

TITANIO E SUE LEGHE. TRATTAMENTI TERMICI Ti 6Al 4V

Lezione per il 12° Corso di Aggiornamento sui Trattamenti Termici dei Metalli.
AIM Milano . Ottobre 2007

ELIO GIANOTTI

Trattamenti Termici Ferioli & Gianotti Rivoli – To

Proprietà chimico-fisiche del titanio e sue forme allotropiche

Peso specifico 4.51 g/cm^3 (Fe 7.9, Al 2.7, Mg 1.74)

Punto di fusione 1668°C (Fe 1530°C , Al 660°C , Mg 649°C)

Abbondanza in natura del Ti e dei metalli più usati, in ordine decrescente Al, Fe, Mg, Ti.

Il Ti è un metallo allotropico, esiste in due forme cristalline:

Alfa (esagonale compatta) $\xrightleftharpoons{885^\circ\text{C}}$ Beta (cubica corpo centrata)

La temperatura di trasformazione, 885°C , è chiamata “beta transus” le due fasi allotropiche sono illustrate nella fig.1.

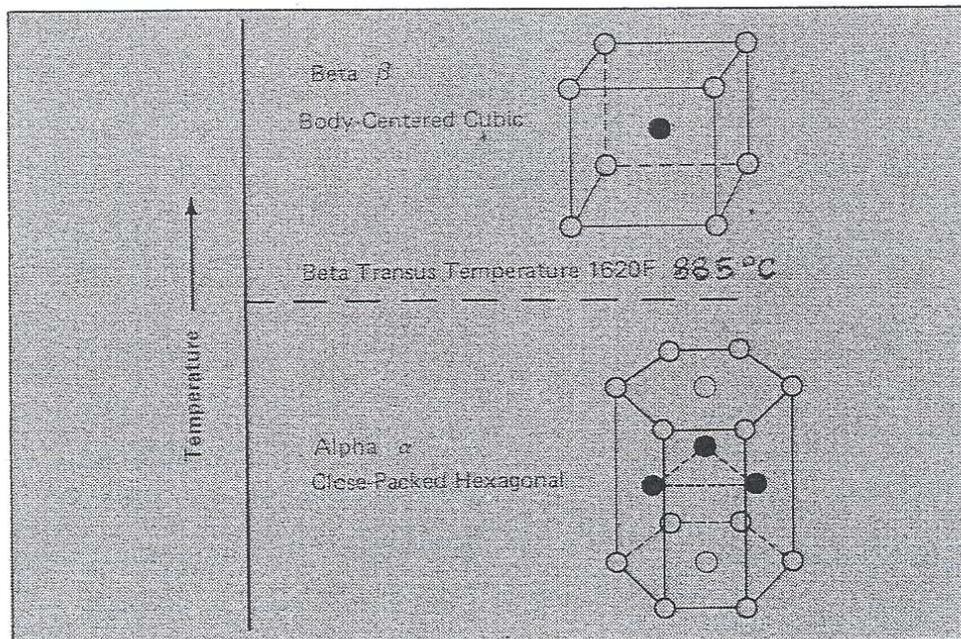


Fig.1 Struttura cristallina del Titanio

La temperatura di “beta transus” cambia con l’aggiunta di elementi leganti:

Alfa stabilizzanti sono **Al O N C Gallio Germanio** perché innalzano la temperatura di transus

Beta stabilizzanti sono **V Mo Ta Columbio - Mn Fe Cr Co Cu Ni Si** abbassano la temperatura di transus.

Inerti, perché non influiscono sulla temperatura sono **Zr e Sn**. Questi elementi, anche se non intervengono nell’equilibrio delle fasi, aumentano la resistenza delle leghe che li contengono.

Esistono quindi:

- **Leghe alfa** o quasi alfa che possono solo essere ricotte o distese.
- **Leghe beta** metastabili a temperatura ambiente, che possono essere invecchiate con aumento di resistenza oppure temprate da alta temperatura risultano solubilizzate (ricotte).
- **Leghe alfa-beta** che si adattano a tutti i trattamenti. Contengono fasi alfa e beta contemporaneamente a temperatura ambiente.

DIAGRAMMI DI STATO

Sistema α stabilizzato

In fig.2 è rappresentato schematicamente un diagramma binario di un sistema α stabilizzato.

In questo sistema l'aggiunta di elementi alfa stabilizzanti solubili nella fase α aumentano la temperatura del campo di esistenza della fase α per cui le temperature di alfa e beta transus aumentano con l'aumentare del tenore degli elementi leganti.

L'alluminio, il gallio ed il germanio formano una soluzione solida di sostituzione, mentre altri elementi sempre alfa stabilizzanti come ossigeno, azoto e carbonio formano soluzioni interstiziali

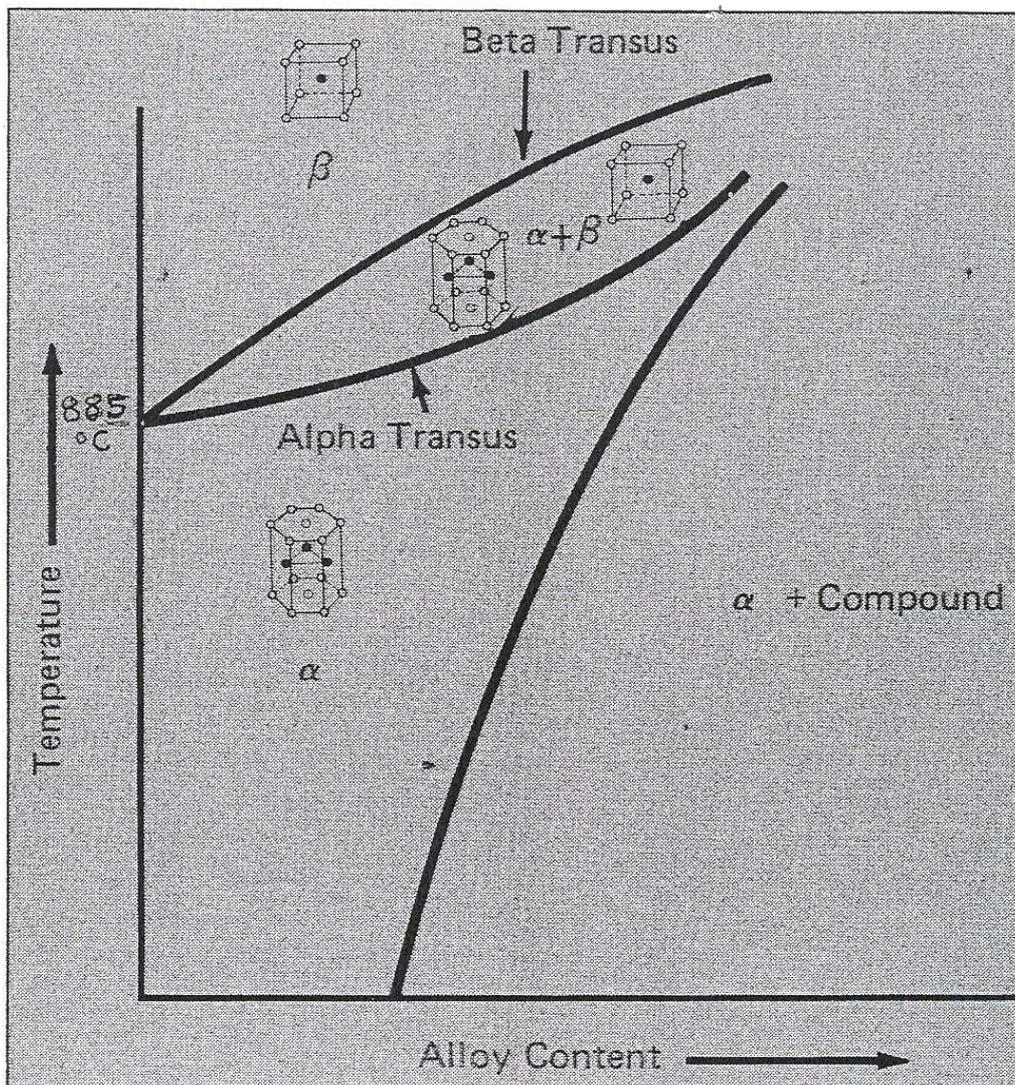


Fig.2 Diagramma di stato del sistema alfa stabilizzato. Alluminio, gallio, germanio, carbonio, ossigeno, azoto aumentano la temperatura di trasformazione alfa-beta.

Sistema β stabilizzato

Il sistema beta stabilizzato può essere diviso in due tipi di diagrammi di stato, il **beta isomorfo** ed il **beta eutettoide**.

La figura 3 rappresenta il diagramma di stato binario del sistema **beta eutettoide**.

In questo sistema l'aggiunta di elementi come manganese, ferro, cromo, cobalto, nichel, rame, silicio, diminuisce la temperatura di trasformazione alfa-beta, ma col raffreddamento in condizioni di equilibrio la fase beta si decompone formando fase alfa e composti intermetallici che entrano a far parte dell'eutettoide.

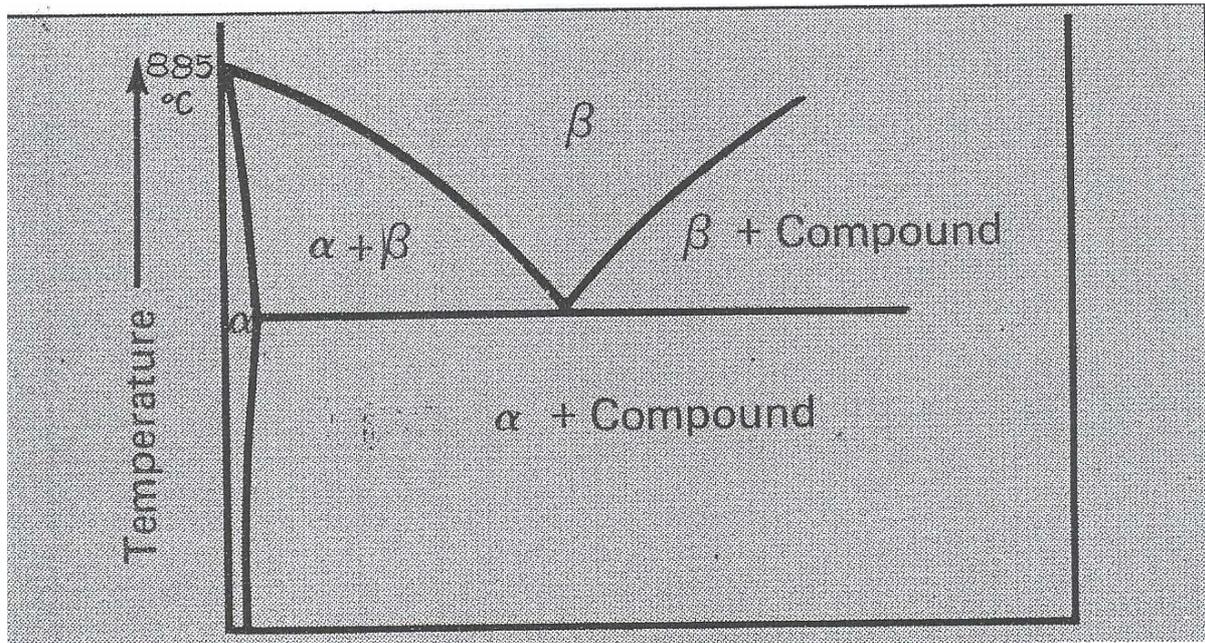


Fig.3 Diagramma di stato del sistema beta eutettoide. Elementi stabilizzanti la fase beta: manganese, ferro, cromo, cobalto, nichel, rame, silicio, (diminuiscono la temperatura di trasformazione alfa-beta).

La figura 4 mostra un tipico diagramma binario del sistema **beta isomorfo**.

In questo sistema l'aggiunta di elementi completamente solubili quali vanadio, molibdeno, tantalio, columbio, diminuisce la temperatura di trasformazione alfa-beta, ma la decomposizione della fase beta in fase alfa più eutettoide non avviene anche in condizioni di equilibrio stabile, quindi la soluzione resta isomorfa.

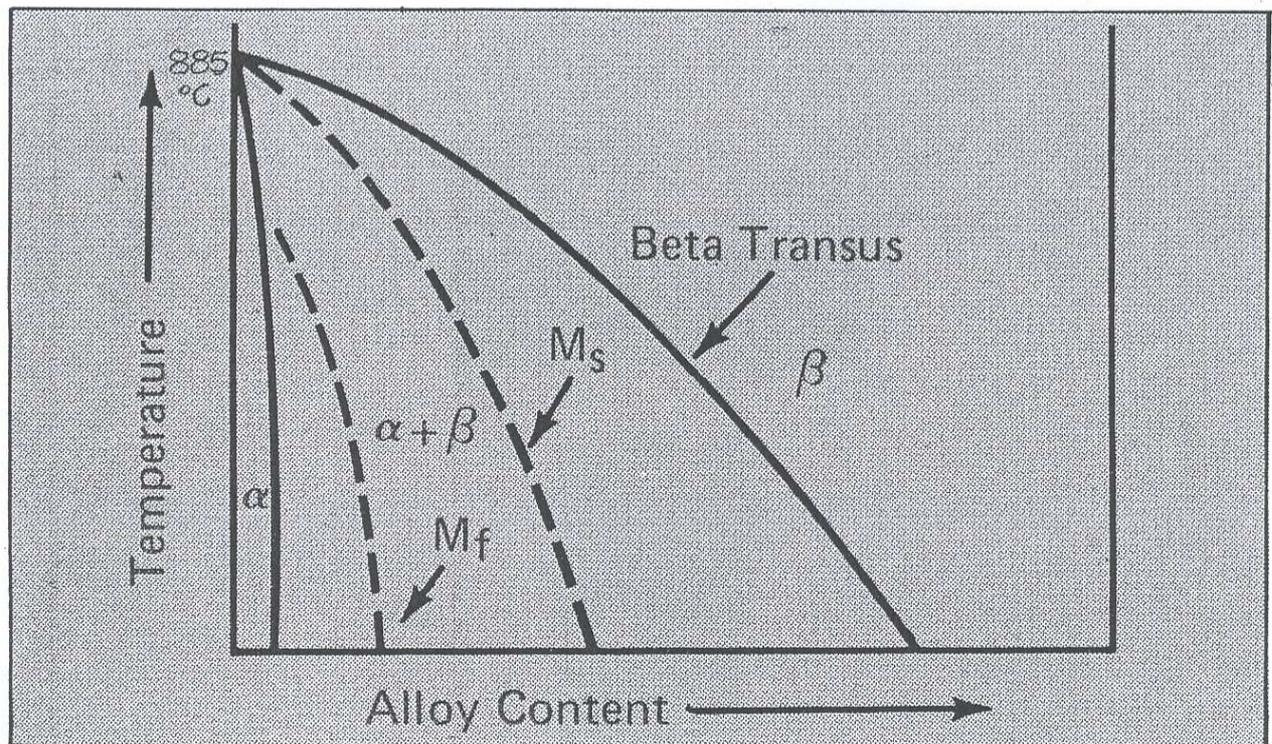


Fig.4 Diagramma di stato del sistema beta isomorfo stabilizzato. Elementi stabilizzanti la fase beta: vanadio, molibdeno, tantalio, columbio, (diminuiscono la temperatura di trasformazione alfa-beta).

Sistema alfa-beta. Lega Ti 6Al 4V (lega 4340)

Viene qui esaminata la sola lega Ti 6Al 4V relativa al sistema alfa-beta perché è la commercialmente più utilizzata. Inoltre le sue caratteristiche microstrutturali in relazione ai trattamenti termici subiti possono servire da guida per la comprensione dei fenomeni metallurgici dovuti ai cambiamenti di fase delle leghe alfa-beta in generale.

Effetto degli elementi leganti

L'alluminio agisce come un alfa stabilizzante e conferisce alla lega delle eccellenti proprietà ad alta temperatura.

La funzione primaria del vanadio è di stabilizzare la fase beta rendendo possibile il miglioramento delle caratteristiche meccaniche con il trattamento termico.

In figura 5 è rappresentata la sezione del diagramma di stato ternario Ti Al V in corrispondenza del 6% di Al.

Quella che è indicata come linea del beta transus è la temperatura minima alla quale nella lega si arriva al 100% di fase beta, e tale valore dipende dal tenore di vanadio presente.

Nel diagramma si può leggere che con il 4% di vanadio la temperatura del beta transus è di circa 1000°C. La esatta conoscenza della temperatura del beta transus è indispensabile per stabilire quali sono le temperature più adatte per il trattamento termico e lo stampaggio a caldo.

La temperatura del beta transus può essere determinata per via metallografica. Campioni di lega sono scaldati con incrementi di 5°C da 980°C a 1015°C e rapidamente temprati in acqua. Il provino

temprato alla temperatura più alta che mostra ancora isole di alfa primaria (fig.6) ed il provino temprato alla più bassa temperatura che mostra il 100% di struttura beta (fig.7) rappresentano il campo di temperatura cercata.

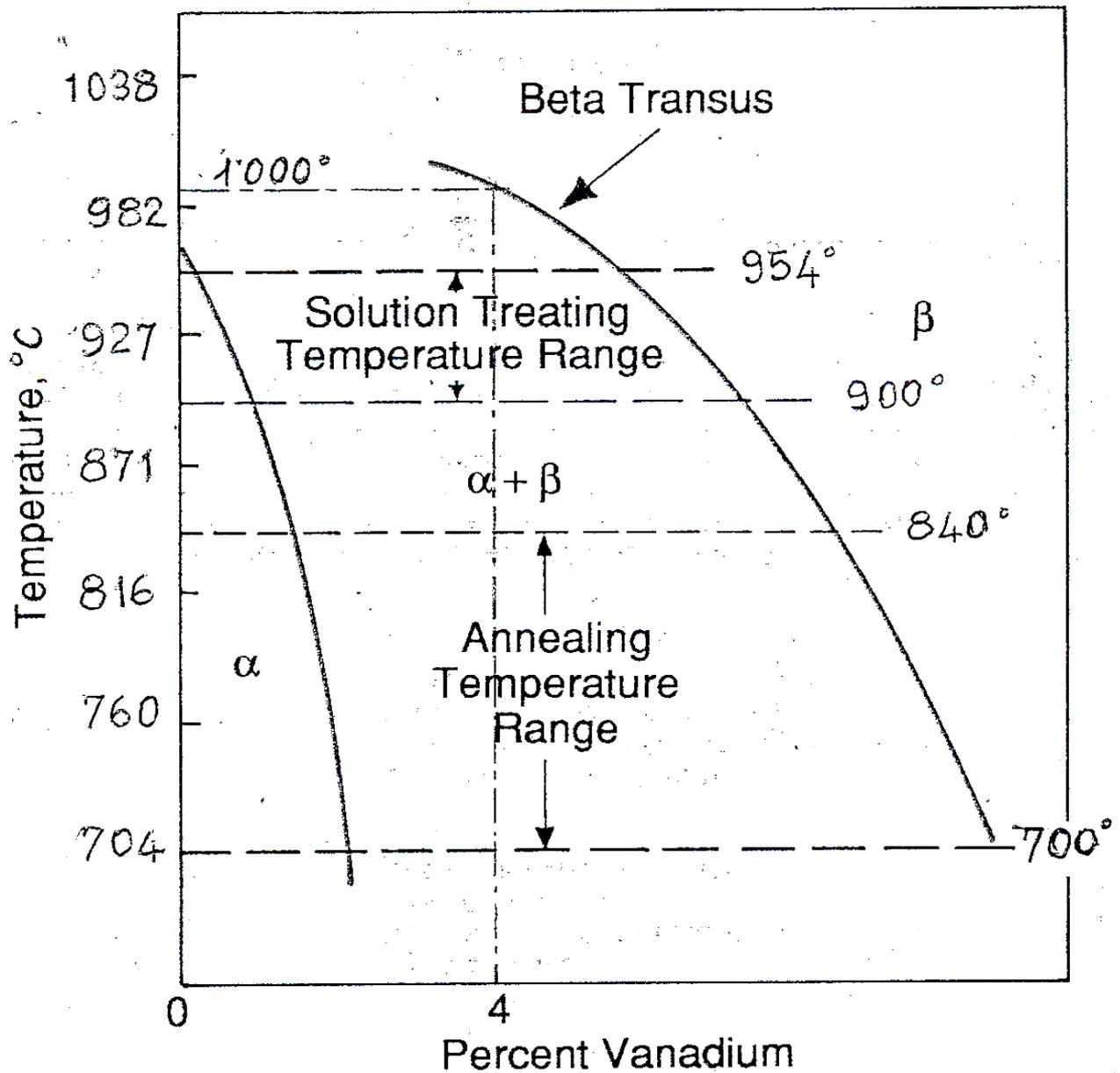


Fig.5 Sezione del diagramma di stato ternario Ti Al V in corrispondenza del 6% di Al.

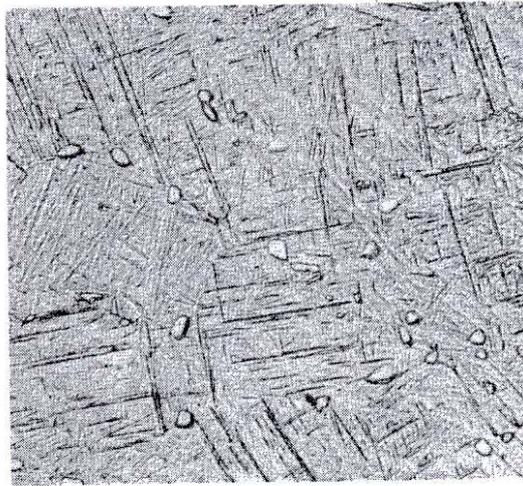


Fig.6 Microstruttura tipica della lega Ti 6Al 4V temprata da una temperatura leggermente al di sotto del beta transus. La struttura è composta da piccole e rare isole di primary alfa in matrice beta trasformata.



Fig.7 Microstruttura tipica della lega Ti 6Al 4V temprata da una temperatura leggermente al di sopra del beta transus. La struttura è composta per il 100% da beta trasformata.

Tempra di soluzione

La tempra di soluzione da elevata temperatura seguita da un rinvenimento a bassa temperatura (invecchiamento) può migliorare le caratteristiche meccaniche della lega di oltre il 35% rispetto a quelle dello stato ricotto.

La temperatura della tempra di soluzione varia da 900°C per le lamiere a 950°C per i tondi ed i pezzi massivi.

Più è alto il campo delle temperature del trattamento termico di soluzione e maggiore è la presenza della fase beta; ciò comporta che la concentrazione del Vanadio quale elemento stabilizzante della fase beta diminuisce.

Questa più bassa concentrazione dello stabilizzante fa sì che nel raffreddamento la fase beta diventa instabile e quindi durante la tempra si trasforma in una struttura alfa di tipo martensitico (aciculare) chiamata in inglese “alfa prime”.

La microstruttura risultante che contiene sia alfa prime che la fase alfa non trasformata chiamata “primary alfa” è mostrata in fig.6 e fig.8.

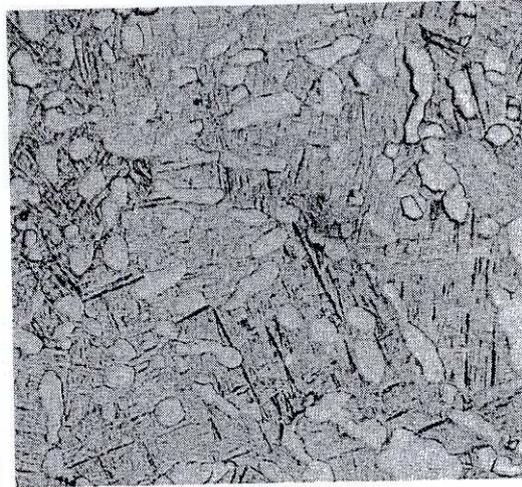


Fig.8 Ti 6Al 4V. Primary alfa (equiaxed alfa) e alfa prime (martensitic alfa) ottenute da una tempra di soluzione da 954°C in acqua.

A temperatura di tempra inferiori è presente una minore quantità di fase beta, che però contiene in soluzione una quantità maggiore di vanadio beta stabilizzante, per cui nel raffreddamento tende a ritardare la trasformazione beta – alfa martensitica. Questa fase beta ritenuta non è stabile e tende a trasformarsi in martensite per incrudimento meccanico.

In fig.9 è mostrata una tipica microstruttura ottenuta temprando la lega da una temperatura di 840°C, che è una temperatura che appartiene già al campo della ricottura.

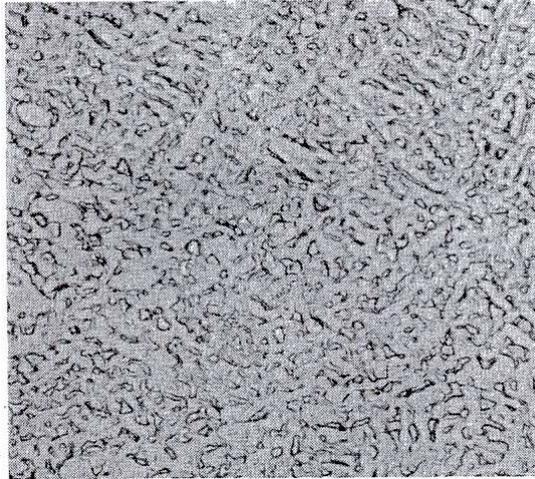


Fig.9 Ti 6Al 4V. Fase beta ritenuta in una matrice di fase alfa. Tempra in acqua da 840°C (che è una temperatura che appartiene già al campo della ricottura).

La tempra di soluzione da temperatura più alta del beta transus produce la microstruttura già vista nella fig.7 che presenta il massimo della resistenza meccanica dopo l'invecchiamento. Tale struttura non è però raccomandabile perché comporta una duttilità molto bassa.

Modalità pratiche per eseguire la tempra di soluzione

La tempra di soluzione è tanto più efficace quanto più è drastica la velocità di raffreddamento. E' necessario perciò adottare liquidi drastici come l'acqua o l'acqua salata con vasche molto agitate. Se i pezzi sono massicci, a cuore le caratteristiche meccaniche saranno inferiori che non in superficie, per cui è bene evitare eccessivi sovrametalli. Il tempo di passaggio dal forno di riscaldamento al bagno di tempra deve essere il più breve possibile; per non avere decadimenti delle caratteristiche meccaniche non si devono superare i sette secondi. Se la tempra non è sufficientemente drastica si forma una fase intermedia chiamata fase omega che produce fragilità inaccettabile nella lega. Per evitarla oltre ad aumentare la velocità di tempra occorre fare subito un invecchiamento a 425°C che tende a trasformarla in alfa prime. Nel diagramma di fig.10 sono mostrate le caratteristiche meccaniche dopo tempra di soluzione e dopo invecchiamento. Dal diagramma si può notare come con l'invecchiamento aumenta il carico di snervamento ma diminuisce l'allungamento, mentre la resistenza a trazione resta pressoché invariata.

Invecchiamento

La temperatura dell'invecchiamento va da 425°C a 650°C per tempi variabili da 4 a 8 ore. L'invecchiamento è essenzialmente un processo di indurimento per precipitazione, dipende quindi dal tempo e dalla temperatura. L'invecchiamento completa inoltre la decomposizione della fase beta soprassatura che proviene dalla tempra. Il massimo delle caratteristiche meccaniche di resistenza a trazione ed allo snervamento, a scapito dell'allungamento, lo si ottiene a temperature intorno ai 500°C.

Il diagramma di fig.11 illustra l'andamento delle caratteristiche meccaniche della lega al variare della temperatura e del tempo.

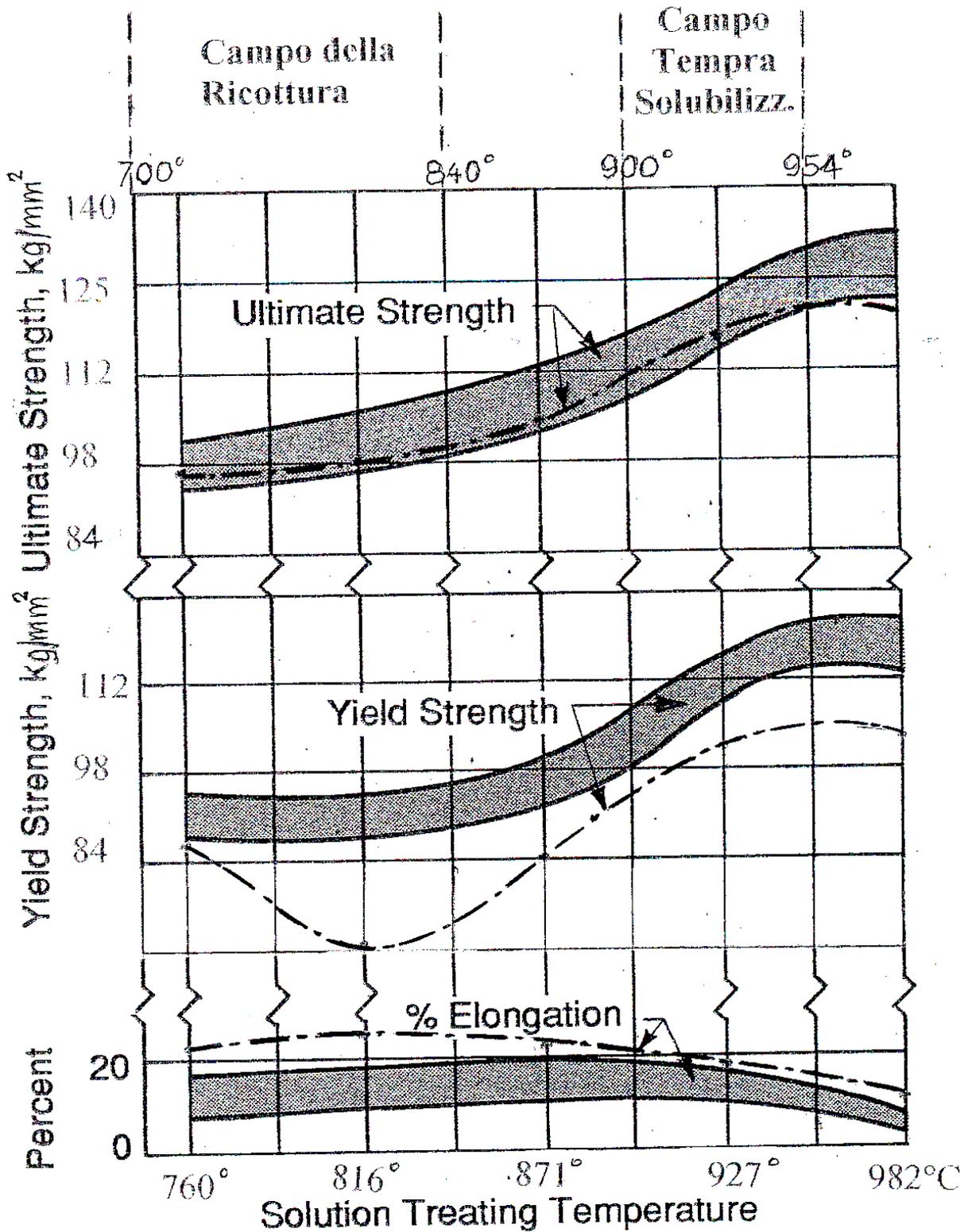


Fig.10 Lega Ti 6Al 4V. Effetto della tempra di soluzione a varie temperature sulle proprietà meccaniche della lega (linee a tratto e punto).

Variazione delle stesse proprietà meccaniche dopo invecchiamento alle temperature di 482°C e 566°C (bande puntinate).

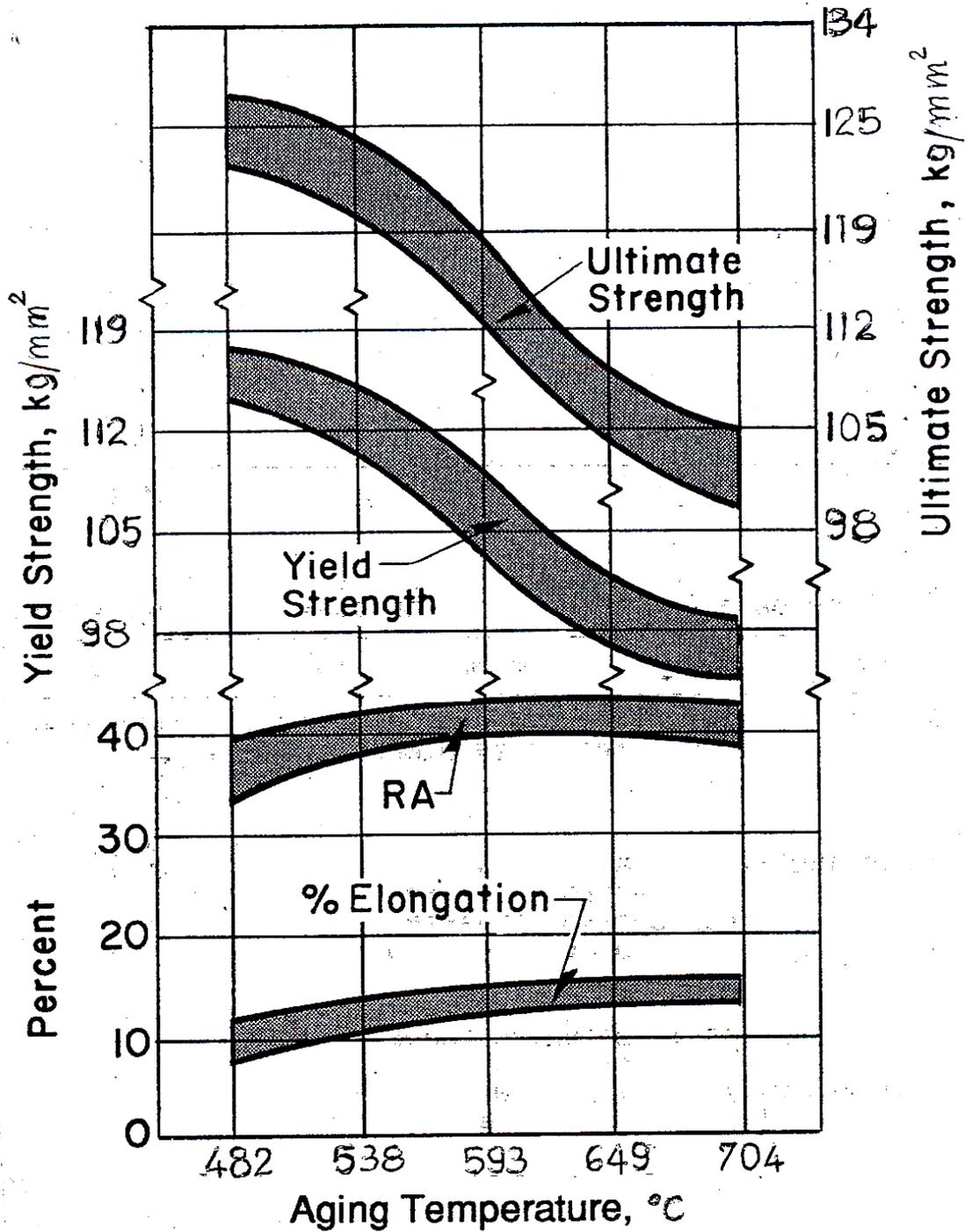


Fig.11 Ti 6Al 4V. Effetto della temperatura di invecchiamento sulle proprietà meccaniche di una lega temprata da 927°C in acqua e invecchiata da 2 a 14 ore.