

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale
«Caratteristiche ed applicazioni delle
leghe di titanio beta»***

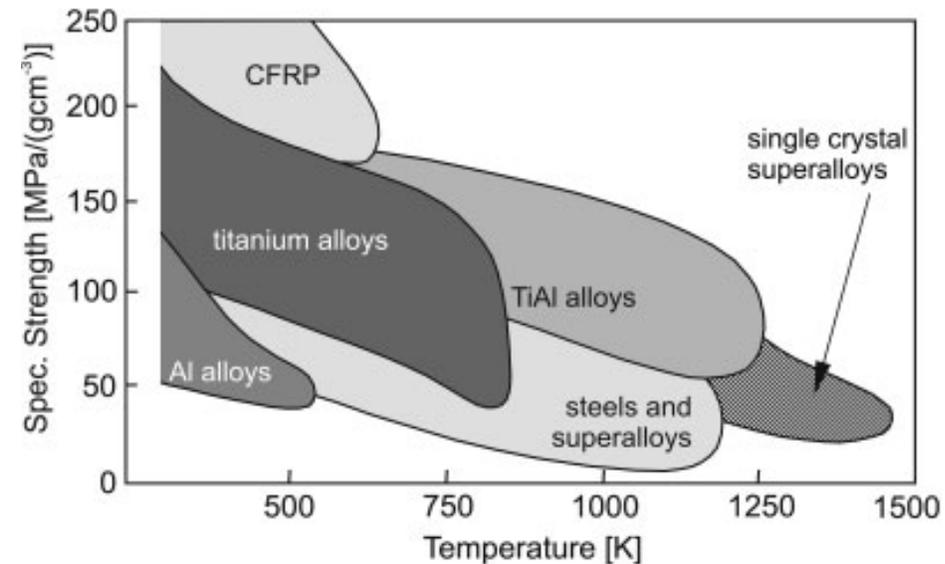
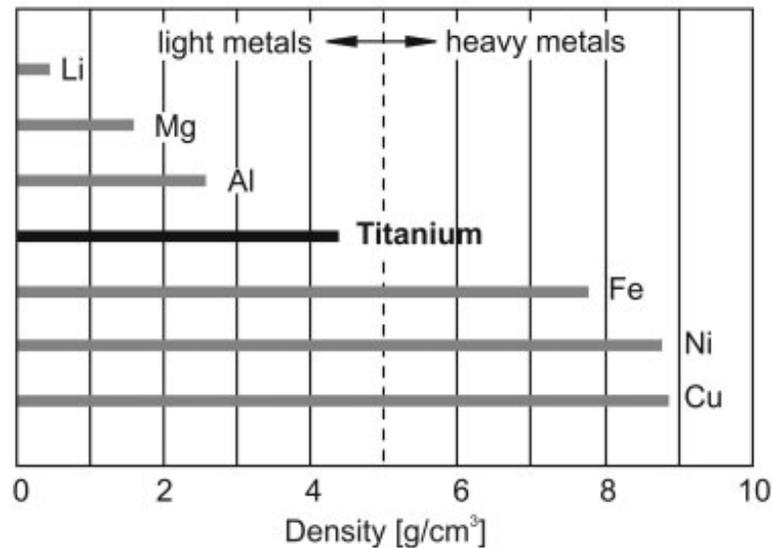
Tutor universitario:

Prof. Manuele Dabalà

Laureando: *Elia Bruni*

Padova, 13/07/2022

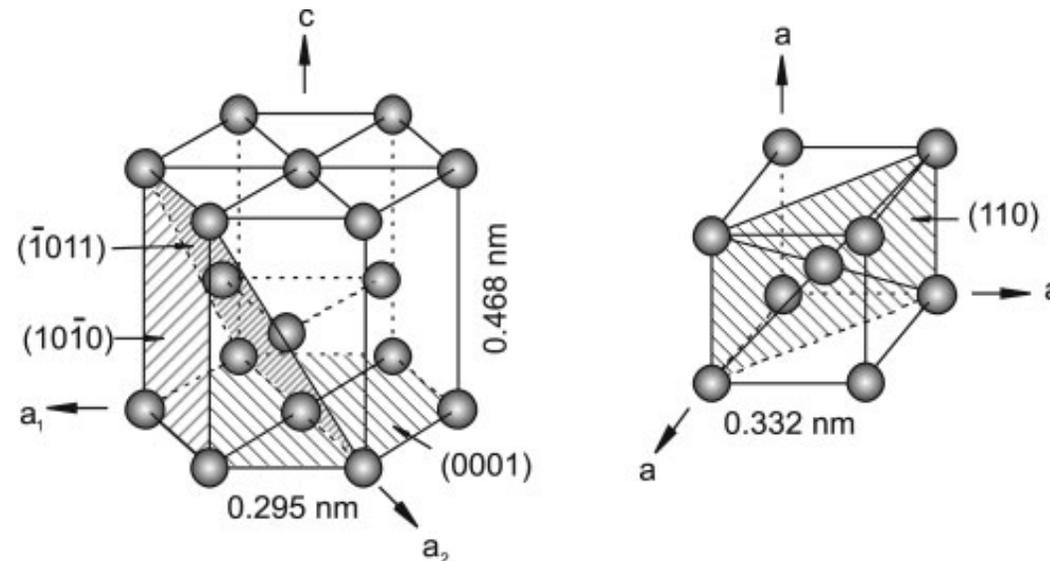
- Scoperto nel 1791, isolato nel 1910 e utilizzato industrialmente dal 1932 con l'introduzione del «processo Kroll» che prevede la riduzione del tetracloruro di titanio
- Non si trova in natura allo stato puro, ma all'interno di ilmenite e rutilio
- Metallo non ferroso e leggero: densità di 4,51 g/cm³
- Utilizzato principalmente per produrre vernici, in campo aerospaziale, automotive, biomedico, navale e alimentare



	Numero atomico	Peso atomico	Densità (g/cm ³)	Punto di fusione (°C)	Coeffic. termico di esp. (/°C)	Calore specifico (cal/g/°C)	Conducib. Termica (cal/cm ³ /sec/°C/cm)	Conducib. Elettrica (%IACS)	Modulo di Young (MPa)	Coeffic. di Poisson
Titanio	22	47,90	4,51	1,668	8,4x10 ⁻⁶	0,124	0,041	31	106,000	0,34

- Il titanio gode di grande interesse nella realtà industriale grazie alla ridotta densità e alle elevate caratteristiche di resistenza meccanica che lo portano ad essere uno dei migliori metalli in termini di resistenza specifica
- Ottima resistenza alla corrosione dovuta alla formazione di una patina di ossido protettivo se esposto ad un'atmosfera contenente ossigeno
- Comportamento a creep molto buono grazie a bassi coefficienti di conduzione ed espansione termica
- Amagneticità, biocompatibilità, basso modulo elastico
- Rapporto $\frac{\sigma_s}{\sigma_R} \approx 0,9 - 0,95$

- Comportamento allotropico con temperatura di transus a 882°C
- Per temperature $< 882^{\circ}\text{C}$ si parla di titanio α con reticolo esagonale compatto
- Per temperature $> 882^{\circ}\text{C}$ si ha titanio β con reticolo cubico a corpo centrato
- Le diverse strutture cristalline portano a differenti comportamenti meccanici: il titanio β presenta migliore duttilità e maggiore possibilità di deformazione plastica, mentre il titanio α ha superiore resistenza al creep
- Presenta transizione martensitica a seguito di rapido raffreddamento che porta a una componente α aciculare e leggermente rafforzante

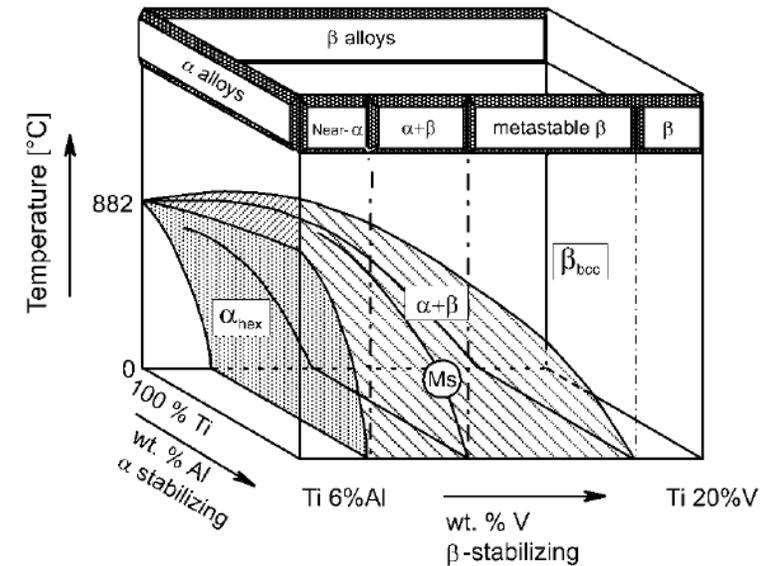


Gli elementi alliganti del titanio possono essere:

- **α stabilizzanti:** alluminio, ossigeno, azoto, carbonio
- **β stabilizzanti:** molibdeno, vanadio, ferro, manganese
- **Neutri:** stagno, zirconio

In base alla composizione chimica e alla struttura cristallina si distinguono le seguenti leghe:

- **Leghe α :** struttura hcp con basso peso specifico, non trattabili termicamente
- **Leghe quasi α :** minima quantità (1-2%) di componente β
- **Leghe $\alpha+\beta$:** 5-40% di componente β , trattabili termicamente. Sono le più diffuse
- **Leghe β metastabili:** assenza di fase α anche dopo rapido raffreddamento, trattabili termicamente
- **Leghe β stabili:** componente β stabile a temperatura ambiente, non trattabili, molto legate con elementi β -stabilizzanti



Definizione: Composti con sufficiente contenuto di elementi β -stabilizzanti tali da impedire la trasformazione martensitica durante un rapido raffreddamento. Conservano il 100% di fase β a temperatura ambiente.

Si distinguono in leghe β **stabili** e **metastabili**: le ultime in opportune condizioni possono presentare una transizione di alcuni cristalli alla fase α .

La stabilità delle leghe si determina dal molibdeno equivalente:

$$Mo_{eq} = 1*Mo + 0.67*V + 0.44*W + 0.28*Nb + 0.22*Ta + 2.9*Fe + 1.6*Cr - 1*Al$$

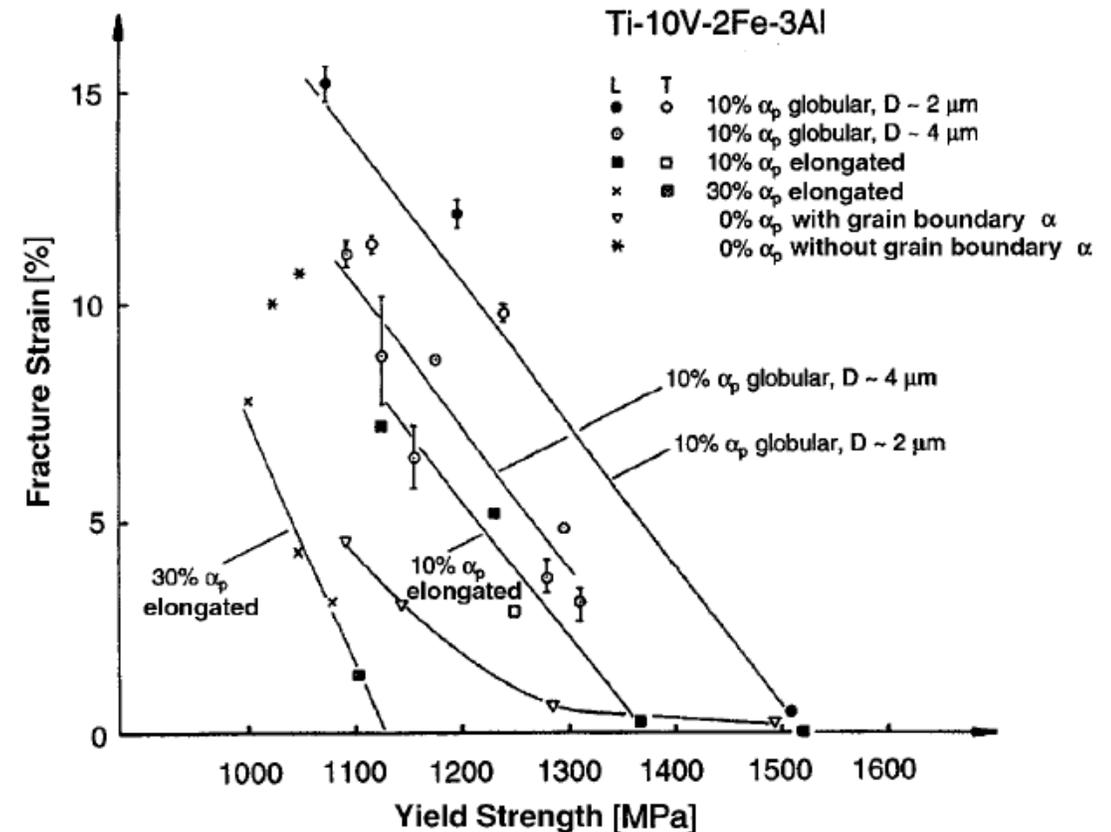
Si ha stabilità per $Mo_{eq} > 10\%$

Dipendono da: lavorazioni precedenti, microstruttura, eventuali trattamenti termici.

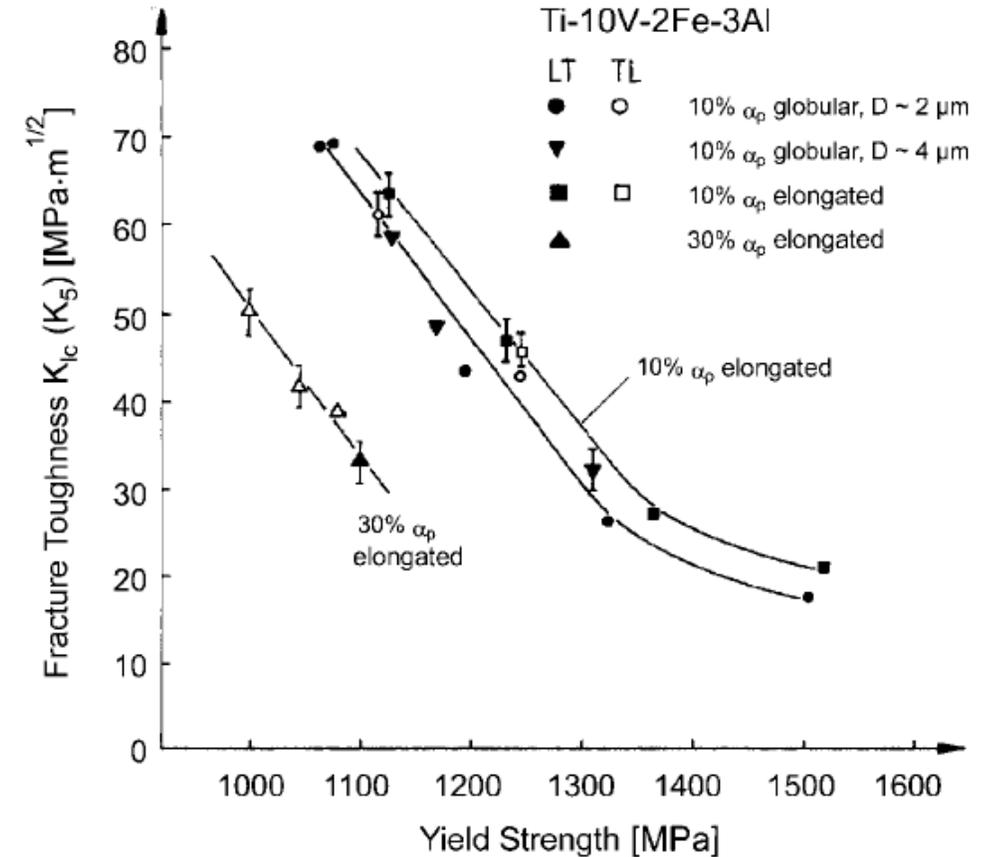
Microstrutture con elevata influenza sulle proprietà meccaniche:

- **Grano β** : le caratteristiche dipendono dalla sua dimensione, distribuzione e risposta ai trattamenti termici. Presenta dipendenza dalla quantità di deformazione presente
- **α primario**: precipitato hcp di fase α che si genera all'interno della matrice β a temperature leggermente minori di β -transus. Può avere forma globulare oppure aciculare
- **α secondario**: precipitato hcp di fase α con effetto rafforzante. Precipita a 400°C-600°C e dipende dalla quantità di materiale incrudito. La precipitazione è omogenea in leghe povere e disomogenea in leghe ricche.
- **α a bordo grano**: patina sottile di componente α dannosa per le proprietà meccaniche
- **ω** : fase intermetallica coerente che si forma in leghe povere di soluti. Effetto fortemente infragilente.

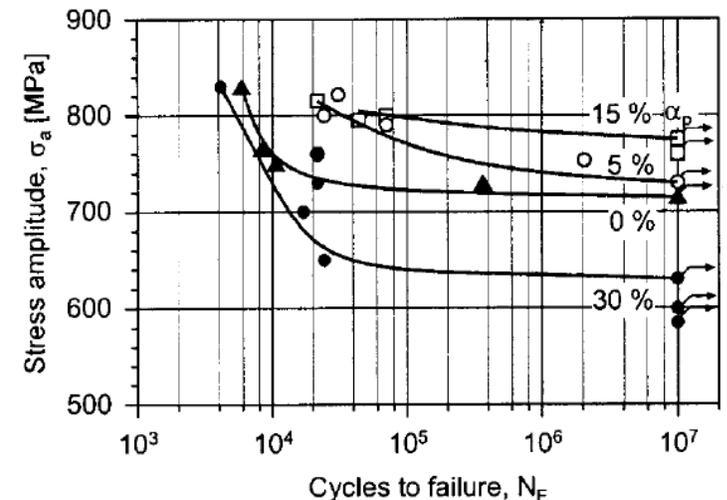
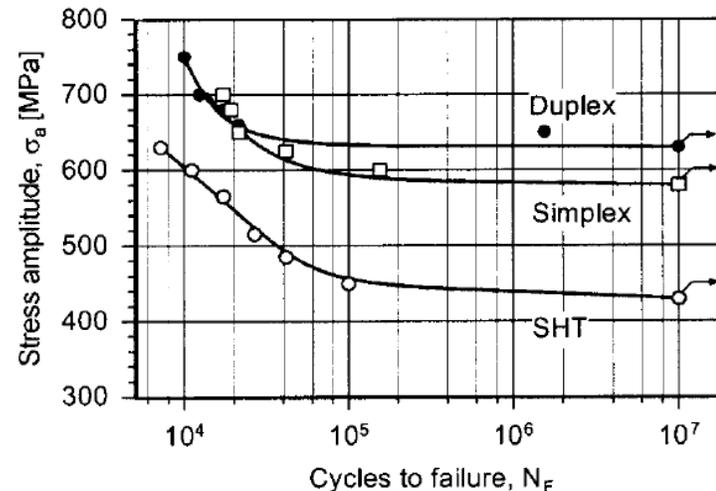
- A seguito di invecchiamento si possono raggiungere **valori di tensione di snervamento molto elevati** (900/1400 MPa), a scapito della duttilità.
- La deformazione si concentra prevalentemente nella matrice invecchiata e la duttilità è ridotta anche dall'elevata differenza della tensione di snervamento tra matrice e α_p
- α_p : duttilità ridotta se c'è ingrossamento del grano, forma aciculare e aumento della frazione volumica (a parità della tensione di snervamento)
- Grano β e α a bordo grano: elevate dimensioni del grano e la presenza di pellicola α a bordo grano, che è poco resistente, riducono la duttilità
- α_s : ininfluenza sulla duttilità, ma consente alla lega di resistere a sollecitazioni più elevate



- Aumentando l'invecchiamento si ha una riduzione della resistenza a frattura in quanto aumentano le differenze tra α_p e la matrice.
- Migliorata dal doppio invecchiamento in quanto si genera un percorso tortuoso tra α_p ed α_s lungo e ad alta energia per la cricca
- α_p : buona tenacità a frattura se di forma allungata in quanto induce la cricca ad una deviazione dal percorso a bassa energia
- Effetto del grano β e di α a bordo grano: promiscuo in base allo stato di tensione, al grado di invecchiamento e alla grandezza della zona deformata plasticamente.
- α a bordo grano: costituisce un percorso a bassa energia preferenziale per la propagazione della cricca

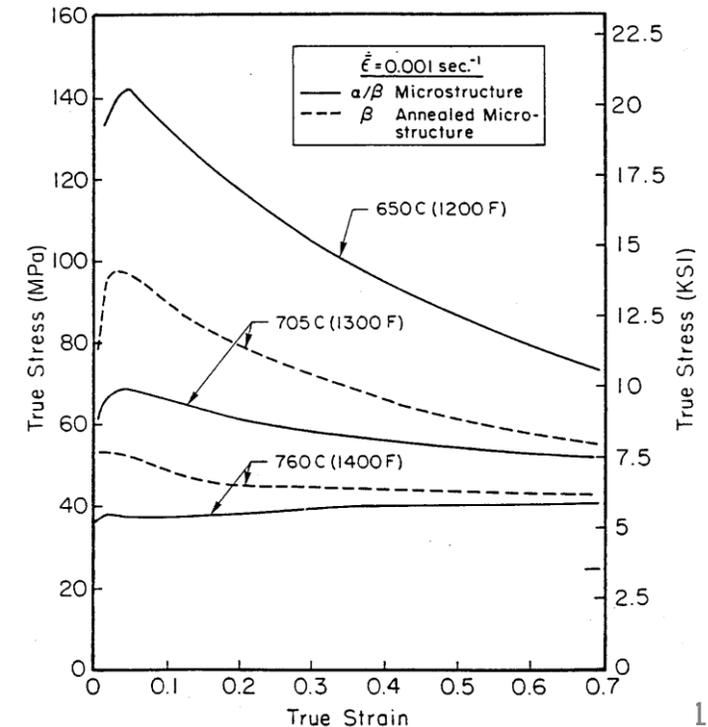
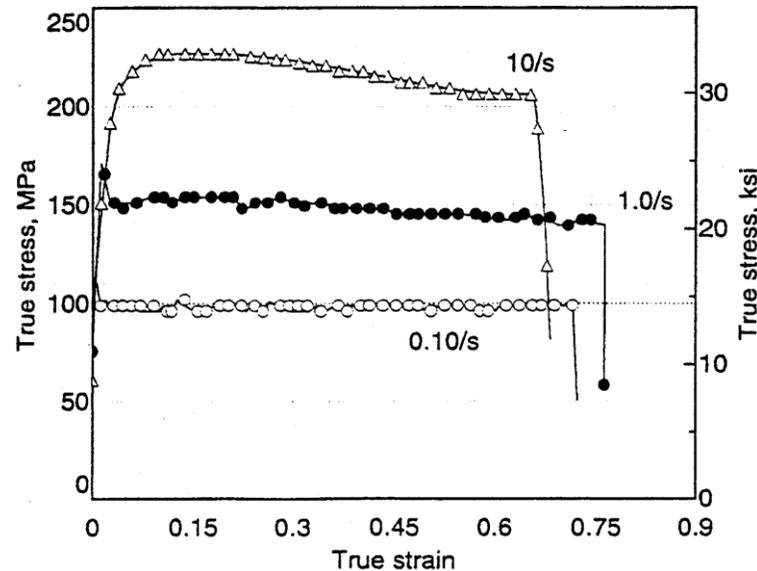


- Generalmente buone prestazioni a fatica, soprattutto a seguito di un doppio invecchiamento che comporta precipitazione omogenea di α_s , senza lasciare zone prive di precipitato.
- Sia un invecchiamento singolo che doppio migliorano la resistenza a fatica
- Grani piccoli di componente β migliorano le prestazioni a fatica
- Piccole quantità di α_p (5%/15%) migliorano la resistenza a fatica in quanto impediscono la formazione di uno strato continuo di α a bordo grano
- Zone senza precipitato α_s peggiorano considerevolmente il comportamento a fatica
- Insensibilità della fase di propagazione della cricca dai fattori microstrutturali
- Possibilità di migliorare la vita a fatica tramite trattamenti superficiali e termici localizzati che non alterano la duttilità del cuore dei componenti:
pallinatura, lucidatura, deep rolling



- 2 fasi di lavorazione: la prima in campo β , la seconda di laminazione o forgiatura a temperature superiori o inferiori alla temperatura di transus
- Prima lavorazione: meccanismo di recupero dinamico con ricristallizzazione del materiale incrudito che porta a bordi grano seghettati ad alto e medio angolo
- Seconda lavorazione in campo β : microstruttura mista con disomogeneità nella dimensione dei grani a causa della ricristallizzazione selettiva
- Seconda lavorazione in campo $\alpha+\beta$: andamento diverso della curva di trazione del materiale con conseguente addolcimento dovuto alla fase α .

Valori maggiori di tensione si registrano quando la fase α ha forma aciculare e allungata. La deformazione si concentra in prossimità della fase β che è più deformabile



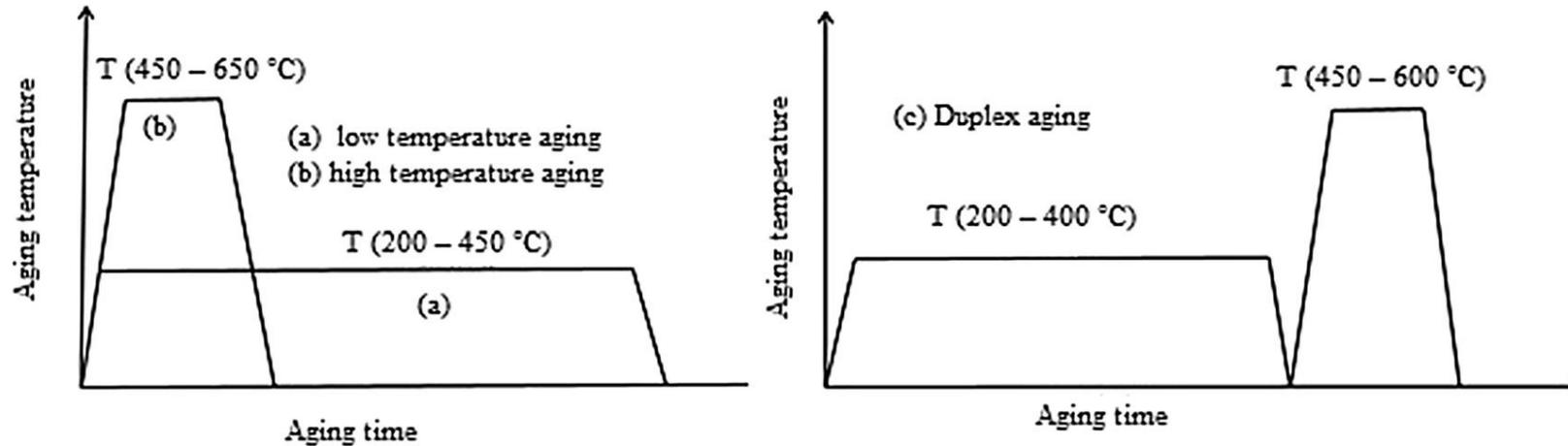
SOLUBILIZZAZIONE:

- Possono essere trattate termicamente solo le leghe β metastabili, per le leghe stabili l'unico effetto è l'ingrossamento del grano cristallino
- Solubilizzazione condotta in 2 modi:
 - Temperatura $>$ β -transus: ingrossamento del grano β , perdita di proprietà meccaniche
 - Temperatura $<$ β -transus: precipitazione di α_p fine, limitazione alla crescita del grano cristallino, miglioramento dell'allungamento a rottura, precipitazione di α_s uniformemente distribuito, soppressione della precipitazione di α a bordo grano

INVECCHIAMENTO:

3 possibili modalità per l'invecchiamento:

- a) Ad alta temperatura: 450°C - 650°C
- b) A bassa temperatura: 200°C - 450°C
- c) Doppio



- **Invecchiamento ad alta temperatura:** precipitazione di fase α a bordo del grano β senza la formazione di fasi intermedie
- **Invecchiamento a bassa temperatura:** richiede un tempo maggiore e si formano le fasi intermedie ω e β'
- **Invecchiamento doppio:** prima fase a bassa temperatura per tempo prolungato in cui si formano le fasi intermedie ω e β' e seconda fase piú rapida ad alta temperatura in cui nuclea α in modo omogeneo e fine, senza lasciare zone prive di precipitato, sopprimendo α a bordo grano. Migliorano le caratteristiche meccaniche della lega
- Importanza della velocità di riscaldamento per la precipitazione omogenea della fase α
- Possibile trattamento criogenico prima dell'invecchiamento per migliorare la risposta del titanio al trattamento

Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo (Beta C)

- Buona duttilità, grani di dimensione moderata e spesso lavorata a caldo con precipitazione uniforme di fase secondaria
- Uso in ambito aeronautico per molle ad uso aerospaziale e viti ad alta resistenza
- Ambito minerario estrattivo: per impianti di trivellazione di olio ed equipaggiamento da esplorazione sotterranea

Ti-10V-2Fe-3Al (Ti 10-2-3)

- Migliore combinazione di resistenza meccanica, resilienza, resistenza a fatica e duttilità
- Lavorazione difficile e minore stabilità della fase β : $Mo_{eq} < 10\%$
- Lavorata tramite forgiatura in campo β seguita da formatura in campo $\alpha+\beta$ e successiva solubilizzazione e invecchiamento
- Usata come materiale per realizzare le celle delle fusoliere degli aerei, nei carrelli di atterraggio e per teste di rotori di elicotteri

Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (Ti 15-3)

- Produzione di nastri e fogli metallici deformabili a freddo e rafforzabili tramite invecchiamento
- Usata per la costruzione di Boeing 777, C-17, supporti di motori Pratt & Whitney
- Impiegata per la costruzione di mazze da softball

Ti-15Mo-2.6Nb-3Al-0.2Si (Timetal 21S)

- Usata per produrre lamiere in metallo a matrice composita
- Buona formabilità, ottima resistenza all'ossidazione e buona resistenza al creep
- Impiegata per strutture soggette ad ampio sbalzo termico:
candele di accensione in motori a combustione interna, condotti di aria, ugelli
- Usata da per le «gondole» aeronautiche data la buona resistenza alla corrosione derivante da fluidi idraulici

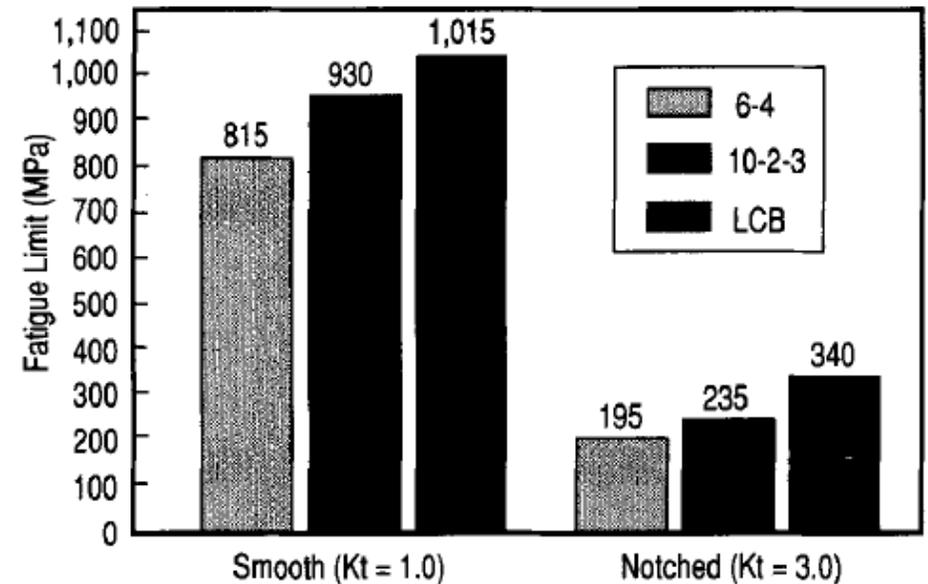
Nuovi campi di applicazione:

- Automotive: sospensioni, comando valvole
- Mercato di consumo generale

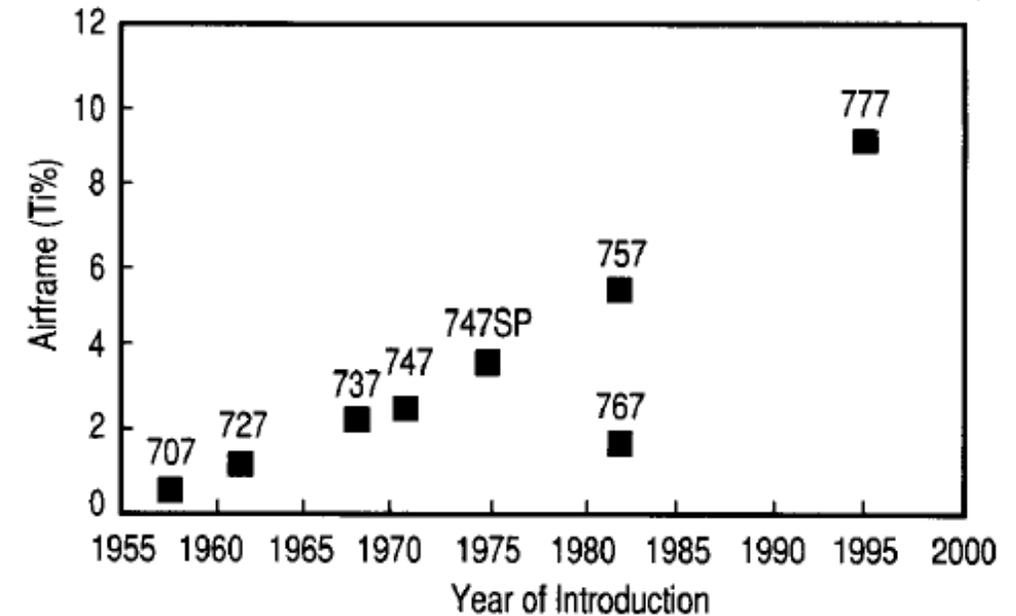
Problema: elevato costo di produzione e degli elementi alliganti

Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al (Low cost beta)

- Combinazione di ferro e molibdeno
- Costi di produzione abbattuti
- Elevate prestazioni meccaniche, ottima formabilità, buona resistenza alla corrosione ed eccellente resistenza a fatica, migliore di qualsiasi altra lega di titanio
- Impiegata per barre di torsione e molle



- Per ottenere le migliori proprietà meccaniche: α_p in quantità moderate, α_s omogeneo, grano β fine e soppressione di α a bordo grano
- Le leghe β del titanio offrono prestazioni molto elevate, soprattutto in relazione al loro peso contenuto e per questo hanno trovato grande sviluppo in campo aerospaziale
- Negli anni l'utilizzo delle leghe β si è esteso anche ad altri settori industriali: automotive e sportivo
- Rimane il problema dell'elevato costo di produzione che limita l'impiego del titanio nel mercato di consumo quotidiano



Grafici tratti da: Leyens, C., et al. Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Applications. Wiley-VCH, 2003.

Paul J. Bania *Beta Titanium Alloys and Their Role in the Titanium Industry*, French Metallurgical and Materials Society