Na bazi Co                | Na bazi Ni                  |
| Ojačavaju č.r.                              | Cr, Mo            | Nb, Cr, Mo, Ni, W, Ta     | Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta, Re   |
| $\gamma$ stabilizatori                      | <u>C, W, Ni</u>   | Ni                        | ...                         |
| Karbidoobrazujući                           |                   |                           |                             |
| MC  | Ti                | Ti                        | W, Ta, Ti, Mo, Nb, Hf       |
| $M_7C_3$                                    | ...               | Cr                        | Cr                          |
| $M_{23}C_6$                                 | Cr                | Cr                        | Cr, Mo, W                   |
| $M_6C$                                      | Mo                | Mo, W                     | Mo, W, <u>Nb</u>            |
| Karbinitridi M(C, N)                        | C, N              | C, N                      | C, N                        |
| Pomažu izdvajanje karbida                   | P                 | ...                       | ...                         |
| obrazuju $\gamma'$ $Ni_3(Al, Ti)$           | Al, Ni, Ti        | ...                       | Al, Ti                      |
| Odlažu formiranje $h-Ni_3Ti$                | Al, <u>Zr</u>     |                           |                             |
| Podižu solvus T za $\gamma'$                | ...               | ...                       | Co                          |
| čestično i intermetalno ojačavanje          | Al, Ti, <u>Nb</u> | <u>Al, Mo</u> , Ti, W, Ta | Al, Ti, <u>Nb</u>           |
| otpornost na oksidaciju                     | Cr                | Al, Cr                    | Al, Cr, Y, La, <u>Ce</u>    |
| Otpornost na koroziju na visokim T          | La, Y             | La, Y, <u>Th</u>          | La, <u>Th</u>               |
| Otpornost prema sulfidizaciji               | Cr                | Cr                        | Cr, Co, Si                  |
| Podižu otpornost na puzanje                 | B                 | ...                       | B, Ta                       |
| Podižu čvrstoću                             | B                 | B, <u>Zr</u>              | B                           |
| Rafinišu vel.zrna                           | ...               |                           | B, C, <u>Zr</u> , <u>Hf</u> |

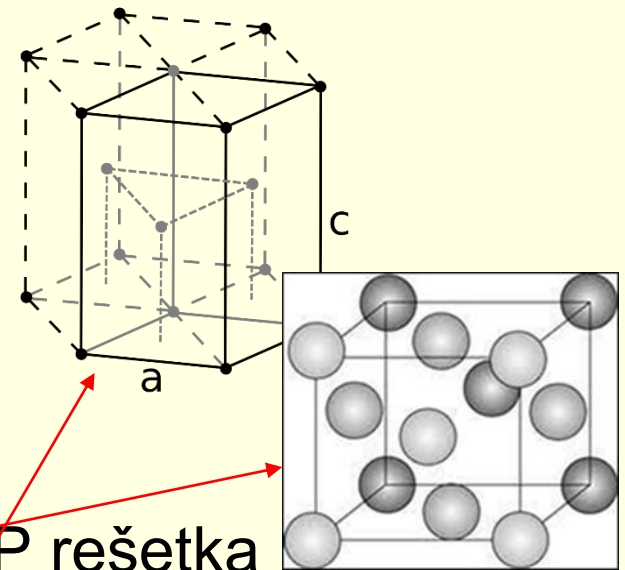
# Superlegure na bazi Ni mehanizmi ojačavanja

- Najvažnije **osobine superlegura**:
  - otpornost na visok temperaturno puzanje,
  - otpornost na oksidaciju i koroziju,
  - otpornost na zamor i
  - stabilnost faza.
- Otpornost na visoke T se postiže:
  - ojačavanjem čvrstog rastvora  $\gamma$  (austenitna faza) i
  - ojačavanje taloženjem faze  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub> (Al, Ti, Nb),
  - ojačavanje dispergovanim karbidnim i oksidnim česticama.
- **Otpornost na oksidaciju i koroziju u Ni superlegurama zasniva se na legiranju Al i Cr**, koji formiraju zaštitni sloj oksida Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- Drugi legirajući elementi: Co, Fe, V, V, Nb, Ta, B, Zr, Mg, Ti, Mo daju ostale osobine.
- **Fazna stabilnost Ni superlegura je povezana elektronskom konfiguracijom atoma Ni.**

# Kobalt i njegove legure

# Generalne osobine Co i legura na bazi Co

- $T_f = 1495^\circ\text{C}$
- $\rho = 8.83 \text{ g/cm}^3$
- Izuzetno magnetičan  $T_{\text{kiri}} = 1130^\circ\text{C}$
- Polimorfan:
  - HGP na  $T < 421^\circ\text{C}$
  - KPC na  $T > 421^\circ\text{C}$
- Legiranjem se stabilizuje ~~KPC~~ ili HGP rešetka
- Otporan na oksidaciju i koroziju
- Stabilan na visokim T i otporne na puzanje do  $1000^\circ\text{C}$
- Biokompatibilan
- Legure  $R_m = 450\text{-}700\text{MPa}$



# Generalne osobine Co i legura na bazi Co

- Legure Co ojačavaju hladnom deformacijom
- Najvažniji legirajući element **Cr** - dodaje se **20 – 30%** u cilju podizanja otpornost na oksidaciju i koroziju na visokim T.
- Cr može da ojačava čvrstim rastvorima i čestično
- Ojačavanje čvrstog rastvora sa Ta, W, Nb, Mo
- Primena:
  - Avio industrija – superlegure
  - Alati i zaštita od habanja
  - Medicinski uređaji

# Generalne osobine Co i legura na bazi Co

- Prve legure Co- Cr i Co-Cr-W patentirane 1900-ih
- Trgovački nazivi (**Stellite**, Haynes od Haynes Corp.).
- **Uglavnom su legure Co superlegure** – otporne na oksidaciju i stabilne na visokim T
  - **Hastelloy**: Co sa visokim udelom Ni i Mo. Otporna na koroziju, koristi se u hemijskoj industriji.
  - **MAR-M**: sa dodatkom Cr, W i Mo - za lopatice gasnih turbina.
  - **X-40 i X-45**: otporne na visoke temperature, pogodne za upotrebu u ekstremnim uslovima.
- Legure **otporne na koroziju i habanje**
  - Steliti – visok sadržaj Cr, C, W i Mo
- Legure za izradu trajnih magneta
  - Alnico – Al+Ni+Co
- Medicinske legure – npr. Co-Cr-Mo za ortopetske implante

# Sastav i primena legura na bazi Co

|                    | Co   | Ni   | Cr   | Al | Ti   | Mo  | W    | Ta  | B     | Zr    | C    | Other           |
|--------------------|------|------|------|----|------|-----|------|-----|-------|-------|------|-----------------|
| <b>FSX-414</b>     | Bal. | 10.5 | 29.5 | –  | –    | –   | 7    | –   | 0.012 | –     | 0.25 | 2 Fe            |
| <b>Stellite 21</b> | Bal. | 2    | 28   | –  | –    | 5.5 | –    | –   | –     | –     | 0.3  | –               |
| <b>Stellite 31</b> | Bal. | 10   | 20   | –  | –    | –   | 15   | –   | –     | –     | 0.1  | –               |
| <b>MarM302</b>     | Bal. | –    | 21.5 | –  | –    | –   | 10   | 9   | 0.005 | 0.015 | 0.85 | –               |
| <b>MarM509</b>     | Bal. | 10   | 23.4 | –  | 0.25 | –   | 7    | 3.5 | –     | 0.35  | 0.6  | –               |
| <b>Haynes-188</b>  | Bal. | 22   | 22   | –  | –    | –   | 14.5 | –   | –     | –     | 0.1  | 3 Fe*<br>0.90La |

|                    | Primena                                      |
|--------------------|--|
| <b>FSX-414</b>     | Gasne turbine                                |
| <b>Stellite 21</b> | Otpornost na habanje                         |
| <b>Stellite 31</b> | Otpornost na habanje                         |
| <b>MarM302</b>     | Lopatice mlaznih motora                      |
| <b>MarM509</b>     | Lopatice mlaznih motora                      |
| <b>Haynes-188</b>  | Bolja otpornost na oksidaciju od Hastelloy X |

\*max

Sastav: Co, Ni, Cr, W

# Legura na bazi Co

---

- **Superlegure na bazi kobalta**
- Najvažniji legirajući element **Cr - dodaje se 20 – 30%** u cilju podizanja otpornost na oksidaciju i koroziju na visokim T.
- Cr može da ojačava čvrstim rastvorima i čestično
- Ojačavanje čvrstog rastvora sa Ta, W, Nb, Mo
- Primena:
  - Avio industrija – superlegure
  - Alati i zaštita od habanja
  - Medicinski uređaji

# Poređenje sa legurama Ni

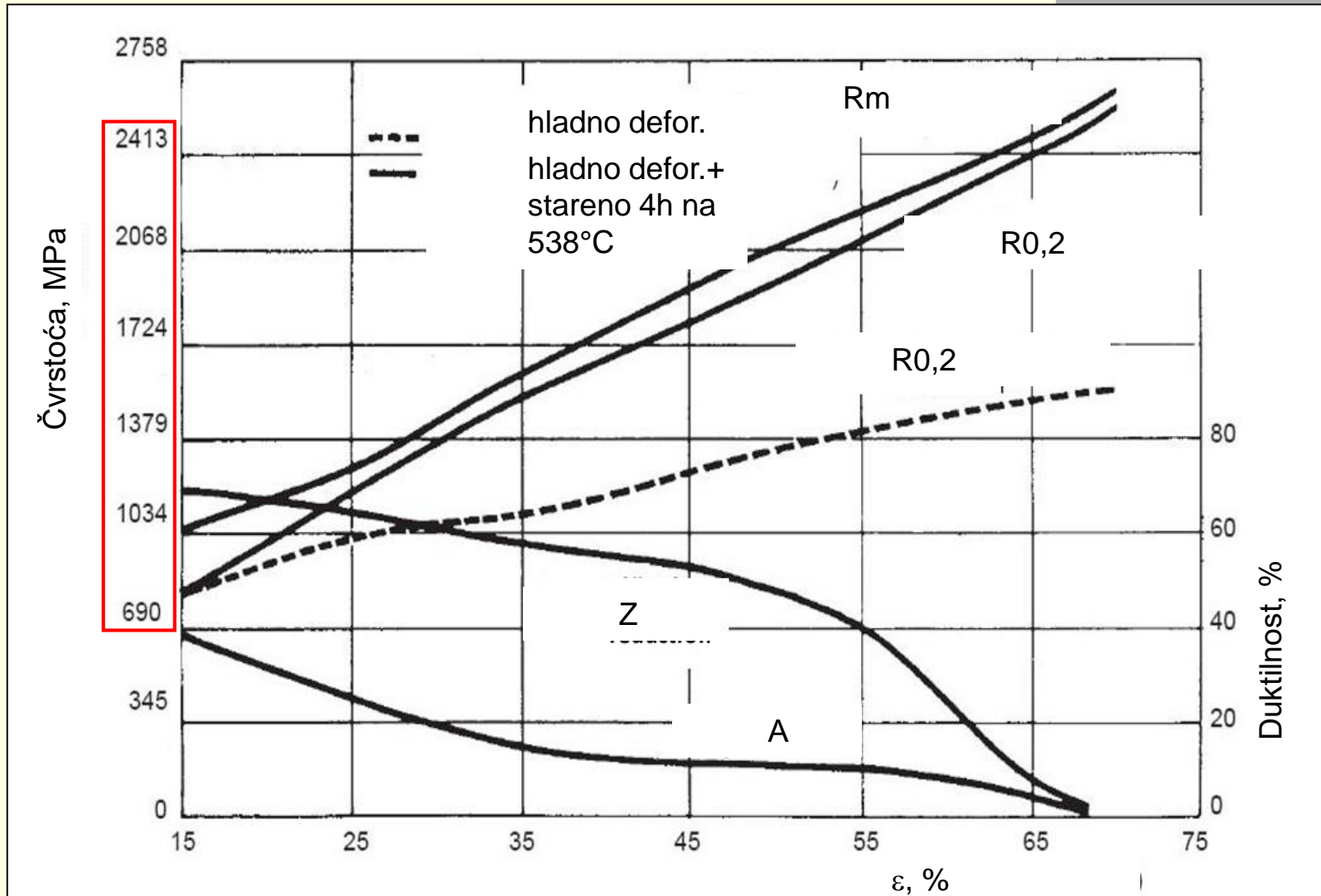
## ■ Prednosti legura Co

- Imaju višu Tt:  $T_t^{Co} > T_t^{Ni}$  – viša T primene od legura Ni i Fe
- Zadržavaju osobine do vrlo visokih T
- Bolja otpornost na koroziju u gasovitoj sredini
- Bolja otpornost na termički zamor
- Bolja zavarljivost

## ■ Nedostaci

- Niža čvrstoća na sobnoj T -  $R_{mCo} < R_{mNi}$
- Niža duktilnost i žilavost loma na sobnoj T
- Ograničena mogućnost razvoja postojećih legura

# Hladna deformacija Co superlegura



---

■ Hvala na pažnji 😊