

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°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 (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/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

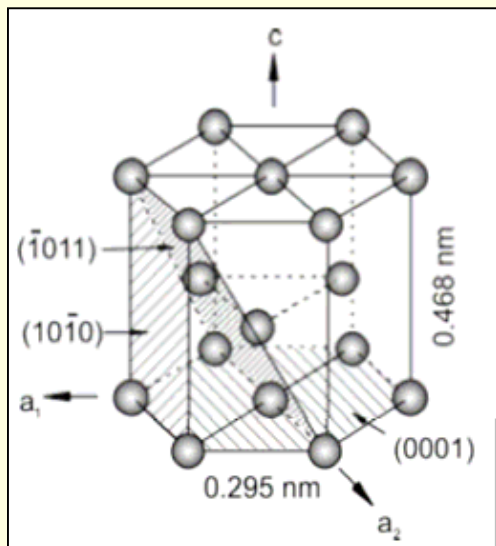
loše osobine

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

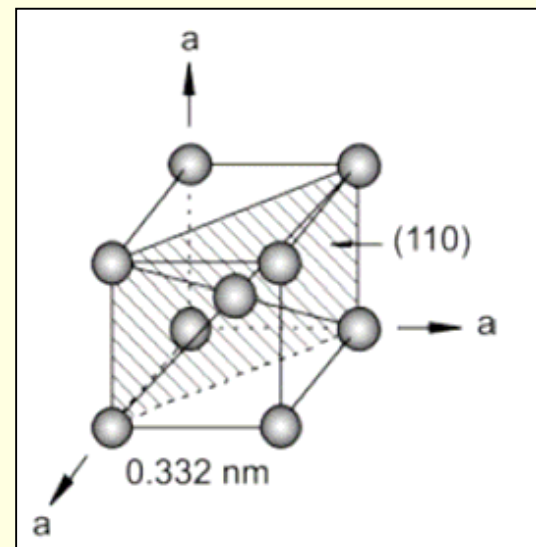
Titan - polimorfija

Titan je polimorfan – ima dve rešetke:

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



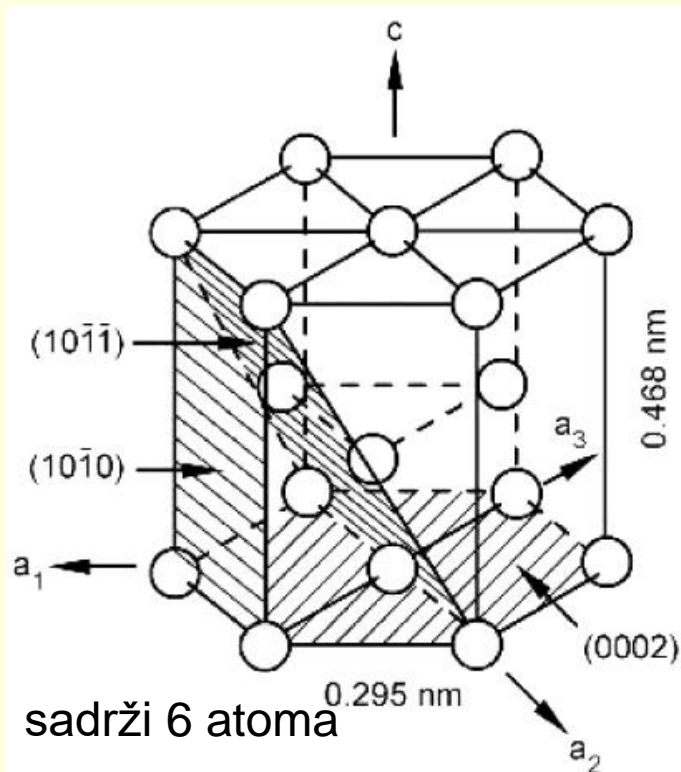
- β rešetka – stabilna iznad 882°C
kubna zapreminski centrirana rešetka KZC



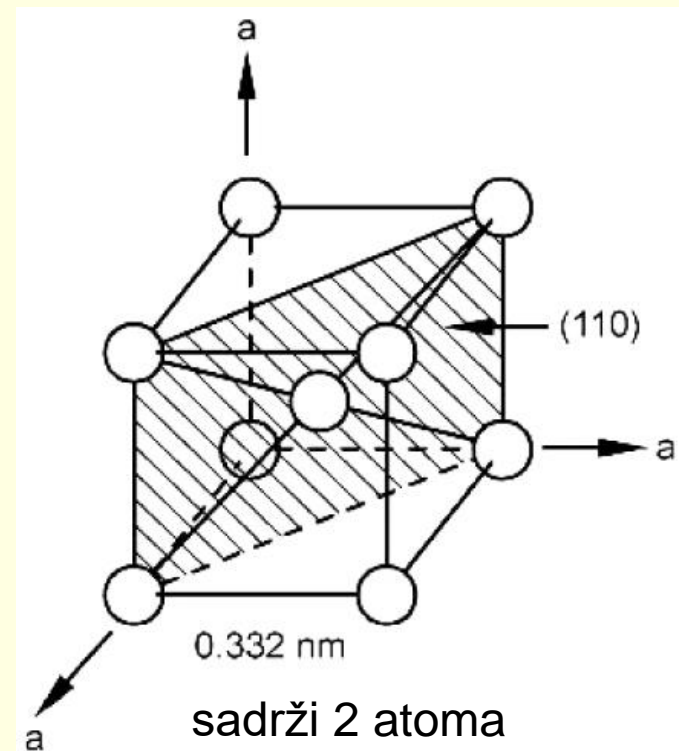
Stabilnost faza

- 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

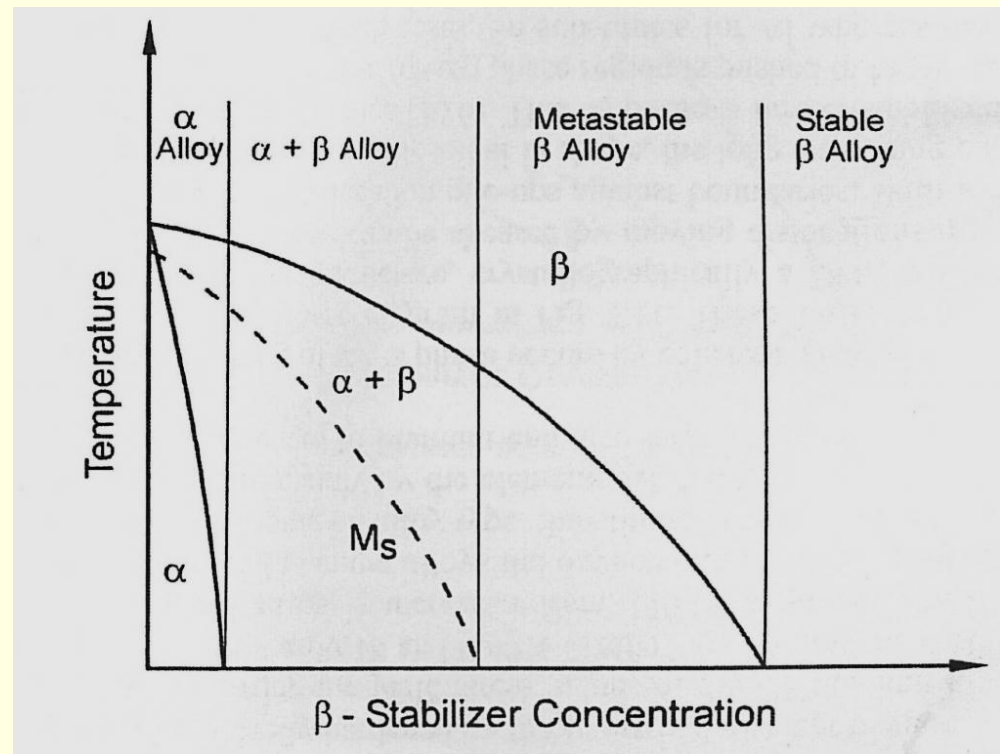
-Prisustvom α –stabilizatora (i/ili mali sadržaj β -stabilizatora) → samo je α – faza stabilna na sobnoj T → tzv. α – **legure**

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

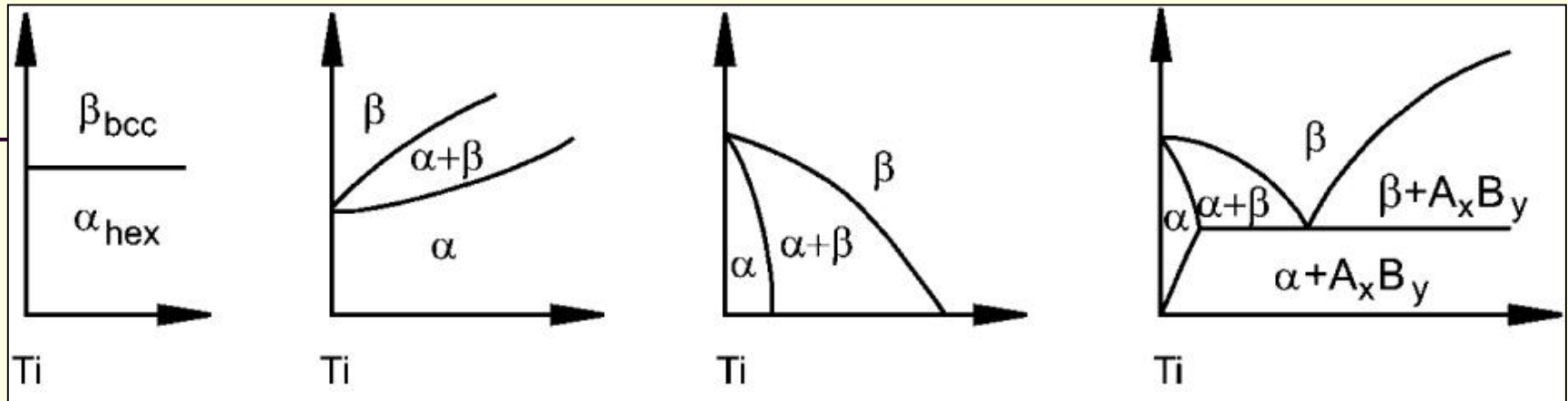
-Daljim povećanjem sadržaja β -stabilizatora, α faza se *formira samo pod određenim uslovima* (npr. tokom žarenja ispod temperature transformacije) -

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**

Neutralni elementi – **Zr, Sn**

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

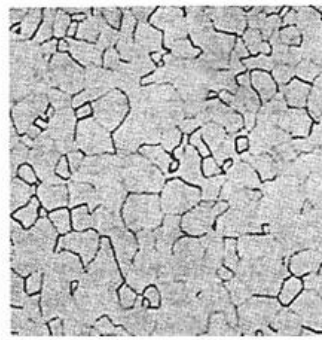
β – stabilizatori čvrstog rastvora **Fe, Cr, Mo, Mn, V, Ta, Nb** snižavaju T fazne transformacije (proširuju β oblast)

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

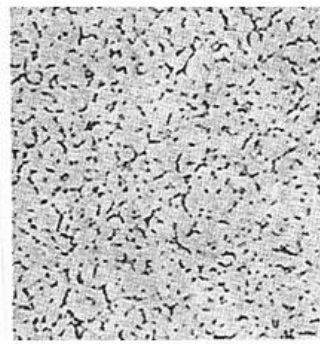
Podela i označavanje legura Ti

Tip legure	Oznaka	% leg. elem.	Rm [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

Podela legura Ti



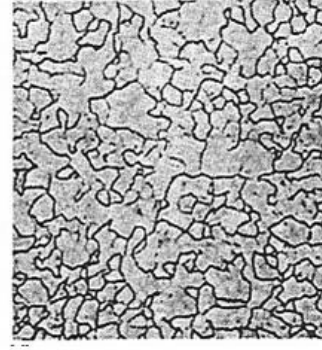
a) α ,



b) $\alpha +$ (malo) β



c) $\alpha + \beta$,



d) β

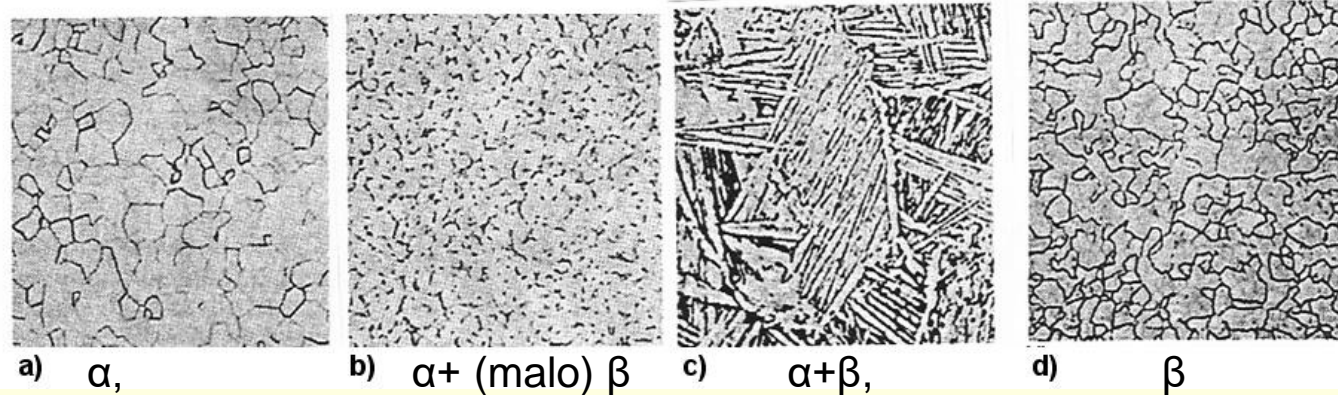
α legure,

- 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 β legure,

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

■ stabilne β legure.

- najjači β stabilizatori su **Fe, Mo i V**
 - TO mogu da dobiju $\alpha + \beta$ strukturu i tako da ojačaju
 - dobro se oblikuju u hladnom stanju.
- Primer β 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**

- 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)

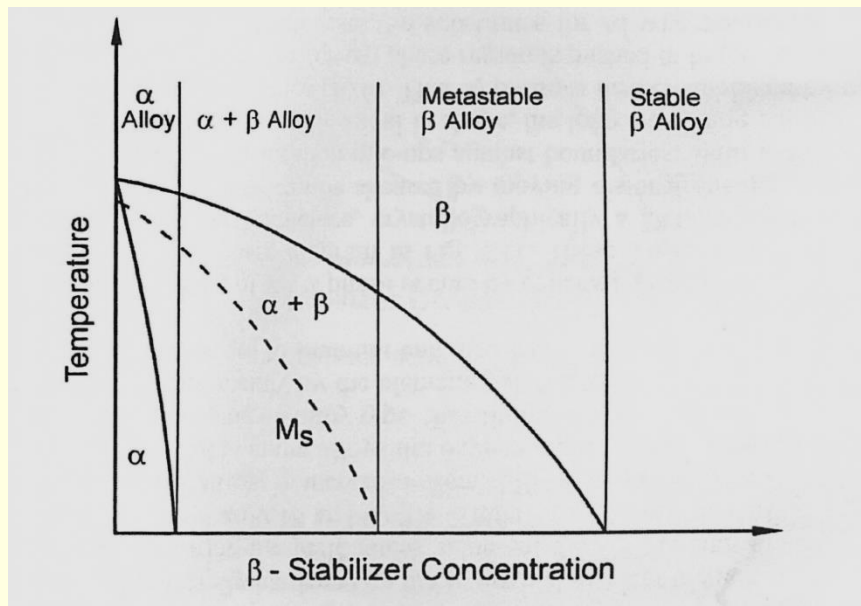
- Aluminidi, nitridi, carbidi, silicidi, ...

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:
 $\alpha + \beta$ legura i nekih α -legura (vidi idijagram)
- Kod metastabilnih β -legura kao proizvod transformacije izdvajaju se α -čestice
- β -legure nemaju martenzitnu transformaciju ali TO mogu da postignu $\alpha + \beta$ strukturu



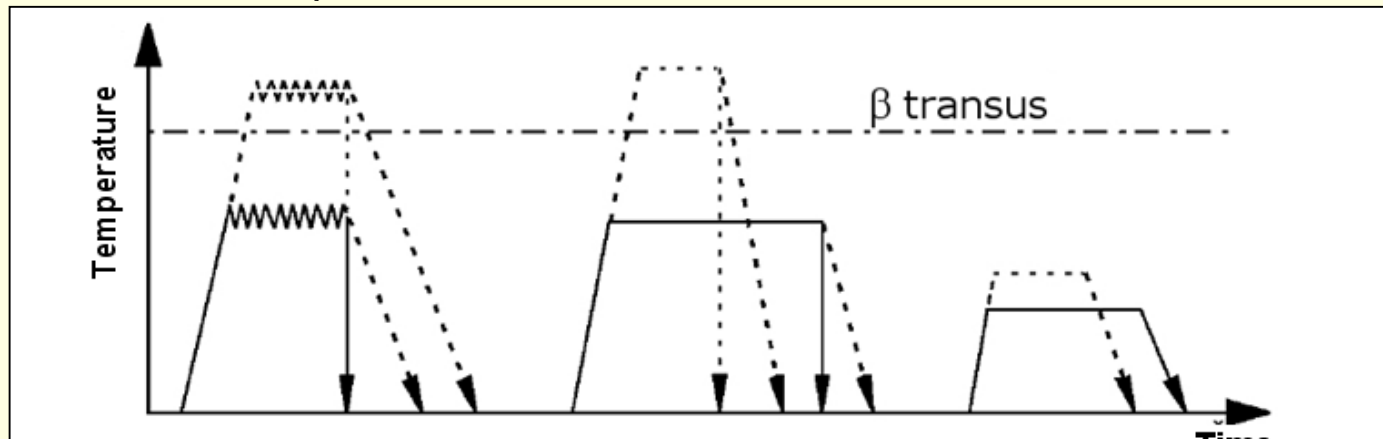
Termička obrada (TO) legura Ti

- 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 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.
 - $\alpha+\beta$ legure TO2 i TO3
 - β legure (metastabilne) TO1, TO2 i TO3,

TO3 – martenzitna transformacija

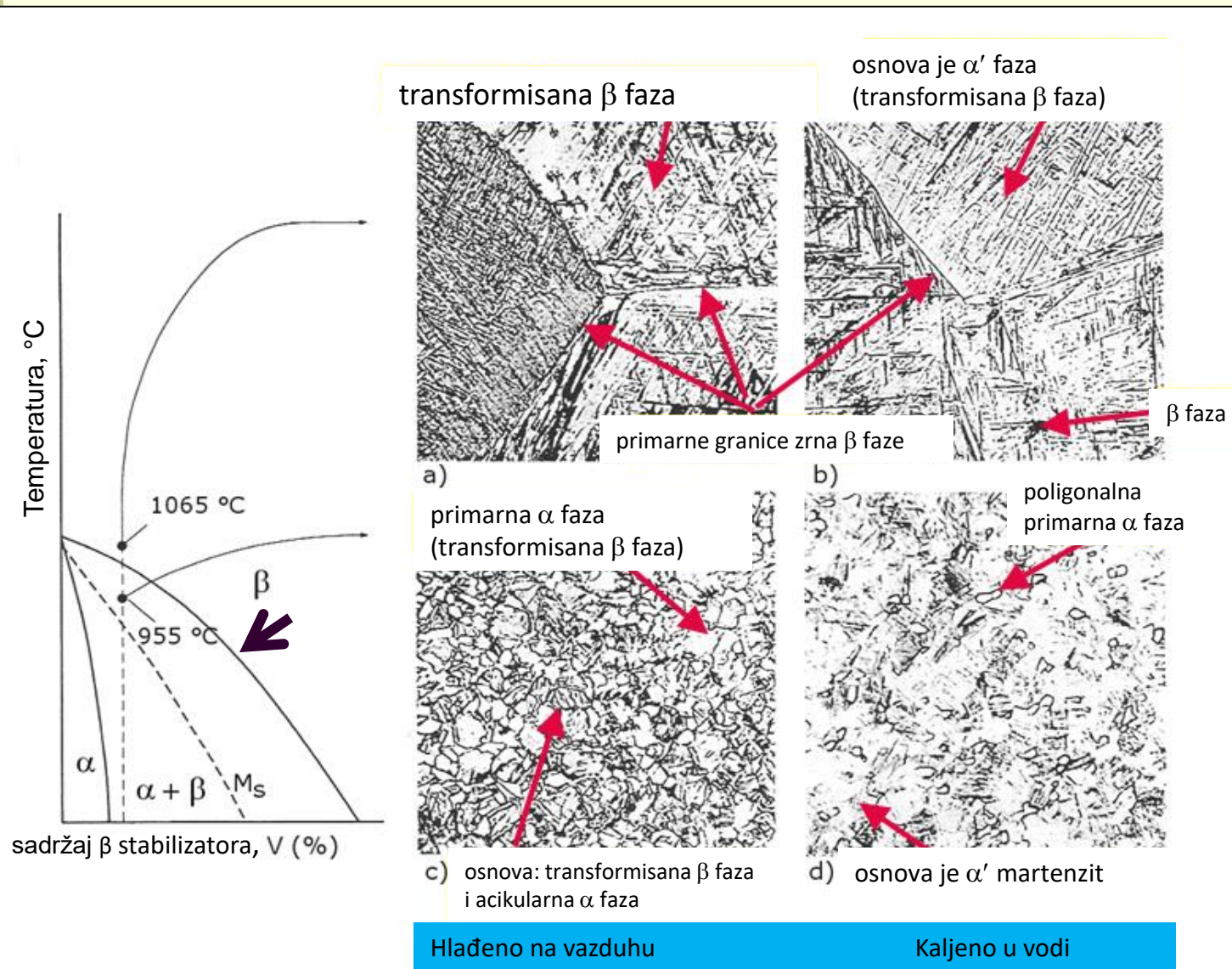
- Martenzitna transformacija se postiže zagrevanje do β -oblasti (850...950 °C) i brzim hlađenjem (kaljenje)
- Nakon toga sledi starenje (450-600 °C)
- Dodatno je moguće otvrdnuti površinu nitriranjem (750-900 HV)



deformacija rastvarajuće žarenje otpuštanje

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

Uticaj povećanja sadržaja V (β 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 α i β fazu

Postoje **3 vrste** martenzita kod Ti:

- **HGP** - martenzit α' nastaje pri nižim sadržajima β stabilizatora, kao što su Mo i V
- **Ortorombični** - martenzit α'' , nastaje pri višim sadržajima β , duktilniji
- **KPC** - martenzit α'' - 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:

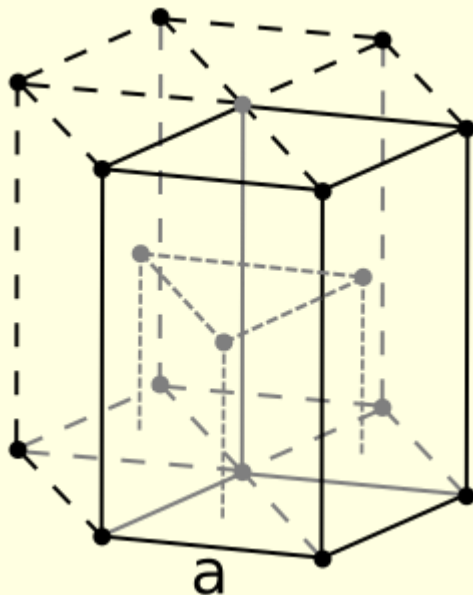
- **Nuklearna industrija:** Koristi se za oblaganje radioaktivnih šipki (gorivo) u nuklearnim reaktorima zbog niske apsorpcije neutrona i otpornosti na koroziju.
- **Procesna industrija:** Zr legure su otporne na koroziju u kiselim sredinama pa se koriste u procesnoj industriji.
- **Medicinska tehnika:** 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

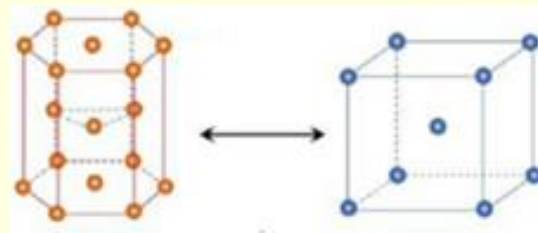
Zr je polimorfan kao Ti – ima dve rešetke i faznu transformaciju:

- α rešetka – stabilna do 860°C
heksagonalna gusto pakovana rešetka HGP

- β rešetka – stabilna iznad 860°C
kubna zapreminski centrirana rešetka KZC

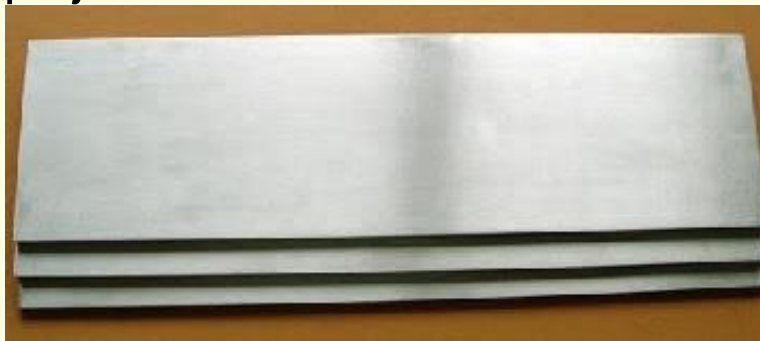


- Tokom termičke obrade legura Zr, dolazi do fazne transformacije, što utiče na mehaničke osobine legure
- Legiranjem se stabilišu određene faze
- Slično kao kod Ti legure, moguće kaljenje



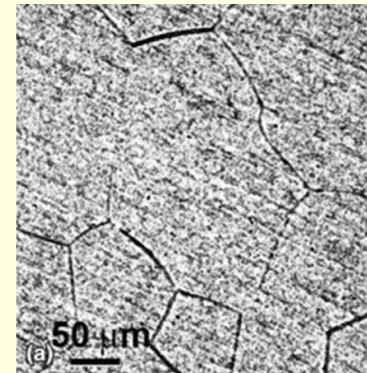
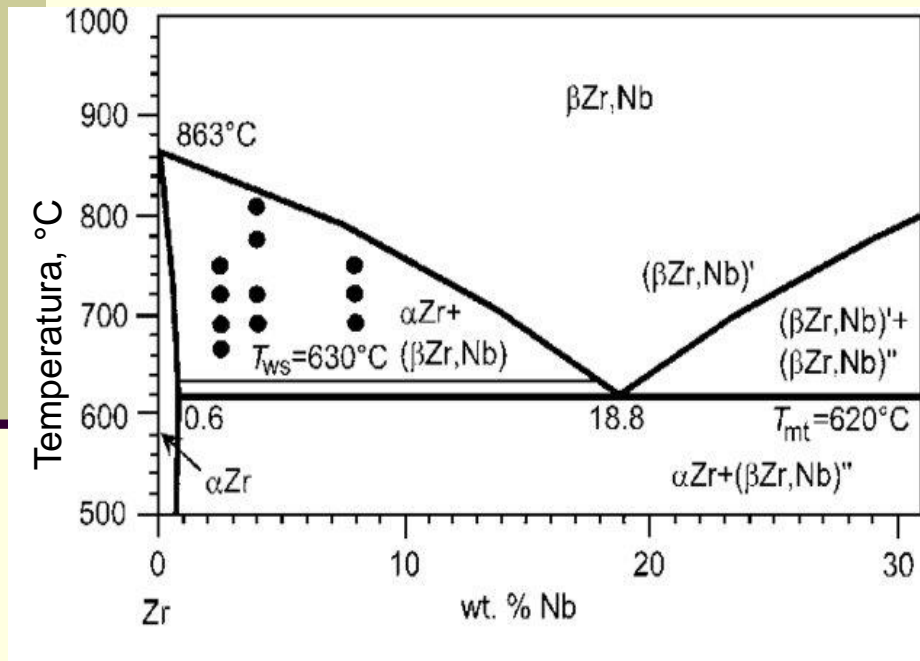
Podela legura cirkonijuma prema EN

- **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 i Zr705 (ASTM) koji se koriste u nuklearnoj industriji). Koristi se u reaktorima jer zadržava stabilnost na visokim temperaturama i ima nisku apsorpciju neutrona.

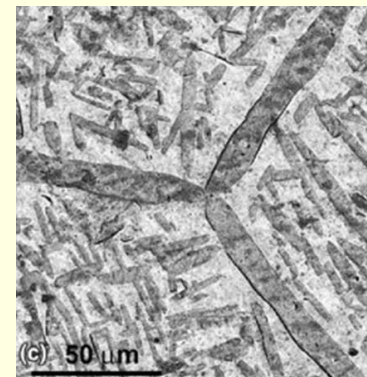


Legure Zr

- 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

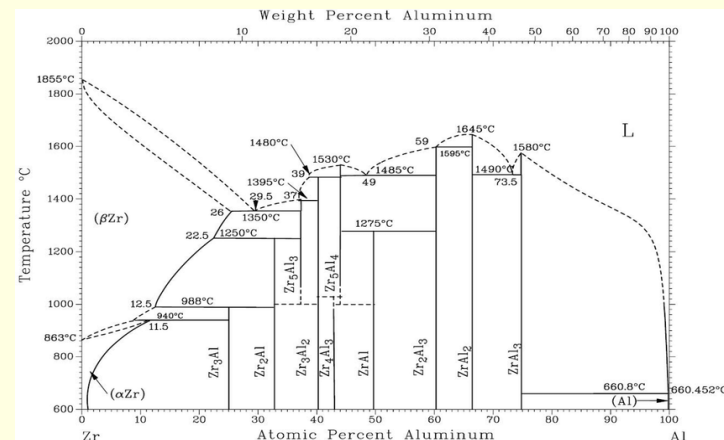


Legura sa 4%Nb
žarena na 720°C

β Zr svetla faza
 α Zr tamna faza

Podela legura cirkonijuma prema EN

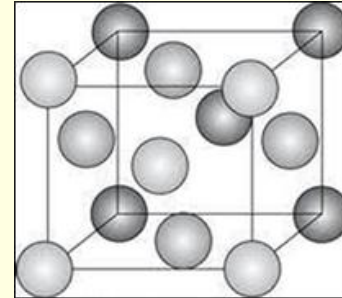
- **Zr-Hf legure** - nisu striktno standardizovane u EN.
- **Zr sa dodatkom Sn, Fe, Ni i Cr -legure sa poboljšanim osobinama.** Najčešće se koriste u nuklearnim reaktorima zbog visoke otpornosti na koroziju i niske apsorpcije neutrona.
 - Npr. Zircaloy-2 (Zr+male količine Sn, Fe, Cr i Ni) i Zircaloy-4 (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)

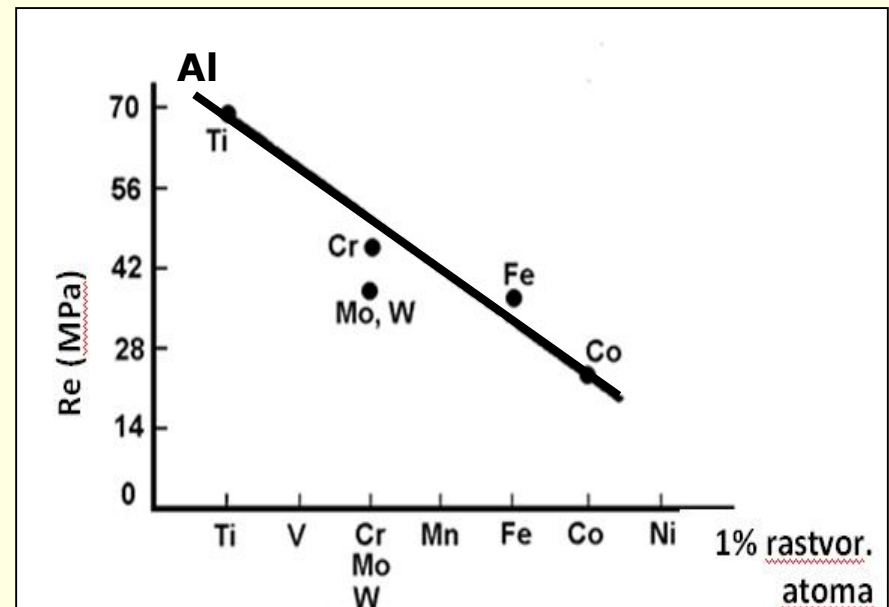
Uticaj legirajućih elemenata na Ni

- **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 H₂SO₄, 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



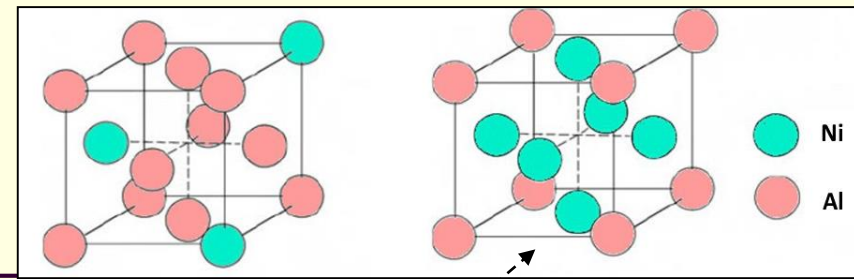
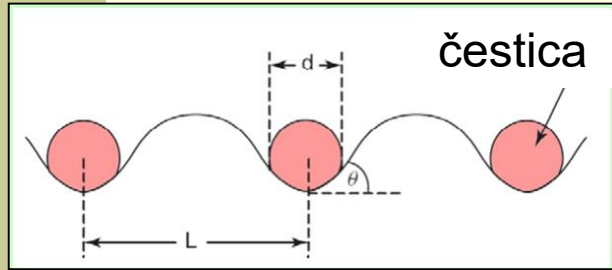
Uticaj dodatka 1% legirajućeg elementa u superlegurama na porast napona tečenja

- 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°C
- Ograničena zavarljivost

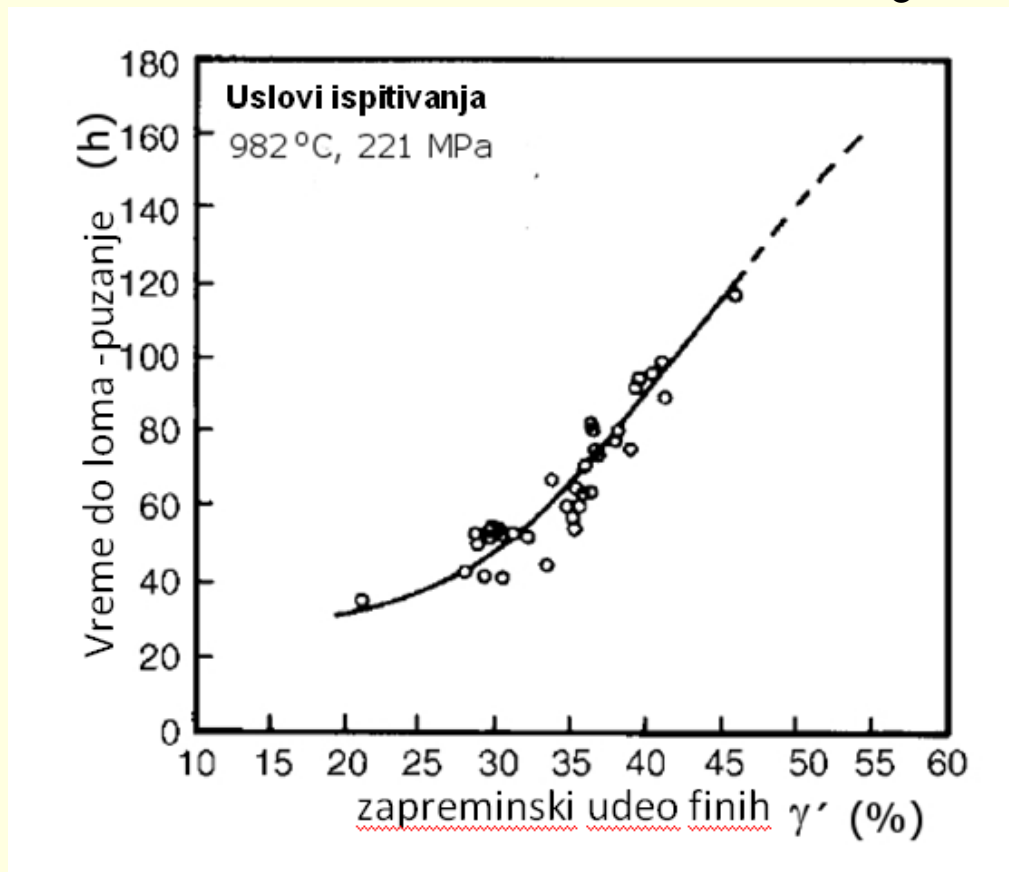
KPC rešetka γ osnove (čvrsti rastvor levo) i γ' čestica (desno) kojima taložno ojačava legura

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

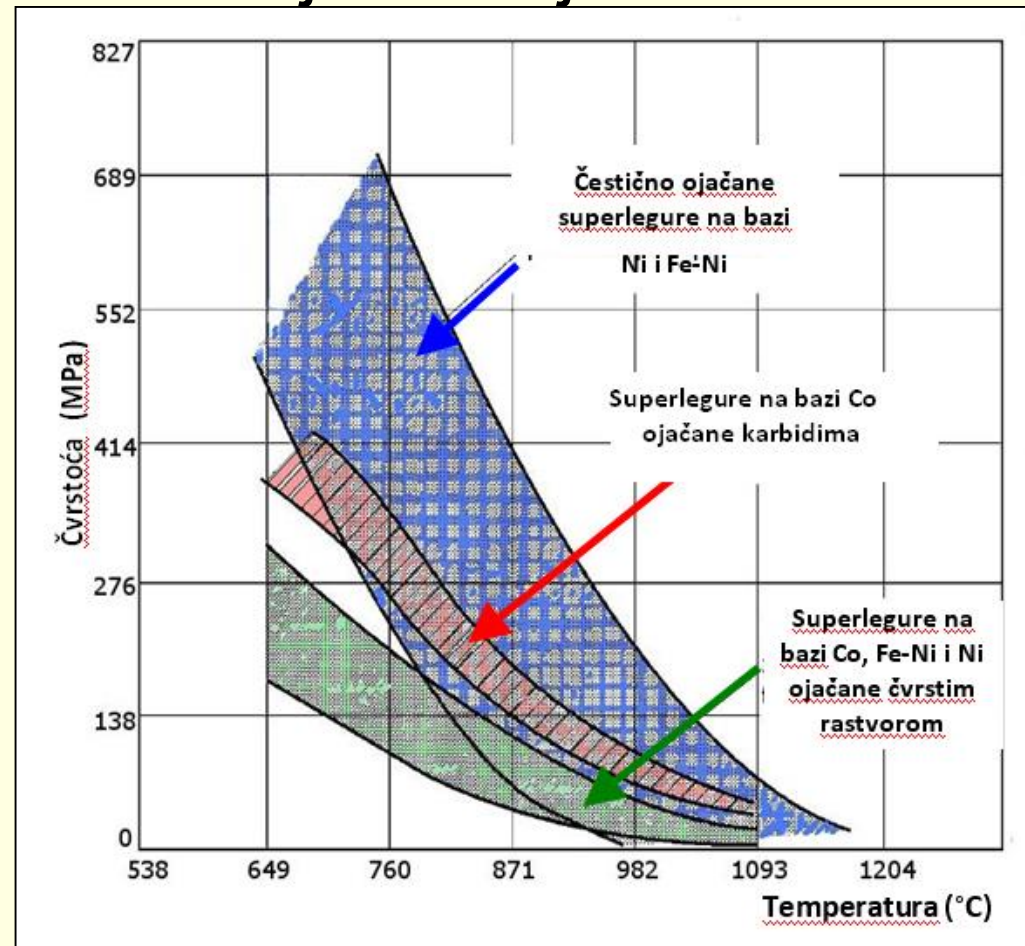
Iridijum (lat. iris - duga)
najotporniji metal na koroziju
KPC rešetka
 $\rho=22.56 \text{ g/cm}^3$
HV=1760 MPa
E=528 GPa

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>

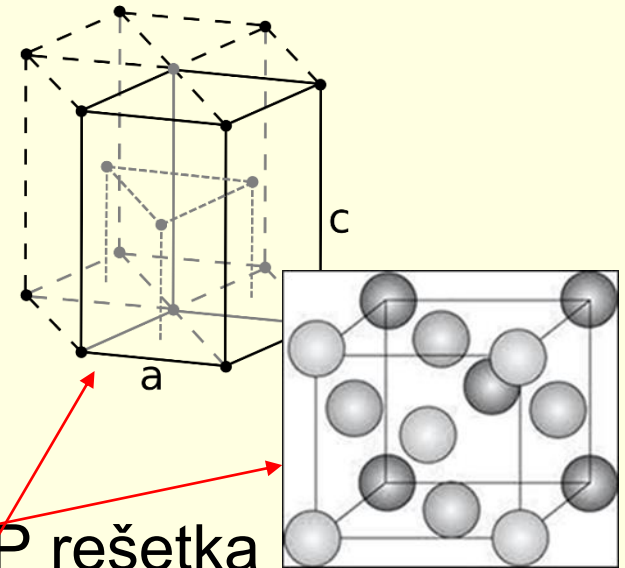
Superlegure na bazi Ni mehanizmi ojačavanja

- 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

- $T_f = 1495^\circ\text{C}$
- $\rho = 8.83 \text{ g/cm}^3$
- 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°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
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

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

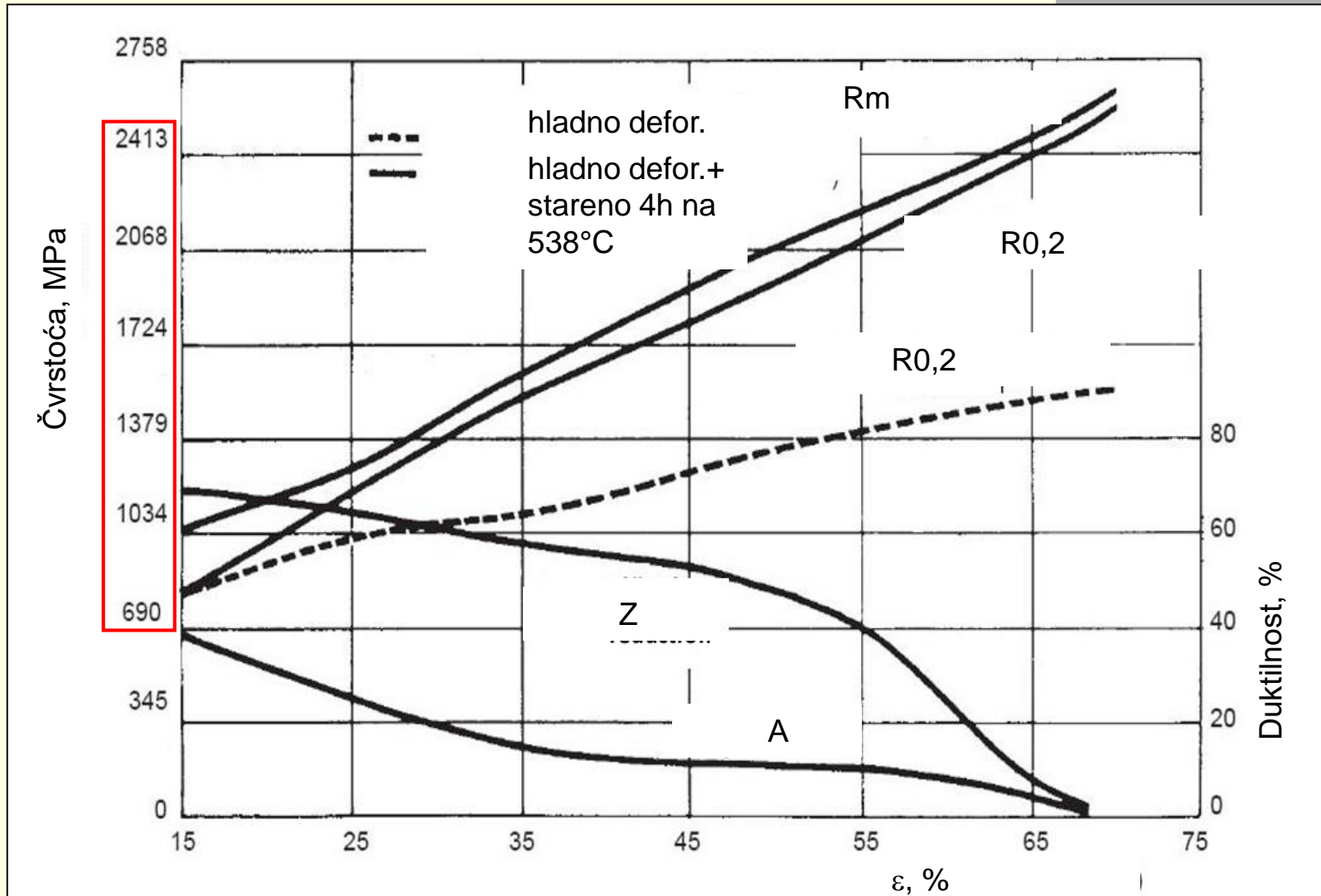
■ Prednosti legura Co

- Imaju višu T_t : $T_t^{Co} > T_t^{Ni}$ – 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 😊