

# *Fázové transformace v titanu a jeho slitinách*

Čistý titan: 2 alotropické modifikace

- $\alpha$  - Ti (do 882 °C), hexagonální mříž
- $\beta$  - Ti (882 až 1668°C), BCC mříž

– s přísadovými prvky tvoří substituční tuhé roztoky  $\alpha$  a  $\beta$ . Jako konstrukční materiál se používá i technicky čistý titan. Zpevnění intersticiálními prvky: kyslík z 0,18 na 0,4 hm.% → pevnost ze 180 na 480 MPa, nevýhodou je zkřehnutí)

Základní přednosti:

- nižší hustota oproti ocelím ( $\rho = 4,55$  g/ccm),
- vysoká specifická pevnost při 250 – 500 °C, kde už nelze použít Al, Mg,
- vysoká pevnost i při záporných teplotách,
- odolnost proti únavovému porušení (povrch bez vrubů a rýh)
- vynikající korozní odolnost (velmi stabilní vrstva oxidu Ti)
- dobrá tvárnost za studena, u některých slitin superplasticita
- nízká teplotní roztažnost => nízká tepelná napětí
- velké možnosti ovládnutí struktury a vlastností pomocí tepelného zpracování

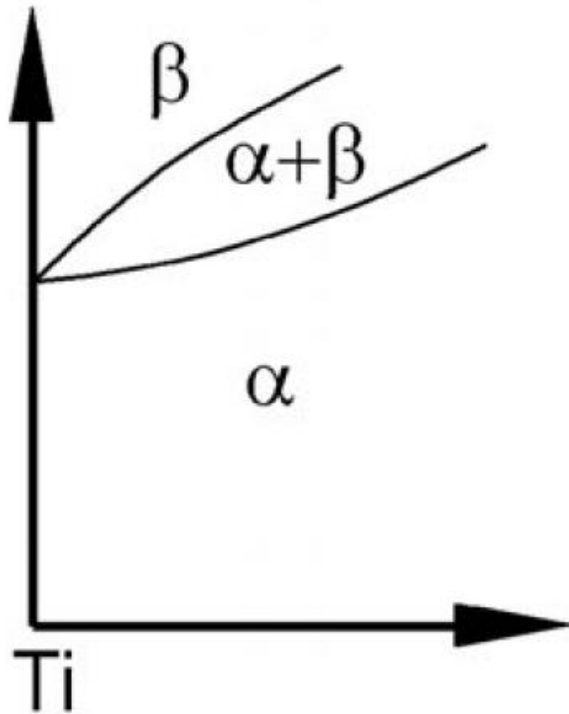


## *Klasifikace slitin na bázi titanu*

- ***$\alpha$  slitiny*** – obsahují neutrální legující prvky, např. cín, nebo  $\alpha$  stabilizátory (Al, O). Tepelné zpracování se obvykle neprovádí.
- slitiny  $\alpha$  s malým podílem tvárné  $\beta$  fáze. Kromě  $\alpha$  stabilizátorů obsahují 1 - 2%  $\beta$  stabilizátorů.
- ***$\alpha + \beta$  slitiny*** – metastabilní slitiny, které obsahují kombinaci  $\alpha$  a  $\beta$  stabilizátorů, vlastnosti jsou ovladatelné tepelným zpracováním (při obsahu hliníku nad 9 hm.% precipituje  $Ti_3Al$  ( $T_{rozp} = 550$  °C), během žíhání přerozdělení prvků mezi  $\alpha$  a  $\beta$  fázemi, při dostatečném množství  $\alpha$  stabilizátorů může  $Ti_3Al$  precipitovat v  $\alpha$  fázi)
- ***$\beta$  slitiny*** – obsahují dostatečné množství  $\beta$  stabilizátorů, aby byla  $\beta$  fáze stabilní během kalení a během stárnutí precipituje  $\alpha$  fáze, metastabilní slitiny, vlastnosti jsou ovladatelné tepelným zpracováním, (intersticiální zpevnění, zpevnění tuhého roztoku, dislokační zpevnění, precipitační zpevnění – separace fází ( $\beta_{lean} + \beta_{rich}$ ) – v silně stabilizovaných slitinách, vznik  $\omega$  fáze – méně stabilizované slitiny, precipitace  $\alpha$  fáze – výrazné zpevnění)

## *Vliv přísadových prvků na konstituci slitin*

Interakce mezi legujícími přísadami není prozatím dobře objasněna

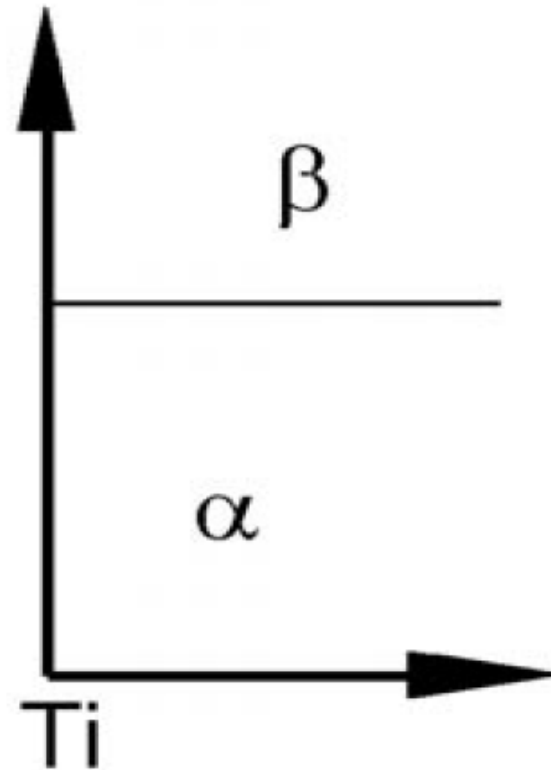


Stabilizátory  $\alpha$  - fáze:

Al, N, O, C,

substituční prvky zpevňují tuhý roztok  
(velikost atomů, elektronová struktura)

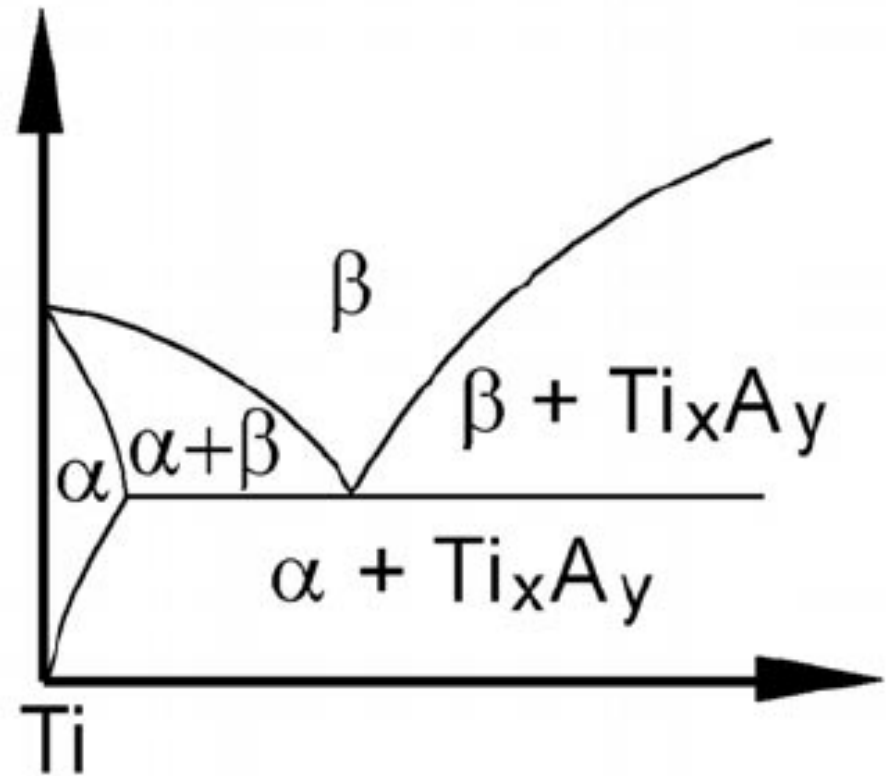
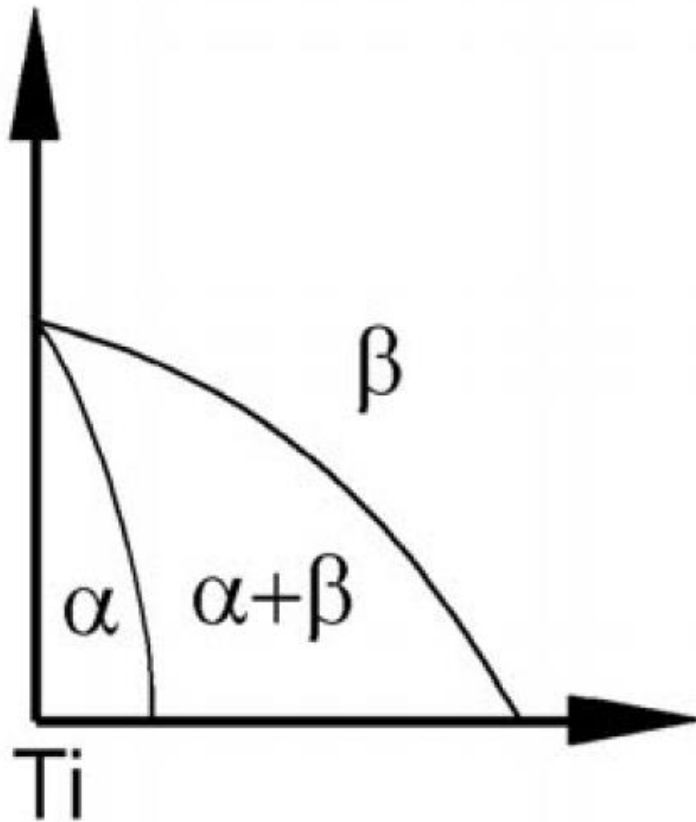
$$[\text{Al}]_{\text{eq}} = [\text{Al}] + 0,33 [\text{Sn}] + 0,17 [\text{Zr}] + 10 [\text{O} + \text{C} + 2\text{N}]$$



Neutrální prvky: Sn, Zr,

téměř neovlivňují teplotu přechodu  
 $\alpha/\beta$

## Stabilizátory $\beta$ fáze



Stabilizátory  $\beta$  fáze:

V, Mo, Ta, Nb

některé atomy zpevňují

tuhý roztok, některé ne (např. Nb)

$[Mo]_{eq} = [Mo] + 0,67 [V] + 0,44 [W] + 0,28 [Nb] + 0,22 [Ta] +$

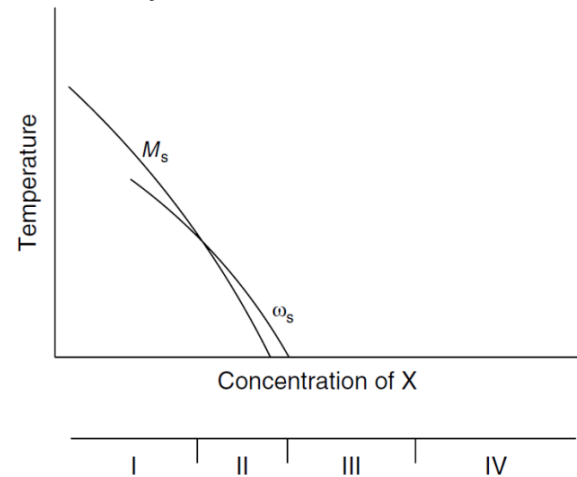
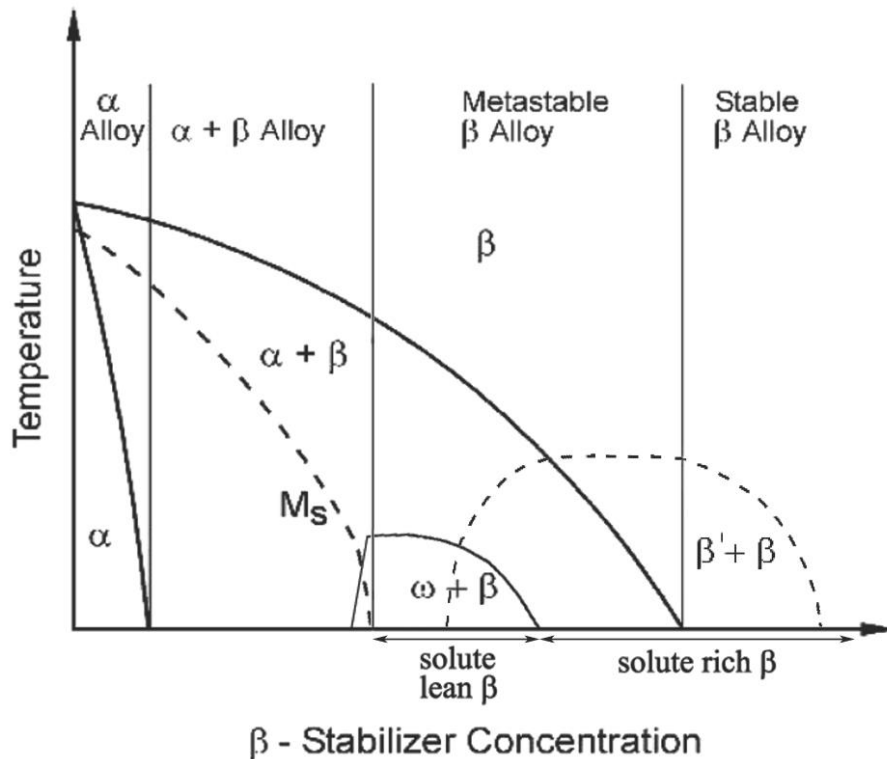
$+ 2,9 [Fe] + 1,6 [Cr] + 1,25 [Ni] + 1,7 [Mn] + 1,7 [Co] - 1,0 [Al]$

$\beta$  eutektoidní rozpad: Fe, Cr,

Cu, Ni, Si

vytvářejí minoritní fáze

# Vliv teploty na fázové složení titanových slitin



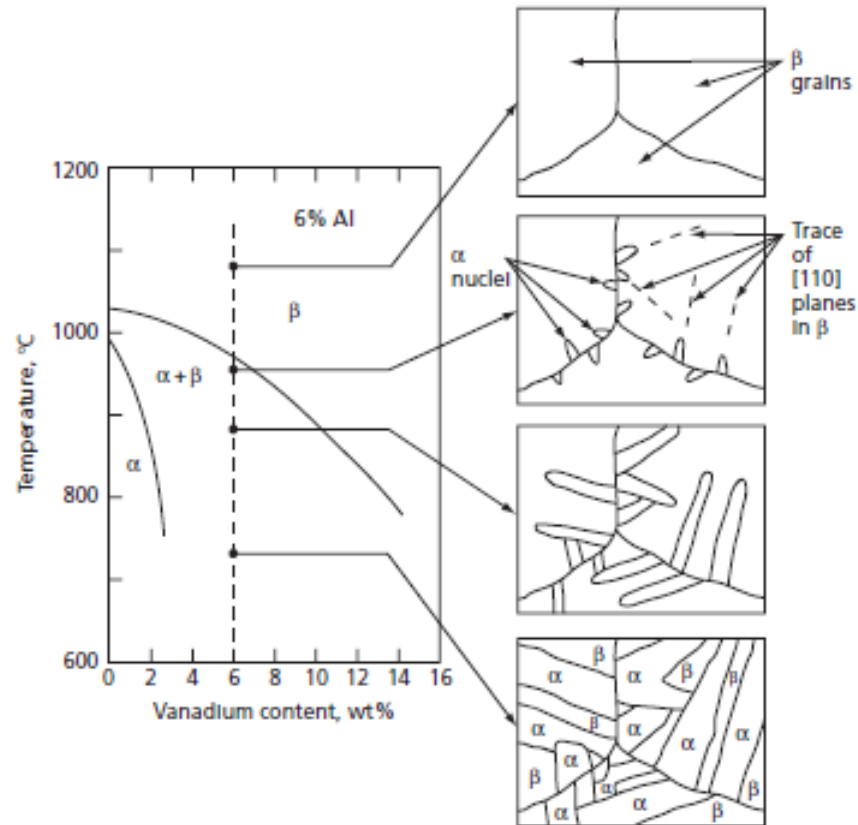
- kde: I – oblast tvorby  $\alpha'$  martenzitu  
II –  $\beta$  + atermická fáze  $\omega$   
III –  $\beta$  + fáze  $\omega$  vzniklá stárnutím  
IV -  $\beta$  (metastabilní nebo stabilní)

## Slitina Ti-6Al-4V

- typ  $\alpha + \beta$ , přeměna  $\alpha + \beta \rightarrow \beta$  při 995 °C, hustota 4,43 g/ccm,
- vytvrditelná až na 1100 MPa do tloušťky 25 mm,
  - dobrá svařitelnost, obrobitelnost jako austenitická ocel,
  - použitelnost v rozmezí (-210 až + 400 °C), s klesající teplotou roste pevnost
  - únavové vlastnosti silně závisejí na kvalitě povrchu, mikrostruktuře, prostředí, napěťovém cyklu

# *Mikrostrukturu slitiny Ti – 6Al – 4V lze řízeně ovládat tepelným zpracováním*

**Příklad TZ:**



**Schéma vzniku Widmanstättenovy dvoufázové  $\alpha + \beta$  struktury v Ti – 6Al – 4V slitině při pomalém ochlazování z oblasti  $\beta$  fáze**

# *Typy fázových transformací v titanu a jeho slitinách*

Martenzitická přeměna:  $\alpha'$  a  $\alpha''$  (v čistém Ti,  $\alpha + \beta$  slitinách),

- 2 morfologie fáze  $\alpha'$  (laťkový a deskový martenzit)
- 2 krystalové struktury (hexagonální  $\alpha'$  a ortorombická  $\alpha''$ )

Displacivní transformace: -  $\omega$  fáze (prekurzor pro tvorbu  $\alpha$  fáze)

- bezdifúzní transformace
- reverzibilní transformace s malou teplotní hysterezí
- neexistuje habitová rovina

Fluktuace složení:

- spinodální rozpad

Nukleace a růst  $\alpha$  fáze:

- přímá nukleace
- nukleace s využitím „prekurzoru“

Reakce uspořádání:

- SRO,
- LRO,
- vliv třetích prvků, včetně kyslíku

*Obdobně široká škála fázových transformací jako ve slitinách na bázi železa*

# ***Technická důležitost jednotlivých typů transformací***

## ***Martenzit***

- martenzit v Ti slitinách není tvrdý
- důležitý prostředek pro zjemnění mikrostruktury v tenkých průřezech

## ***Displacivní transformace ( $\omega$ fáze)***

- shlukování (clustering) poloh atomů (bezdifúzní, „shuffle“)
- důležitý mechanismus při tvorbě „prekurzoru“ tvorby  $\alpha$  fáze
- klíčový význam při řízení tvorby  $\alpha$  fáze během tepelného zpracování dvoufázových slitin

## ***Fluktuace složení (fázová separace, homogenní transformace)***

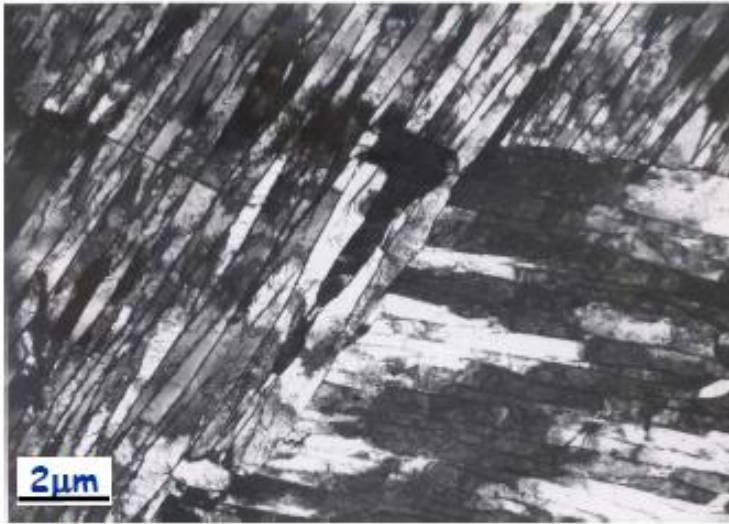
- spinodální rozpad přesyceného tuhého roztoku

## ***Nukleace a růst precipitátů $\alpha$ fáze***

- velikost, distribuce a četnost na jednotku objemu řídí pevnostní vlastnosti
- u tlustých průřezů je důležité použít „prekurzorní“ nukleační místa



# Morfologie $\alpha'$ martenzitu



## *Lat'kový martenzit*

- vysoká teplota  $M_s$
- vysoká hustota dislokací
- habitová rovina  $\{111\}_\beta$
- typický produkt v CP (komerčně čistý) Ti a v  $\alpha$  slitinách



## *Deskový martenzit*

- nízká teplota  $M_s$
- vysoká hustota dislokací, trans. dvojčata
- habitová rovina  $\{334\}_\beta$
- typický produkt v kalených  $\beta$  slitinách a v  $\alpha + \beta$  slitinách

## *Popouštění (stárnutí) $\alpha'$ martenzitu*

### *Hexagonální $\alpha'$*

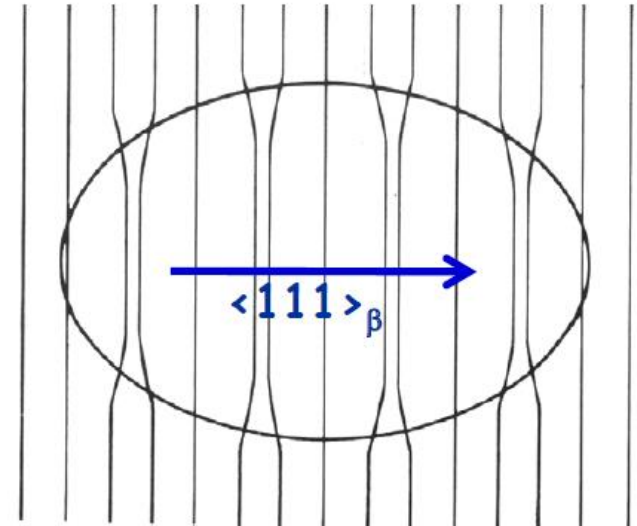
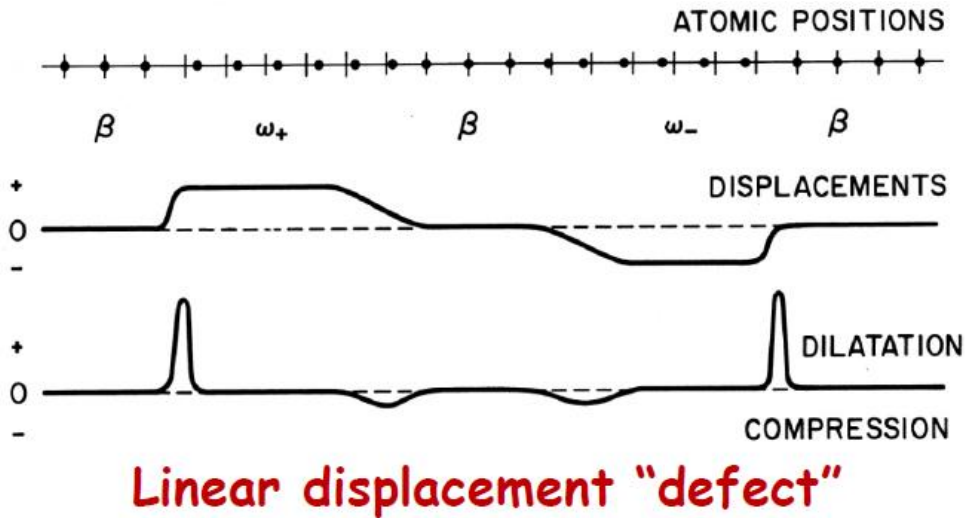
- Vzniká nukleací a smykem – zdědí chemické složení  $\beta$  matrice
- Je to hexagonální  $\alpha$ -Ti fáze přesycená legujícími prvky ( $\beta$  stabilizátory)
- Stárnutí způsobuje precipitaci  $\beta$  fáze nebo vznik eutektoidních produktů ( $\beta$  fáze nukleuje heterogenně, distribuce hrubých částic, nepřispívá ke zpevnění)

### *Ortorombický $\alpha''$*

- $\alpha''$  fáze je silně přesycená Mo, příp. dalšími  $\beta$  prvky
- Rozpadá se za vzniku jemných precipitátů  $\beta$  fáze
- Jedná se o spinodální reakci, která je doprovázena velkým zvýšením tvrdosti, ale poklesem houževnatosti

## *Schéma displacivní $\beta \rightarrow \omega$ fázové přeměny*

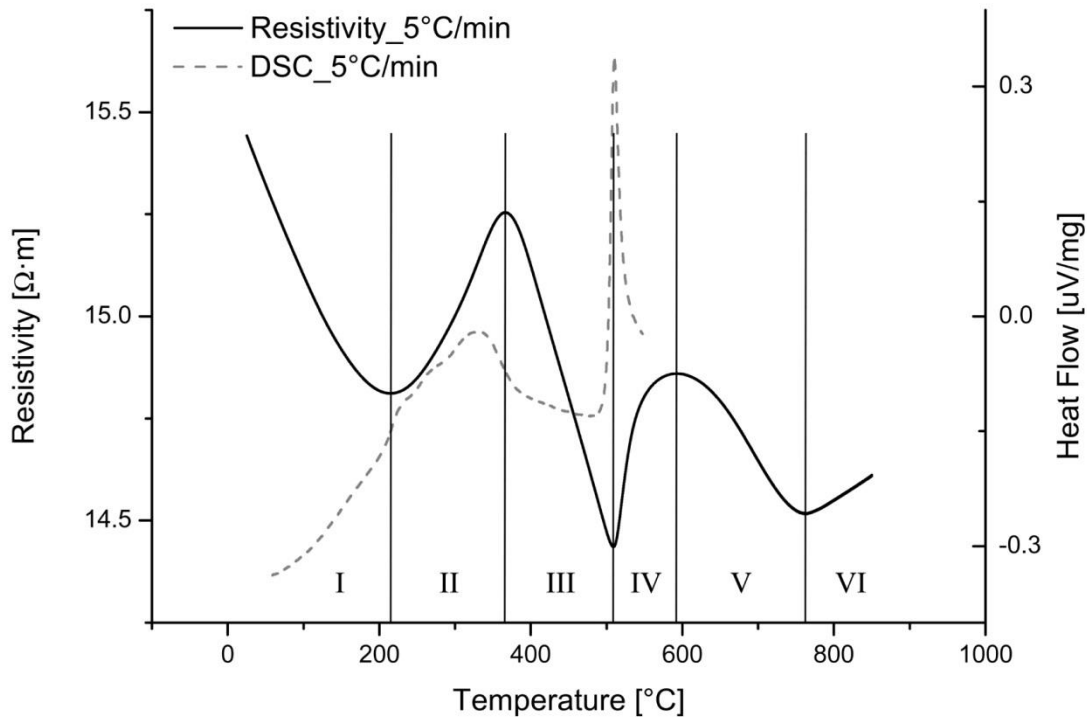
- atermický vznik  $\omega$  fáze
- posuvy atomů vyvolávají tahová a tlaková napětí



- příklad shlukování atomových poloh
- bezdifúzní přeměna – nedochází k výměně atomových pozic (mechanismus „shuffle“)
- atermický charakter
- prekurzorem vzniku  $\omega$  fáze je komplexní „streaking“ v SAED difraktogramech (difuzní rozptyl elektronů v určitých směrech)
- při vyšších teplotách: stabilizace a růst  $\omega$  fáze (difúzní proces spojený se změnami chemického složení)

# Transformace $\beta \rightarrow \omega \rightarrow \alpha$

In – situ měření: elektrického odporu, diferenciální scannovací kalorimetrie (DSC)  
Rychlost ohřevu: 5 °C/ min.



- I. Rozpouštění atermické  $\omega$  fáze, reverzibilní bezdifúzní proces
- II. Stabilizace a růst izotermické  $\omega$  fáze – difúzní proces
- III. Rozpouštění  $\omega$  fáze
- IV. Precipitace  $\alpha$  fáze
- V. Rozpouštění  $\alpha$  fáze
- VI. Nad přechodovou teplotou – pouze  $\beta$  fáze

## *Reakce uspořádání (SRO a LRO)*

dvě reakce, ale pouze první má význam pro konvenční Ti slitiny

### *$\alpha_2$ ( $Ti_3Al$ )*

- vznik koherentních precipitátů v  $\alpha$  fázi při Al > 6 hm. %
- uspořádání na krátkou vzdálenost začíná při cca 4 hm. % Al
- zvýšený obsah kyslíku stabilizuje  $\alpha_2$
- během deformace dochází k protínání  $\alpha_2$  a dochází k lokalizaci skluzu

*to je špatné pro:* iniciaci únavové trhliny, odolnost vůči korozi pod napětím, tažnost

*to je dobré pro:* odolnost vůči šíření únavové trhliny

### *B2 (CsCl) – pouze u Ti aluminidů*

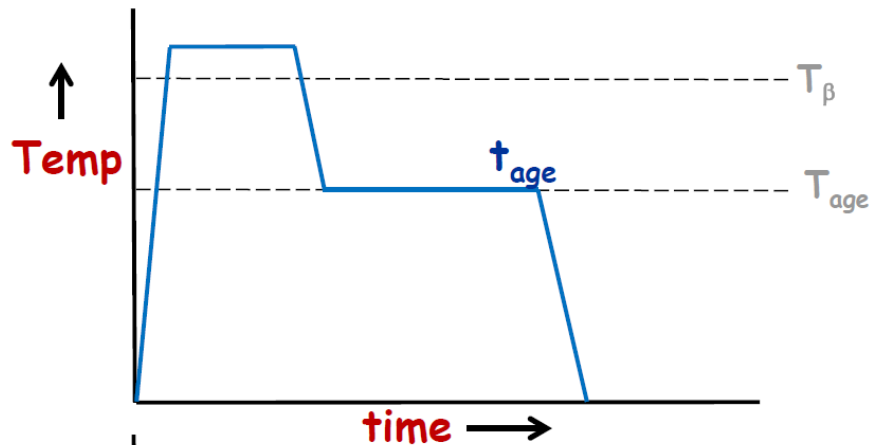
- vzniká uspořádáním atomů v  $\beta$  fázi v Ti aluminidech
- rozkládá se spinodální reakcí během stárnutí (nízká tažnost, špatná celková tvárnost)

# *Tepelného zpracování dvoufázových titanových slitin*

Zpravidla kombinace vysokoteplotního ohřevu, kalení a stárnutí

Parametry TZ umožňují optimalizaci výsledné mikrostruktury a vlastností

**Příklady:** TZ s vysokoteplotním ohřevem nad  $T_\beta$  ( $\beta$  transus)

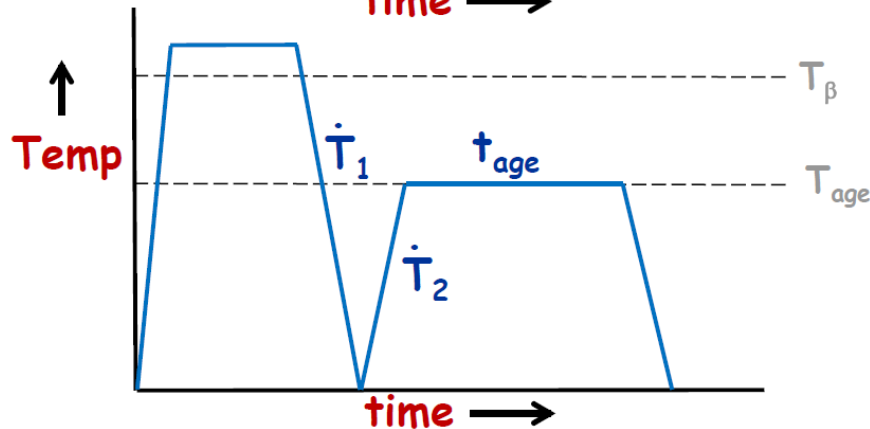


*Důležité parametry:*

rychlost ochlazování na  $T_{AGE}$

$T_{AGE}$

$t_{AGE}$



*Důležité parametry:*

rychlost ochlazování při kalení

rychlost ohřevu  $dT/dt$  k  $t_{AGE}$

$T_{AGE}$

Pozn.: V technické praxi se velmi často používá vysokoteplotní ohřev pod  $T_\beta$