

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 oko 300 MPa (**legiranjem čvrstoća raste do nivoa čelika za poboljšanje, ali je skoro dvostruko lakši**)
- Dobra plastičnost/duktilnost
- $E = 112.5\text{ GPa}$
- Nemagnetičan
- **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 (TiO₂) 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/cm³

toplotna provodljivost

električna otpornost, μΩcm

toplotni kapacitet

koeficijent linearnog širenja x 10⁶ /°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

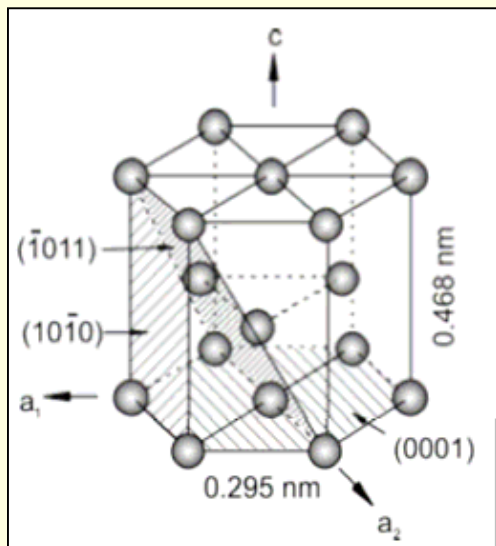
loše osobine

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

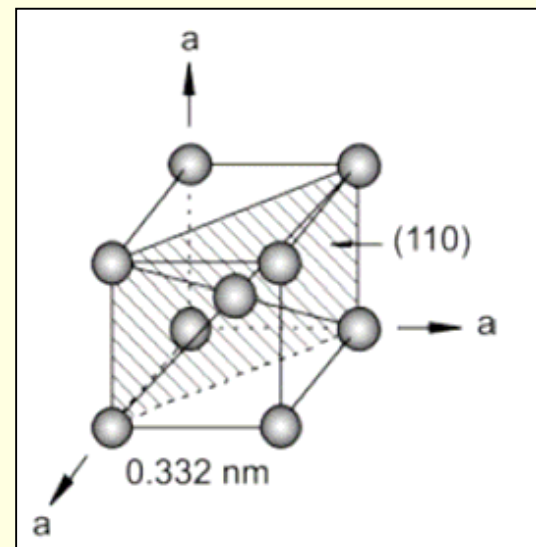
Titan - polimorfija

Titan je polimorfan – ima dve rešetke:

- α rešetka – stabilna do 882°C
heksagonalna gusto pakovana rešetka HGP



- β rešetka – stabilna iznad 882°C
kubna zapreminski centrirana rešetka KZC

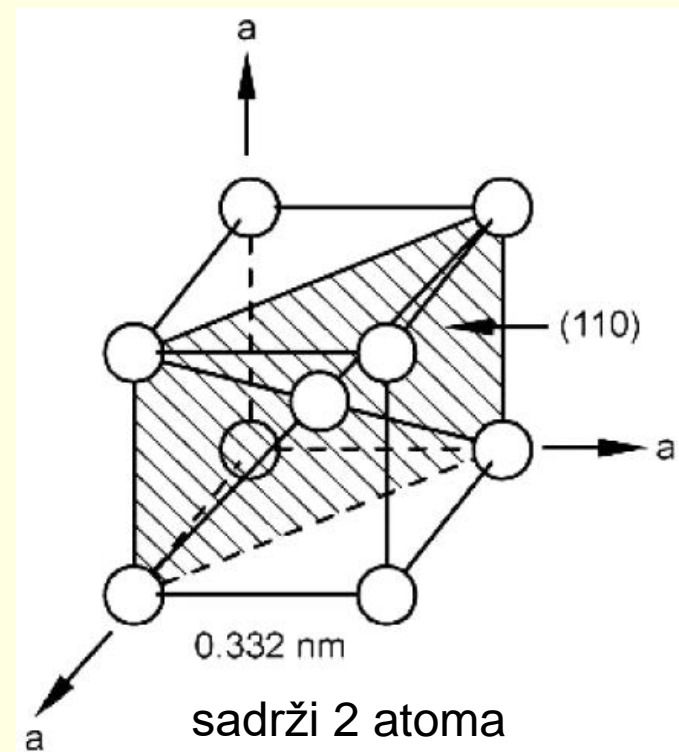
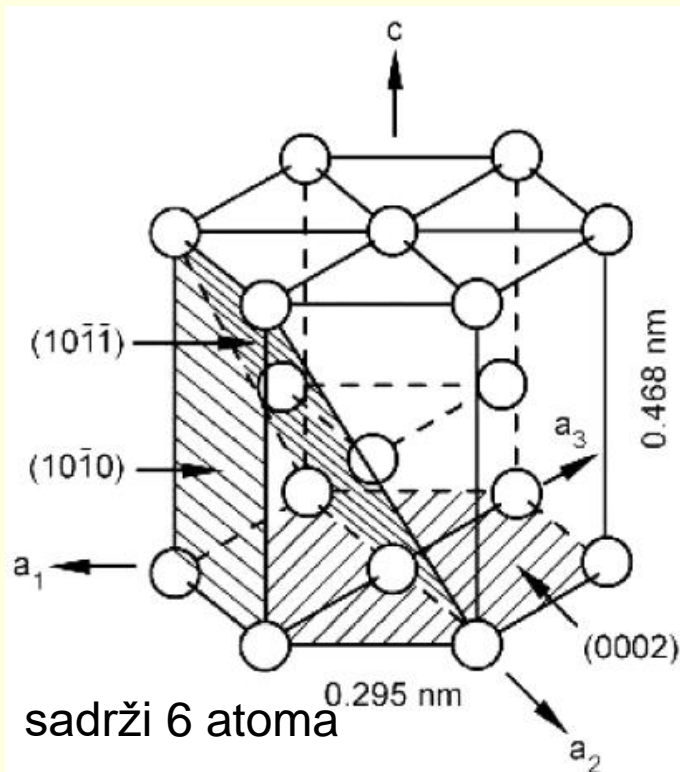


Stabilnost faza

- α – faza je stabilna ispod 882°C
- β – faza je stabilna iznad 882°C
- 882°C je temperatura *fazne transformacije*

HGP - α faza

KZC - β 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 α ili β stabilizatori:

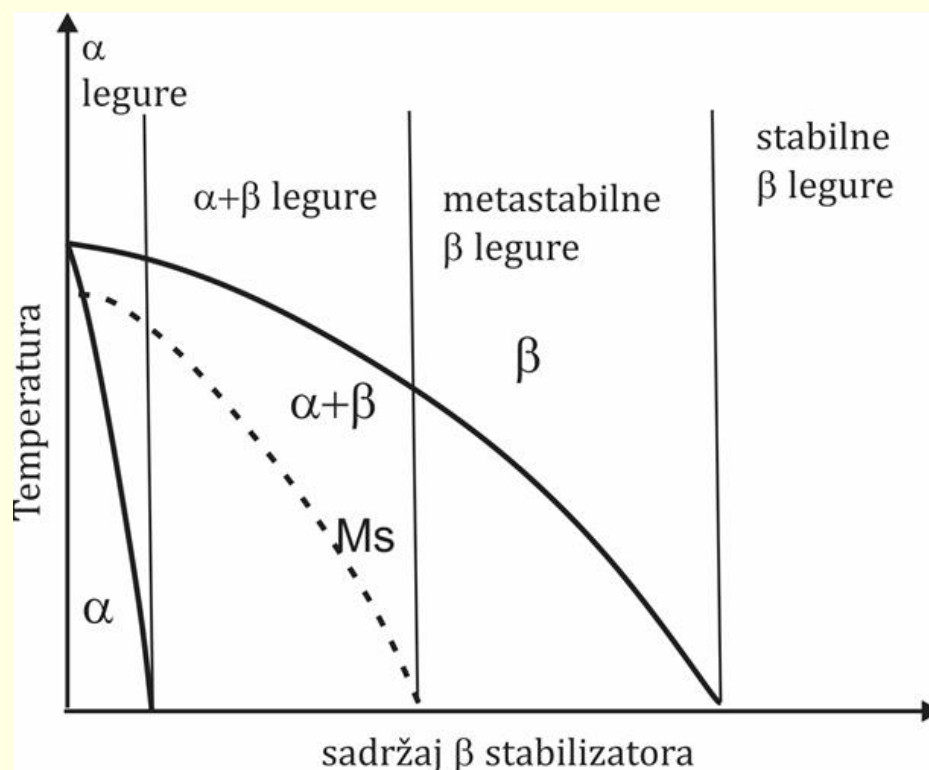
α stabilizatori podižu temperaturu fazne transformacije iznad 882°C

β stabilizatori spuštaju temperaturu fazne transformacije

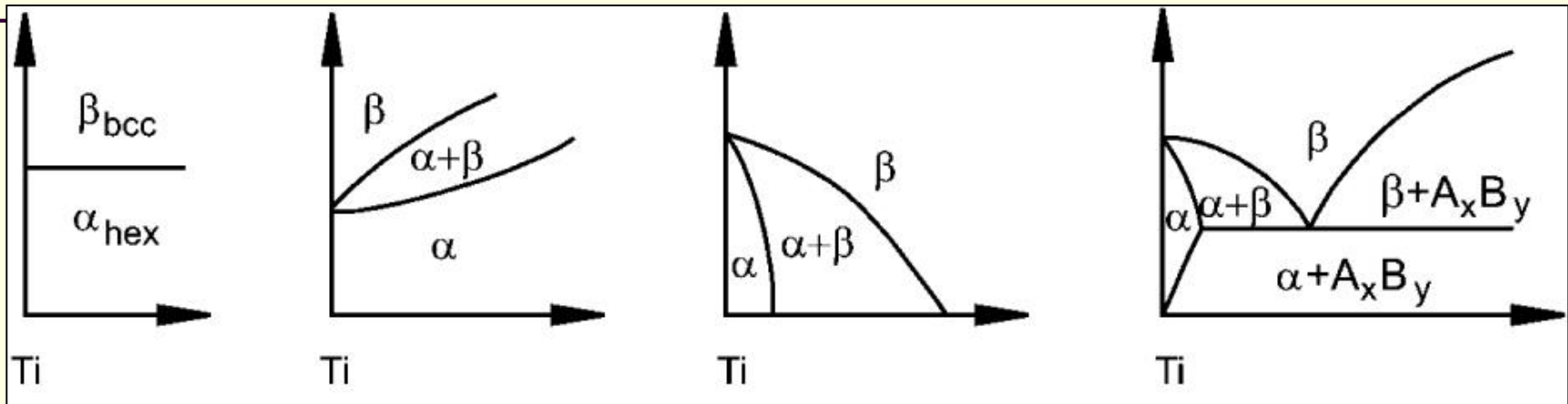
| α stabilizatori | | β stabilizatori | |
|------------------------|----------------|-----------------------|--|
| intersticijski | supstitucijski | intersticijski | supstitucijski |
| O, N, C | Al, Pb | H | Ag, Au, Nb, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pd, Pt, Ta, W, V |

Podela legura Ti

- Čist Ti na sobnoj T → samo α – faza
- Prisustvom α –stabilizatora (i/ili mali sadržaj β -stabilizatora) → samo je α – **faza** stabilna na sobnoj T → tzv. **α – legure**
- Povećanjem sadržaja β -stabilizatora, β - faza postaje stabilna na sobnoj T i prvo se pojavljuje **$\alpha + \beta$ područje**
- Daljim povećanjem sadržaja β -stabilizatora, α faza se *formira pod određenim uslovima* (npr. tokom žarenja ispod temperature transformacije) - **metastabilne β -legure**
- Sa daljim porastom sadržaja β -stabilizatora temperatura početka fazne transformacije se spušta ispod sobne temperature - na sobnoj temperaturi stabilna je β faza -**stabilne β -legure**



Uticaj legirajućih elemenata na T fazne transformacije



| Neutralni | α - stabilizatori | β - stabilizatori čvrstog rastvora | β - stabilizatori eutektoidne reakcije |
|-----------|---|---|---|
| Zr, Sn | Al, O, N, C | Fe, Cr, Mo, Mn, V, Ta, Nb | Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, H |
| Ne utiču | podišu T fazne transformacije (proširuju α oblast) | snižavaju T fazne transformacije (proširuju β oblast) | utiču i na pojavu eutektoidne reakcije - stvaranje intermetalnih čestica A_xB_y |

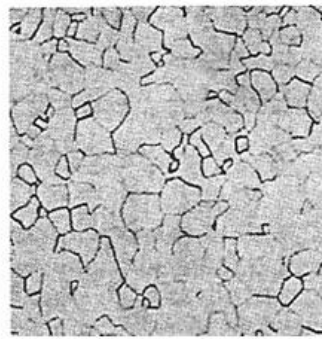
Podela legura Ti

α legure,

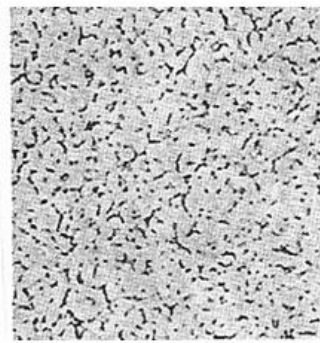
- legiraju se prvenstveno sa oko **3-8%Al**, sadrže još i Sn i Zr,
- nisu za termičku obradu
- deformaciono ojačavaju
- imaju visoku čvrstoću i žilavost (700-900MPa)
- lako se zavaruju,
- otporne su na koroziju i puzanje.

$\alpha + \beta$ legure,

- legirane su **Al + V, Mo, Cr**
- povećanje čvrstoće može da se postigne TO (kaljenje +starenje)
- **Rm = 1000-1300 MPa, A=16%,**
- Ograničena zavarljivost
- Najpoznatija legura iz ove grupe Ti-6Al-4V.



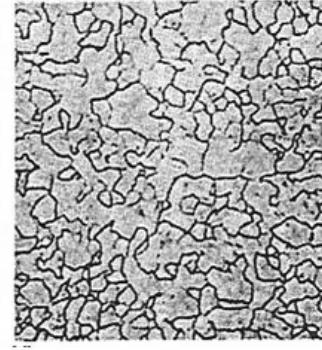
a) α ,



b) $\alpha +$ (malo) β

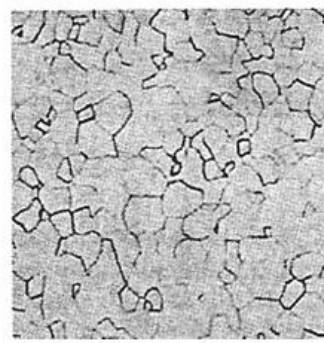


c) $\alpha + \beta$,

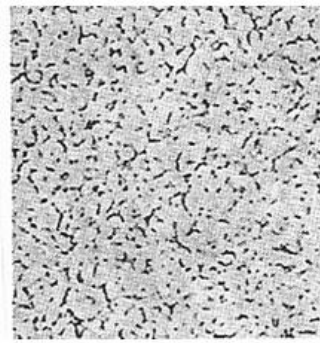


d) β

Podela legura Ti



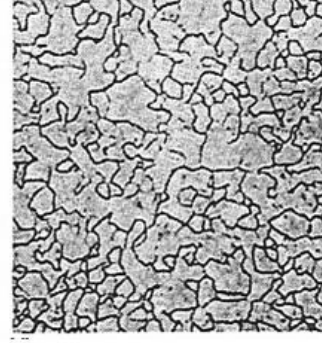
a) α ,



b) $\alpha +$ (malo) β



c) $\alpha + \beta$,



d) β

metastabilne β legure,

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

stabilne β legure.

- najjači β stabilizatori su **Fe, Mo i V**
- ne mogu da ojačavaju TO,
- dobro se oblikuju u hladnom stanju jer imaju KZC rešetku.

Podela legura Ti

| Tip legure | Oznaka | % leg. elem. | Rm [N/mm ²] | Re [N/mm ²] | A [%] | Primena |
|------------------|----------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------|--|
| čist Ti | nelegiran | - | 484 | 414 | 25 | kućišta mlaznih motora, koroziono otp. delovi proc. i nautičke opreme |
| α | Ti-5Al-2.5Sn | 5% Al, 2,5% Ti | 826 | 784 | 16 | lopatice 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 lopatice visoke čvrstoće |
| β | 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 |

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**

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

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

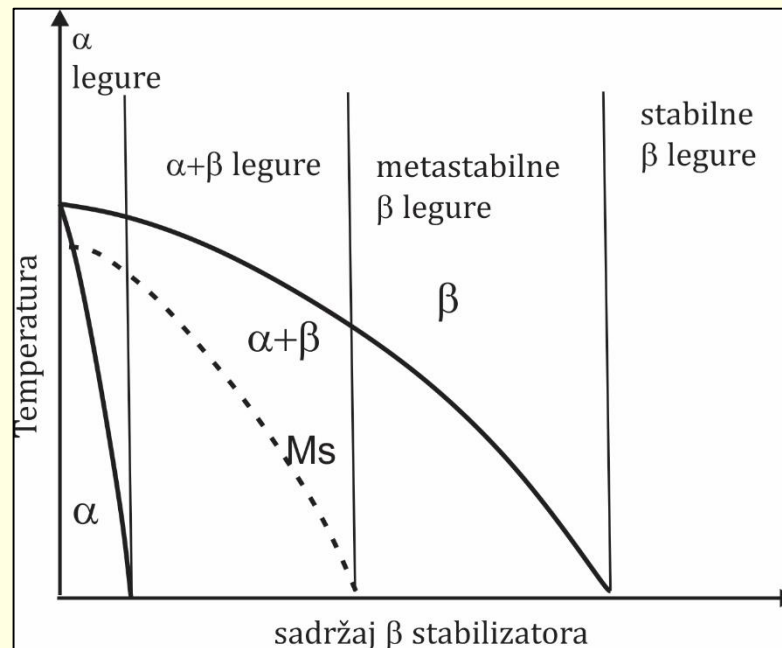
- Aluminidi, nitridi, carbidi, silicidi, ...

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: nekih α -legura i **$\alpha + \beta$ legura**
- Kod metastabilnih β -legura kao proizvod termičke obrade **izdvajaju se čestice**
- β -legure **nemaju martenzitnu transformaciju**



Termička obrada (TO) legura Ti

- Vrste TO legura Ti:
 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 β legure čestično ojačavanje)**
 4. TO4 - optimizacija specijalnih svojstava – puzanje, zamor, žilavost loma

- Za legure Ti **prema strukturi se koriste sledeće TO:**
 - α legure – ne menjaju se značajno sa TO tako da se izvodi TO1 i TO2 (moguća je i TO3 ali retko).
 - $\alpha+\beta$ legure TO2 i TO3
 - β legure (metastabilne) TO1, TO2 i TO3,

Martenzit kod legura Ti

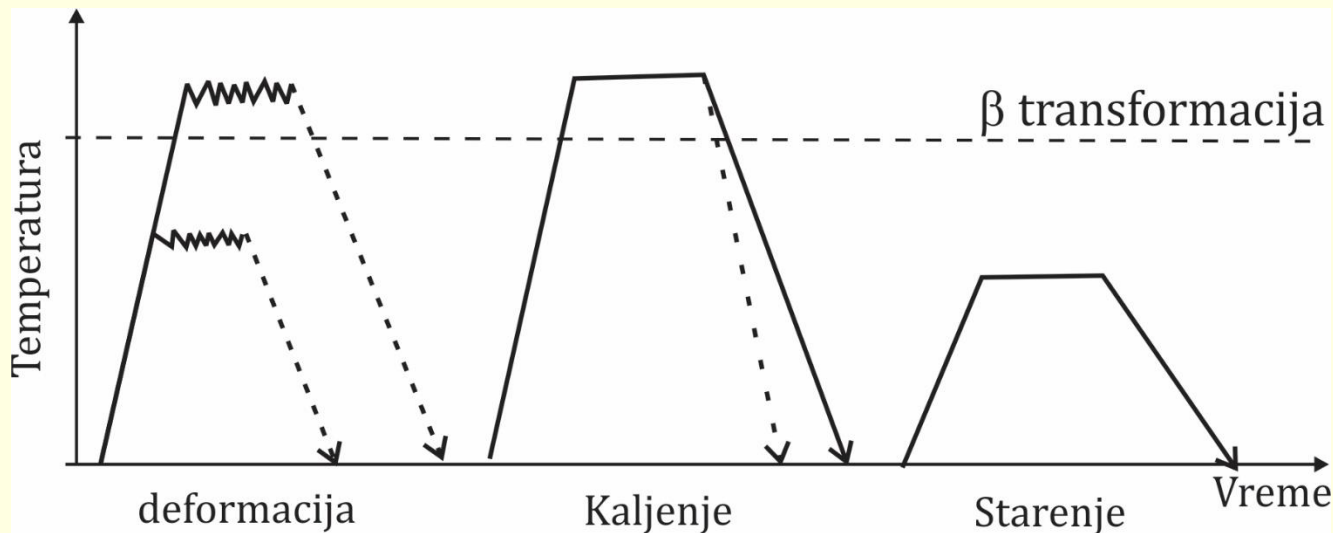
- Martenzit kod legura titana je rezultat brzog hlađenja
- Tokom starenja martenzit se razlaže na α i β fazu

Postoje **3 vrste** martenzita kod Ti:

- **HGP** - martenzit α'
- **Ortorombični** - martenzit α'' , nestabilan
- **KPC** - martenzit α'' - samo u legurama sa Mo, V i Al.

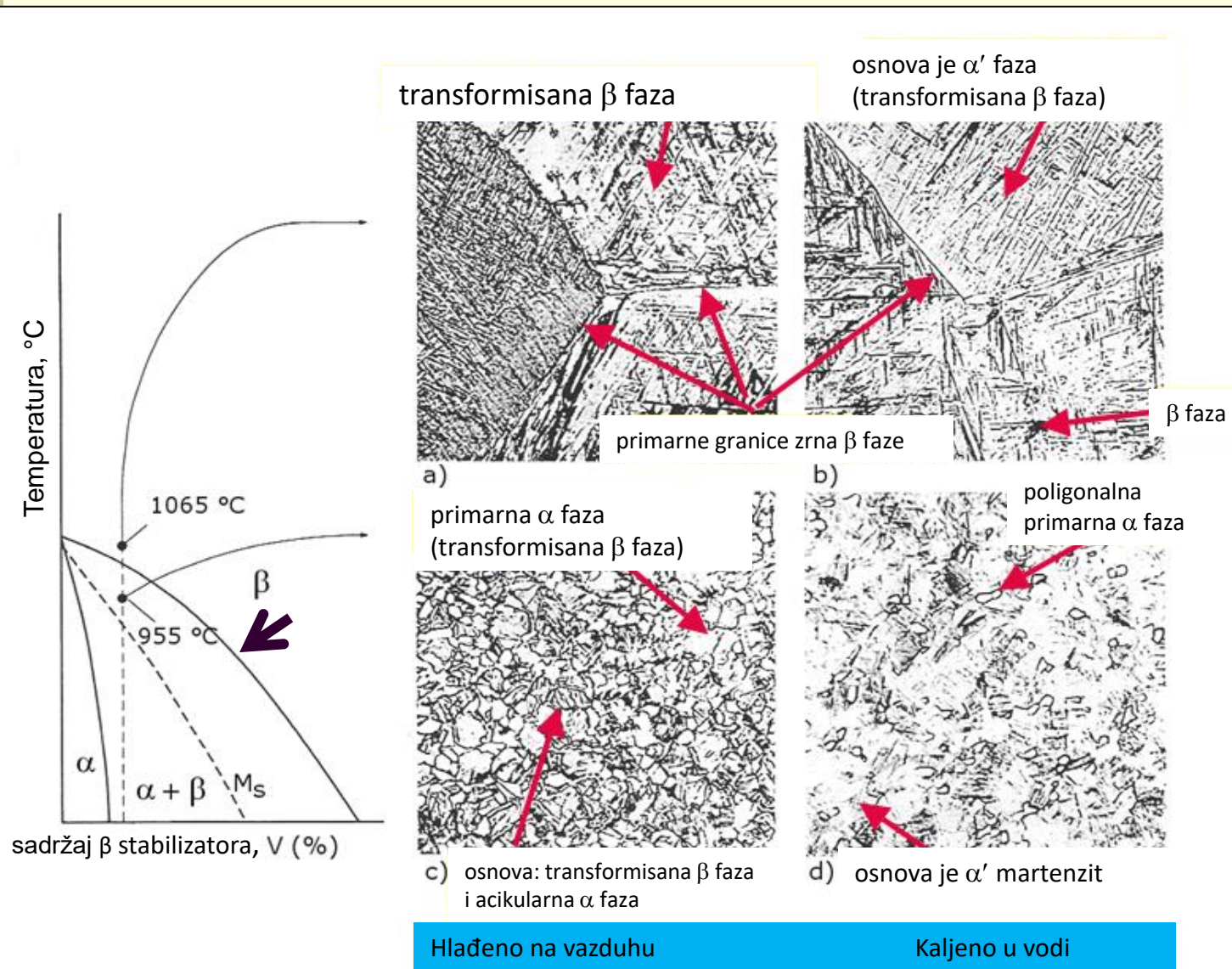
TO3 – martenzitna transformacija

- Martenzitna transformacija se postiže zagrevanje do β -oblasti (850...950 °C) i brzim hlađenjem (kaljenje)
- Nakon toga sledi starenje (450-600 °C)
- Dodatno je moguće otvrdnuti površinu nitriranjem (750-900 HV)
- Oblikovanje plastičnom deformacijom se izvodi pre TO



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

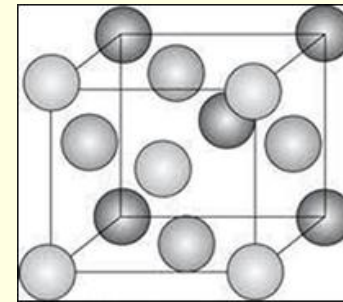
Primer: Uticaj sadržaja V (β stabilizatora) na sniženje temperature transformacije $\alpha - \beta$



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**)



* Magnetični su i neki lantanoidi: gadolinijum (Gd), disprozijum (Dy), Holmijum (Ho), itd.

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
- Zbog zavarivanja i rada na visokim T – 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)

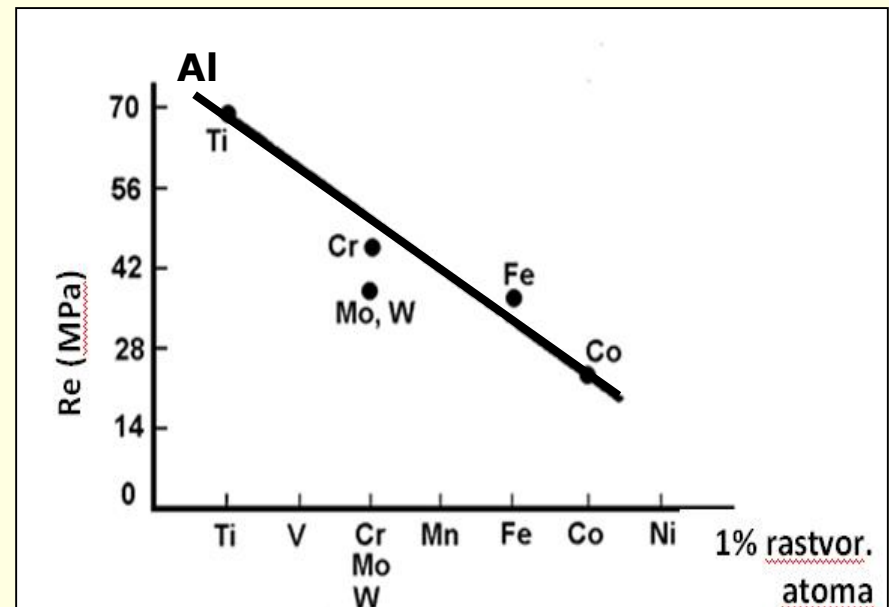
Uticaj legirajućih elemenata na Ni

- **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_2SO_4 , 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

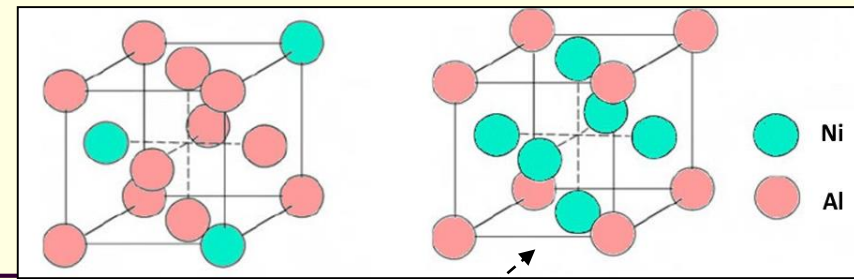
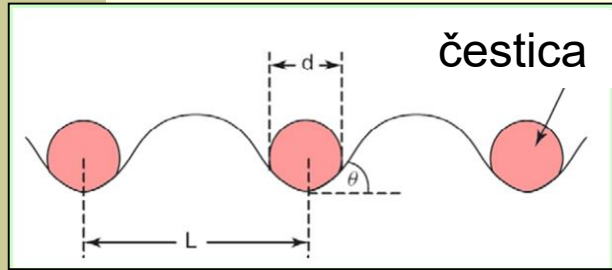
Ni-Cu legure (MONEL)

- 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 |

Najpoznatije legure Ni

- **Ni-Mo i Ni-Mo-Cr legure (HASTALLOY)**
 - visoka otpornost na koroziju i vatrootpornost,
 - koristi se za delove mlaznih motora.
- **Ni-Cr- (+ Si, Mo, Fe) legure (INCONEL)**
 - Za jaku oksidacionu sredinu.
 - **Inkoneli** se koriste kao vatrootporne legure za delove gasnih motora i turbina, opremu u prehrambenoj, hemijskoj i petrohemijskoj industriji.



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°C
- Ograničena zavarljivost

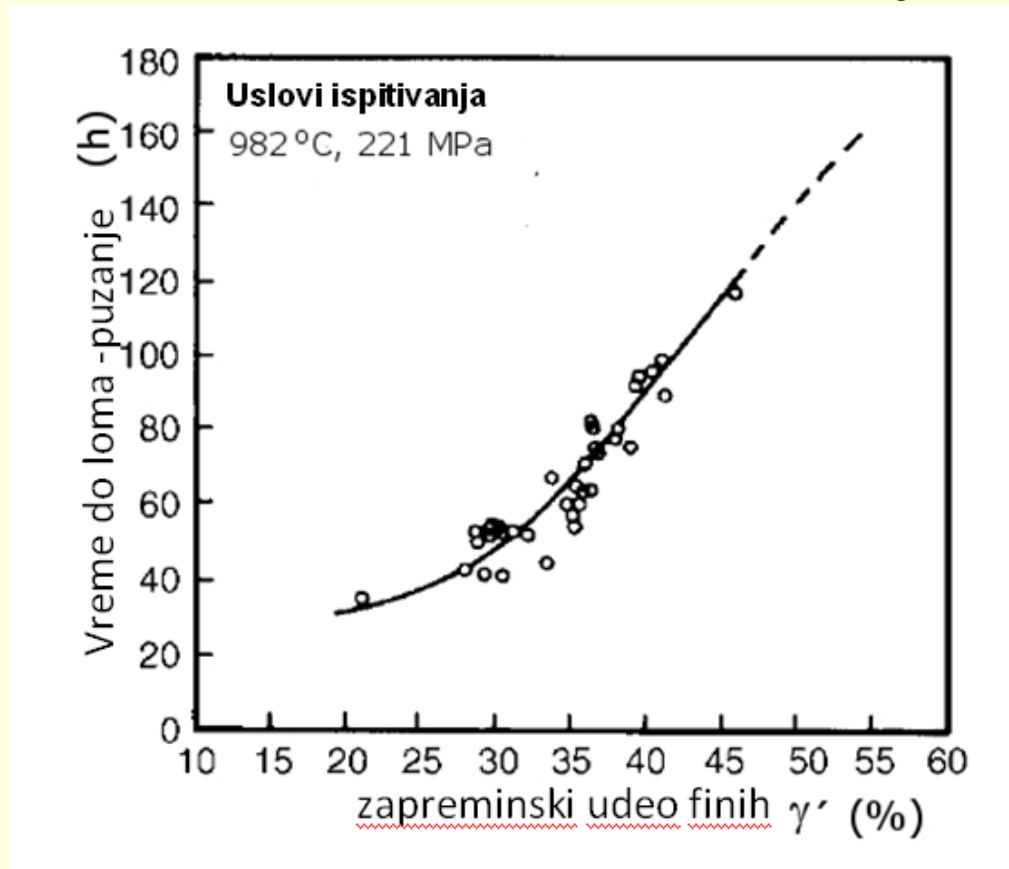
KPC rešetka γ osnove (čvrsti rastvor levo) i γ' čestica (desno) kojima taložno ojačava legura

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 γ' 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

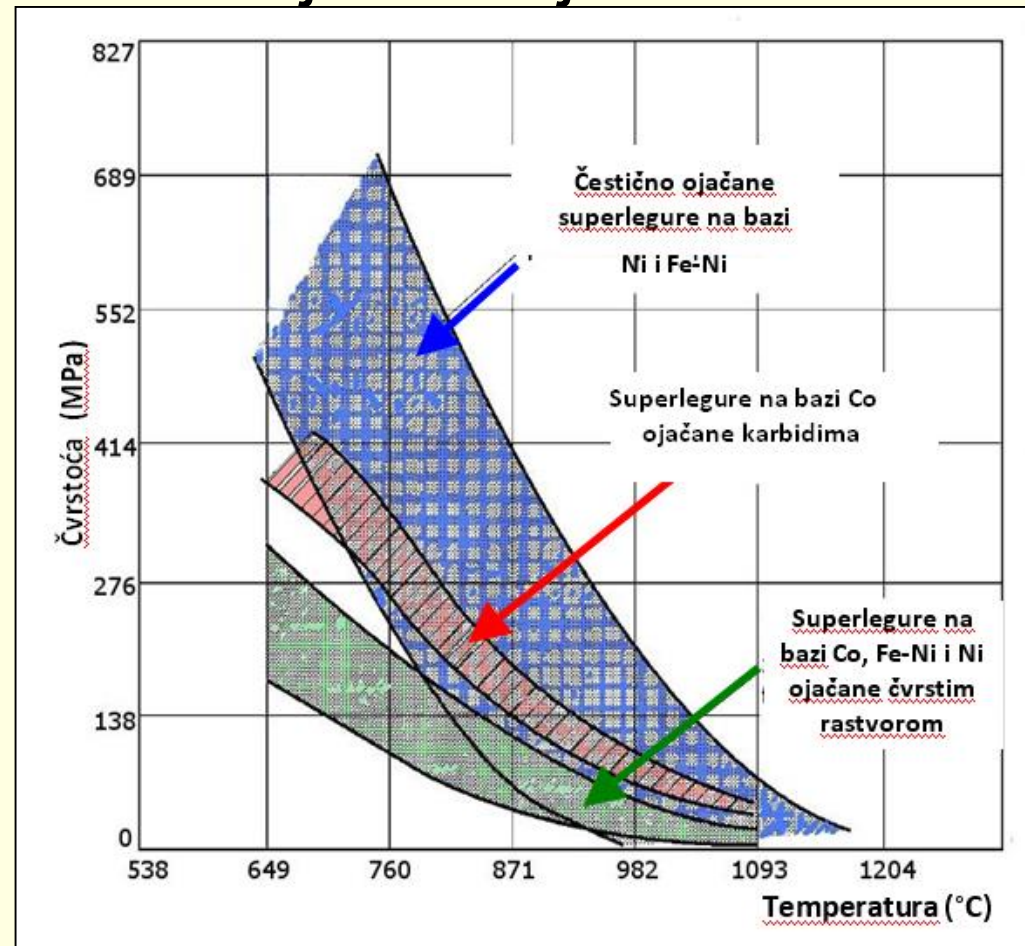
Iridijum (lat. iris - duga)
najotporniji metal na koroziju
KPC rešetka
 $\rho=22.56 \text{ g/cm}^3$
HV=1760 MPa
E=528 GPa

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 |
| γ 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 γ' $Ni_3(Al, Ti)$ | Al, Ni, Ti | ... | Al, Ti |
| Odlažu formiranje $h-Ni_3Ti$ | Al, <u>Zr</u> | | |
| Podižu solvus T za γ' | ... | ... | 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> |

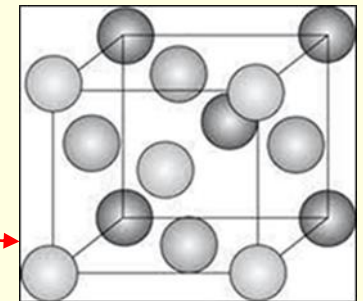
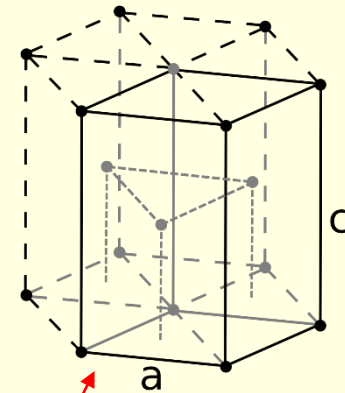
Superlegure na bazi Ni mehanizmi ojačavanja

- 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 γ (austenitna faza) i
 - ojačavanje taloženjem faze γ' -Ni₃ (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 Cr₂O₃ i Al₂O₃.
- 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

- $T_f = 1495^\circ\text{C}$
- $\rho = 8.83 \text{ g/cm}^3$
- Magnetičan $T_{\text{kiri}} = 1115^\circ\text{C}$
- Polimorfan:
 - HGP na $T < 421^\circ\text{C}$ nedeformabilna
 - KPC na $T > 421^\circ\text{C}$



- Legiranjem se stabilizuje KPC ili HGP rešetka

Generalne osobine Co i legura na bazi Co

- **Uglavnom su legure Co superlegure**
- Prve legure Co- Cr i Co-Cr-W patentirane 1900-ih
- Trgovački nazivi **Stellite** i **Haynes** (Haynes Corp.).
- Ojačavanje čvrstog rastvora sa Ta, W, Nb, Mo
- Upotreba: alati i kao zaštita od habanja
- Najvažnije 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
- Niža im je čvrstoća od legura na bazi Ni, ali je dugo zadržavaju na povišenim T
- **Legure Co ojačavaju hladnom deformacijom**

Sastav i primena legura na bazi Co

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

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

*max

Sastav: Co, Ni, Cr, W

Poređenje sa legurama Ni

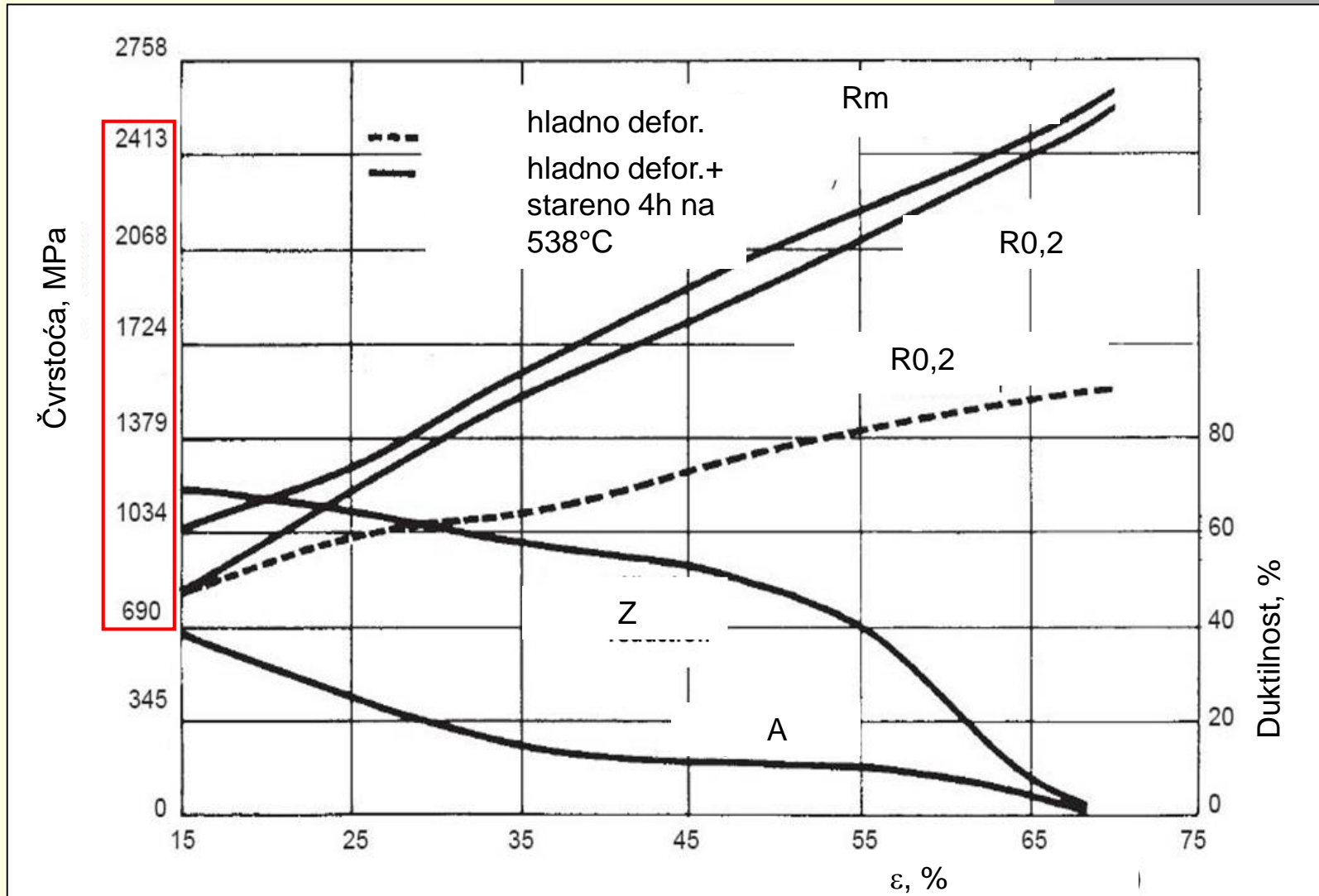
■ Prednosti legura Co

- 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 😊