

Ing. E. Campo (FIAT Aviazione)

"IL TITANIO NEI MOTORI AERONAUTICI"

Le leghe di titanio presentano una proprietà molto importante soprattutto per chi opera nel settore aeronautico: l'elevata resistenza unitaria o specifica, ovvero l'alto rapporto tra resistenza a rottura e densità. Proprietà che risulta, se limitiamo il confronto al campo dei materiali metallici, la più elevata nel range di temperatura compreso tra 200 e 500°C.

Rispetto alle leghe di titanio, a temperature inferiori, solo le leghe di alluminio presentano caratteristiche analoghe o leggermente superiori; mentre, a temperature maggiori di 500°C, le superleghe, hanno un comportamento migliore.

Questa elevata resistenza ha favorito quindi un largo impiego delle leghe di titanio nell'industria aeronautica. Infatti si può dire che circa il 70% delle leghe di titanio trova impiego proprio nel settore aeronautico.

Di questa quantità la maggior parte è impiegata nella costruzione del motore, i cui componenti richiedono lavorazioni e caratteristiche molto più differenziate tra loro che non le parti del velivolo. Per il velivolo, infatti, le leghe di titanio sono principalmente impiegate sotto forma di lamiera.

L'industria aeronautica ha avuto un ruolo chiave nello sviluppo del titanio ed è possibile tracciare storie parallele tra sviluppo del motore e sviluppo delle leghe di titanio.

Un particolare curioso è legato alle aspettative che inizialmente furono riposte sul titanio. Infatti, nell'immediato dopoguerra, quando si incominciò a sfruttare commercialmente il processo Kroll, si pensò di utilizzare le leghe di titanio nelle parti più calde del motore, avendo il titanio una temperatura di fusione superiore a quella del ferro, del cobalto e del nichel.

In realtà, questo non accadde poiché le sopradette aspettative, non erano basate su una sufficiente conoscenza del comportamento dei materiali metallici allo scorrimento a caldo.

Attualmente, comunque, in un moderno turbo getto le leghe di titanio costituiscono circa il 30% del peso totale.

Nella fig. 1 sono state riportate, in modo approssimato, le temperature che si hanno nelle varie parti di un turbogetto ed i materiali utilizzati nella loro costruzione.

Nelle zone più calde, combustore e turbina si devono utilizzare le superleghe a base nichel e cobalto; invece il titanio, unitamente all'acciaio e all'alluminio, trova impiego nella costruzione del compressore. Esistono tuttavia altre applicazioni per il titanio, ad esempio, nella realizzazione dell'ugello di scarico.



FIAT AVIAZIONE

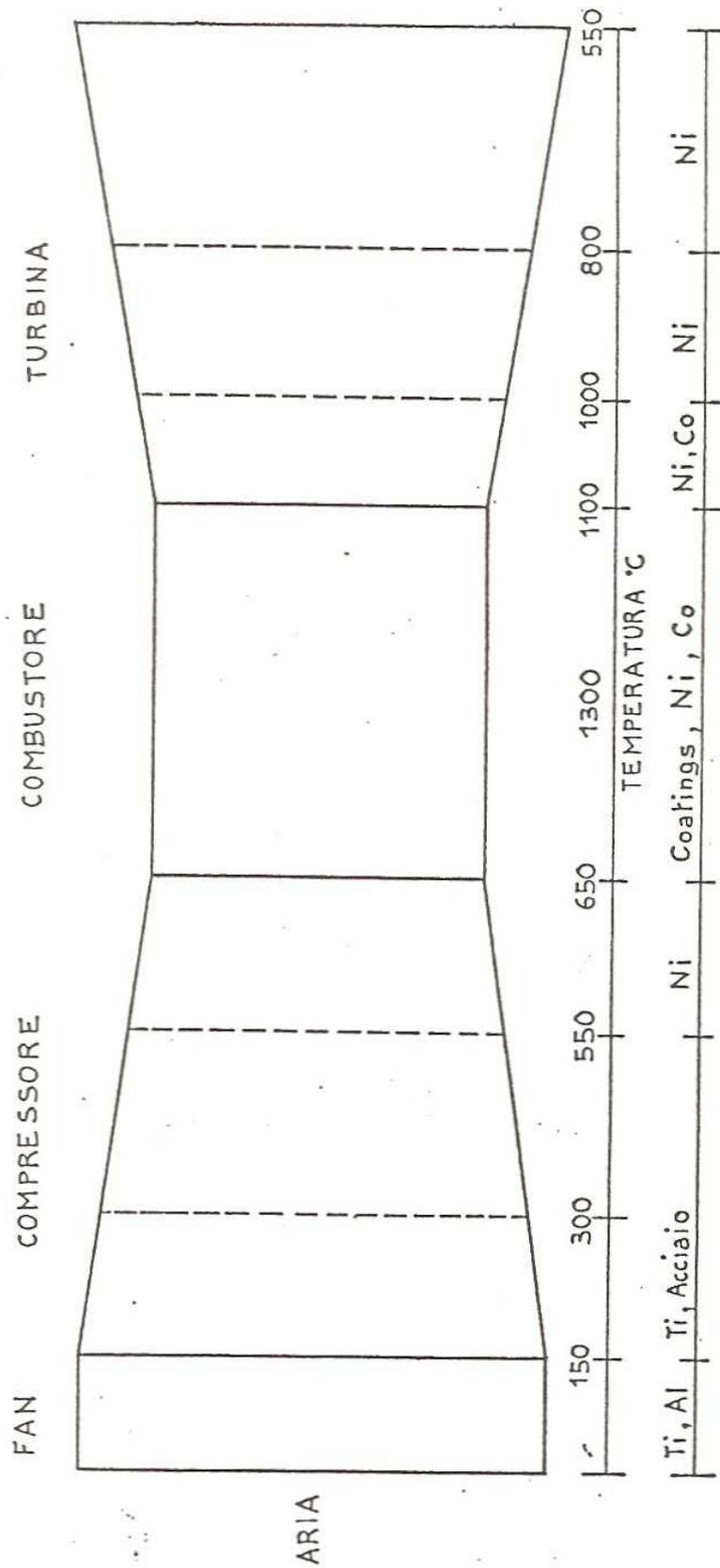


Fig. 1: Temperature relative alle varie zone di un turbogetto e materiali utilizzati

L'uso del titanio è avvenuto a partire dalla seconda metà degli anni '50, principalmente in sostituzione delle leghe di alluminio. L'alluminio, inizialmente adoperato in grande quantità, è risultato inadatto alla costruzione del compressore in seguito all'aumentare dei rapporti di compressione dei motori e quindi in seguito all'innalzarsi della temperatura d'uscita dal compressore.

Infatti, mentre con un rapporto di compressione di 5 a 1 si aveva una temperatura d'uscita di circa 200°C, attualmente, avendo rapporti di compressione superiori a 20, come ad esempio nel motore RB 199 per il Tornado prodotto dalla Turbo Union, la temperatura in uscita è di oltre 500°C.

Nella tabella seguente sono indicate le principali leghe di titanio, con relativa composizione chimica, utilizzate nell'industria aeronautica.

Le leghe sono raggruppate in tipo alfa, alfa-beta e quasi alfa in funzione della loro microstruttura. Infatti come ben noto il titanio ha due forme allotropiche: la forma alfa con struttura esagonale compatta stabile fino ad 880°C e la forma beta cubica corpocentrata stabile da 880°C fino alla temperatura di fusione. Gli elementi di lega possono essere suddivisi in due categorie, quelli che allargano il campo di stabilità della fase alfa e quelli che allargano il campo di stabilità della fase beta. Tra gli elementi di lega presenti in questa tabella, l'alluminio allarga il campo della fase alfa, mentre gli altri e soprattutto vanadio e molibdeno, allargano i campi di esistenza della fase beta.



FIAT AVIAZIONE

TITANIUM ALLOYS

Alloy	Nominal chemical composition (weight percent)											
	Ti	Cu	Mn	Al	Sn	V	Mo	Si	Zr	Cr	Nb	
<i>(i) α alloys</i>												
IMI 130												
IMI 160												
IMI 230	Bal	2.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ti 5-2.5	Bal	—	—	5.0	2.5	—	—	—	—	—	—	—
<i>(ii) $\alpha + \beta$ alloys</i>												
IMI 315	Bal	—	2.0	2.0	—	—	—	—	—	—	—	—
Ti 6-4	Bal	—	—	6.0	—	4.0	—	—	—	—	—	—
IMI 550	Bal	—	—	4.0	2.0	—	4.0	0.5	—	—	—	—
Ti 6-2-4-6	Bal	—	—	6.0	2.0	—	6.0	—	4.0	—	—	—
Ti 17	Bal	—	—	5.0	2.0	—	4.0	—	2.0	4.0	—	—
<i>(iii) Near α alloys</i>												
Ti 8-1-1	Bal	—	—	8.0	—	1.0	1.0	—	—	—	—	—
IMI 679	Bal	—	—	2.2	11.0	—	1.0	0.2	5.0	—	—	—
Ti 6-2-4-2	Bal	—	—	6.0	2.0	—	2.0	—	4.0	—	—	—
IMI 685	Bal	—	—	6.0	—	—	0.5	0.2	5.0	—	—	—
IMI 829	Bal	—	—	5.5	3.5	—	0.25	0.3	3.0	—	1.0	—

Tabella: Principali leghe di titanio utilizzate nell'industria aeronautica

La microstruttura delle leghe ne influenza le proprietà. Le leghe monofase, cioè le leghe alfa, presentano una buona saldabilità e duttilità; le leghe bifasiche sono anch'esse saldabili, ma questa operazione riduce parzialmente la duttilità. Nonostante ciò le leghe bifasiche sono le più applicate poiché hanno una maggiore resistenza.

In tabella non sono riportate le leghe di tipo beta perché queste non hanno il grosso rilievo commerciale delle leghe alfa+beta.

Segue una sommaria descrizione degli impieghi e delle caratteristiche delle leghe elencate in tabella.

L'IMI 130 e l'IMI 160 sono impiegate per la costruzione di parti poco sollecitate, quindi non sono veri e propri materiali strutturali.

L'IMI 230 viene utilizzata per la costruzione di flange e dei casings di molti motori ad esempio per RB 199 (Velivolo Tornado), Olympus (Concord), Spey che equipaggerà l'AMX. Questa lega presenta una buona lavorabilità a freddo ed è l'unica a contenere rame e può essere rafforzata proprio per precipitazione di composti di titanio e rame.

La lega Ti 5-2-5 è adatta per applicazioni analoghe alle precedenti a temperature decisamente più alte.

Si considerano ora le leghe con struttura bifasica. L'IMI 315 presenta una buona resistenza fino a 300°C ed è utilizzata per le palette del compressore; la lega Ti 6-4 è senz'altro la lega più importante e più diffusa, presenta discreta resistenza e buona forgiabilità.

E' adatta per i dischi dei compressori, per le pale dei fan, è utilizzata nell'RB 211 oltre che nel CF6 della General Electric.

L'IMI 550 è la risposta europea all'americana Ti 6-4 presenta però una migliore resistenza al creep, conferita soprattutto dalla presenza del silicio.

La lega Ti 6-2-4-6 ha una migliore resistenza meccanica rispetto alle precedenti, ma non allo scorrimento a caldo, pertanto è utilizzata nella costruzione dei fan.

Infine, della classe alfa+beta, il "Titanio 17" è una lega sviluppata dalla General Electric per ottenere valori di tenacità, in termini di K_{IC} , elevati e una buona resistenza alla propagazione delle cricche, ed è adatta ad essere utilizzata per grossi fucinati.

Ci sono poi le leghe quasi monofasiche. La lega Ti 8-1-1, è molto indicata per i compressori per il suo alto modulo elastico, pertanto permette una buona resistenza alla fatica, ad alto numero di cicli, indotta dalle vibrazioni legate alla velocità di rotazione.

Infine, l'IMI 679, il Ti 6-2-4-2, l'IMI 685, l'IMI 829 presentano elevate proprietà allo scorrimento a caldo, proprietà indispensabile considerato l'aumento delle temperature di uscita dal compressore.

La fig. 2 riporta la resistenza allo scorrimento in funzione della temperatura; le curve si riferiscono alla sollecitazione in funzione della temperatura capace di dare una deformazione dello 0,1% in 100 ore. Si vede che l'IMI 679, il Ti 6-2-4-2, l'IMI 685, l'IMI 829 hanno elevata resistenza allo scorrimento a caldo.

Tuttavia, nella scelta di una lega non può essere considerata soltanto la resistenza allo scorrimento a caldo, ma bisogna considerare le proprietà complessive del materiale. Ad esempio, le leghe citate come l'IMI 685 che hanno eccellenti proprietà allo scorrimento a caldo, non hanno elevate caratteristiche per quanto riguarda il comportamento a fatica oligociclica (fig. 3).



FIAT AVIAZIONE

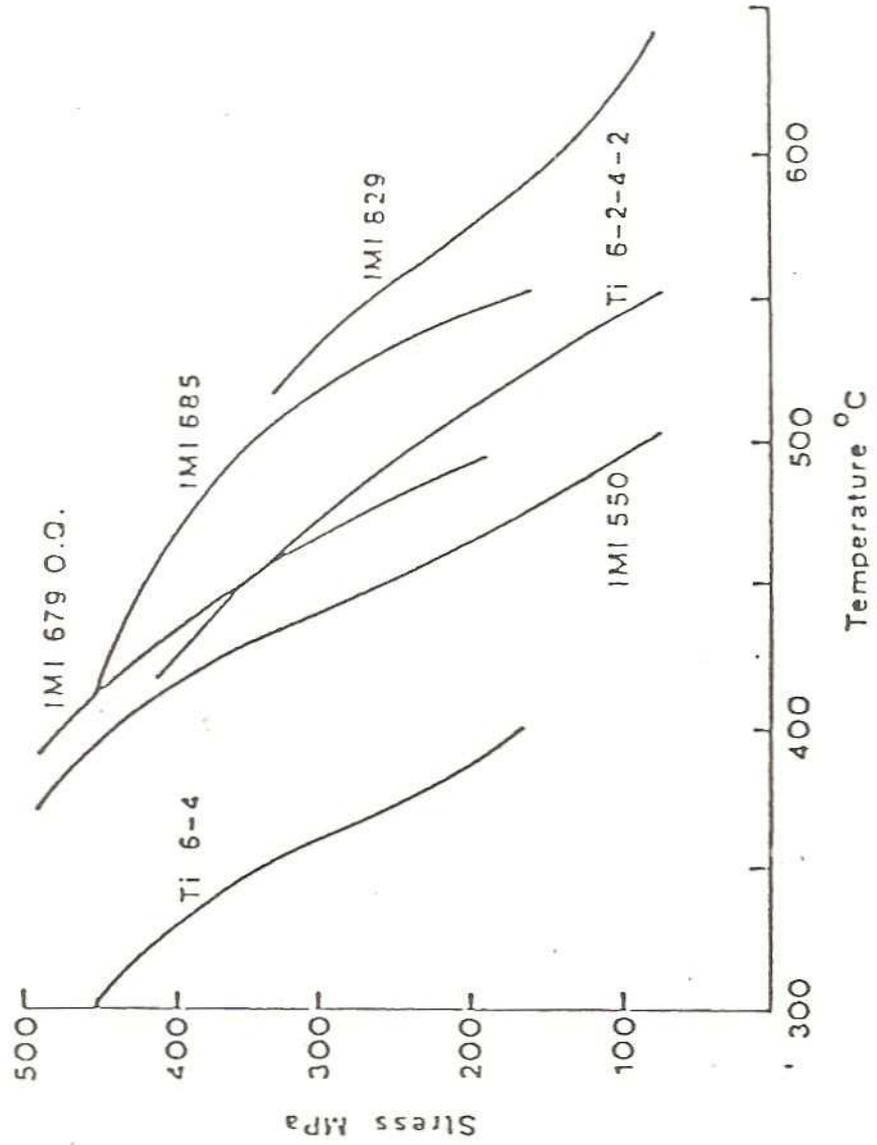


Fig. 2: Resistenza allo scorrimento in funzione della temperatura



FIAT AVIAZIONE

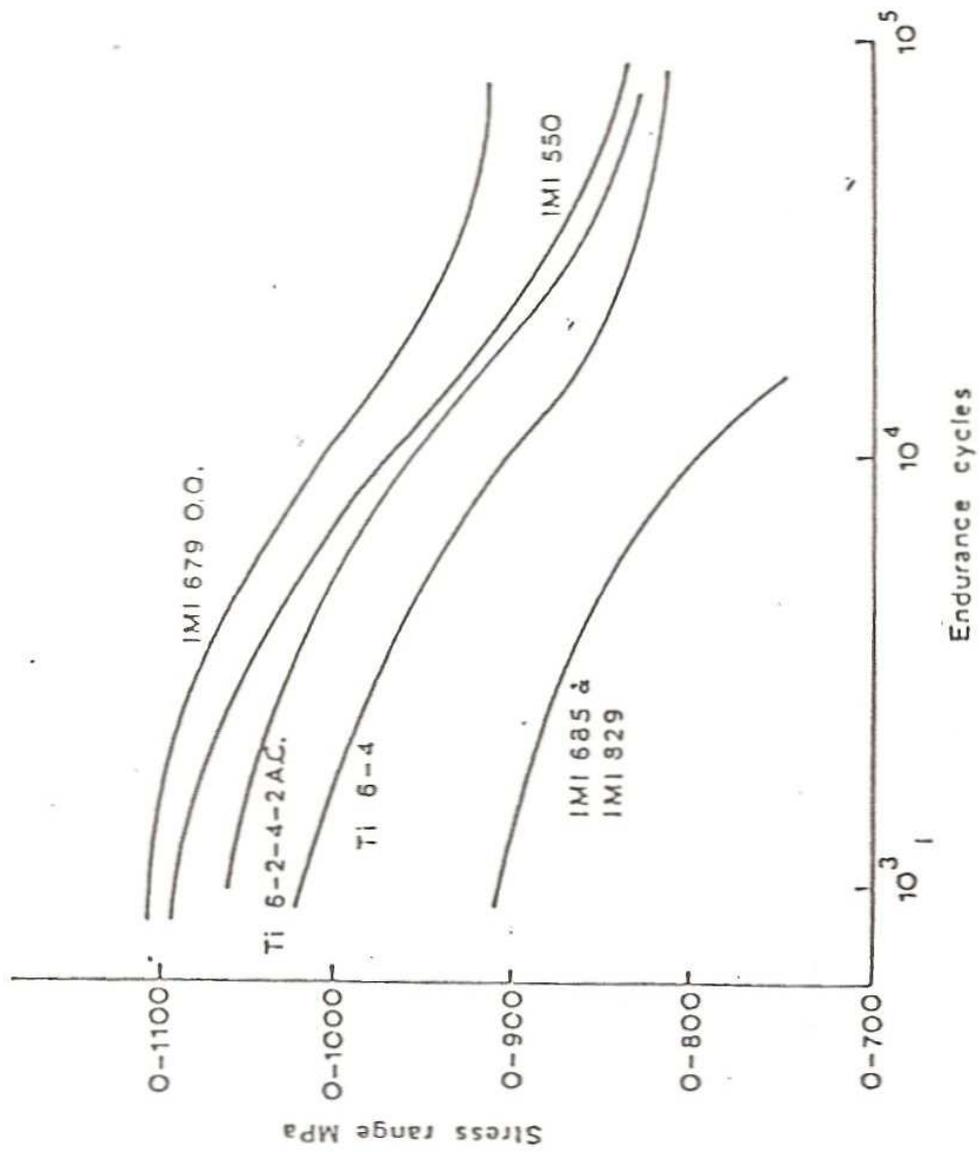


Fig. 3: Resistenza a fatica oligociclica

Se invece si considera la fatica in termini di propagazione delle cricche, come prevede la normativa basata sul concetto del "damage tolerance" , allora l'IMI 685 e l'IMI 829 presentano buone proprietà (fig. 4).

Attualmente il titanio è impiegato nei motori aeronautici in una quantità pari a circa il 30%; ma si prevede che in futuro sarà sempre più ampia l'applicazione dei compositi a matrice plastica che oggi sono utilizzati per circa il 5%. L'impiego di questi materiali potrebbe avvenire in parte a spese del titanio.

Tuttavia per il titanio si hanno dei miglioramenti legati ai processi di formatura, di fucinatura, alla tecnologia della metallurgia delle polveri, ed allo sviluppo della produzione di getti. Un'altro importante sviluppo che avrà la metallurgia del titanio, è quello dei compositi con matrice metallica di titanio.

Le fibre adatte a rafforzare il titanio sono il carburo di silicio e soprattutto il boro, anche se quest'ultimo presenta dei problemi di compatibilità formando con il titanio dei boruri.



FIAT AVIAZIONE

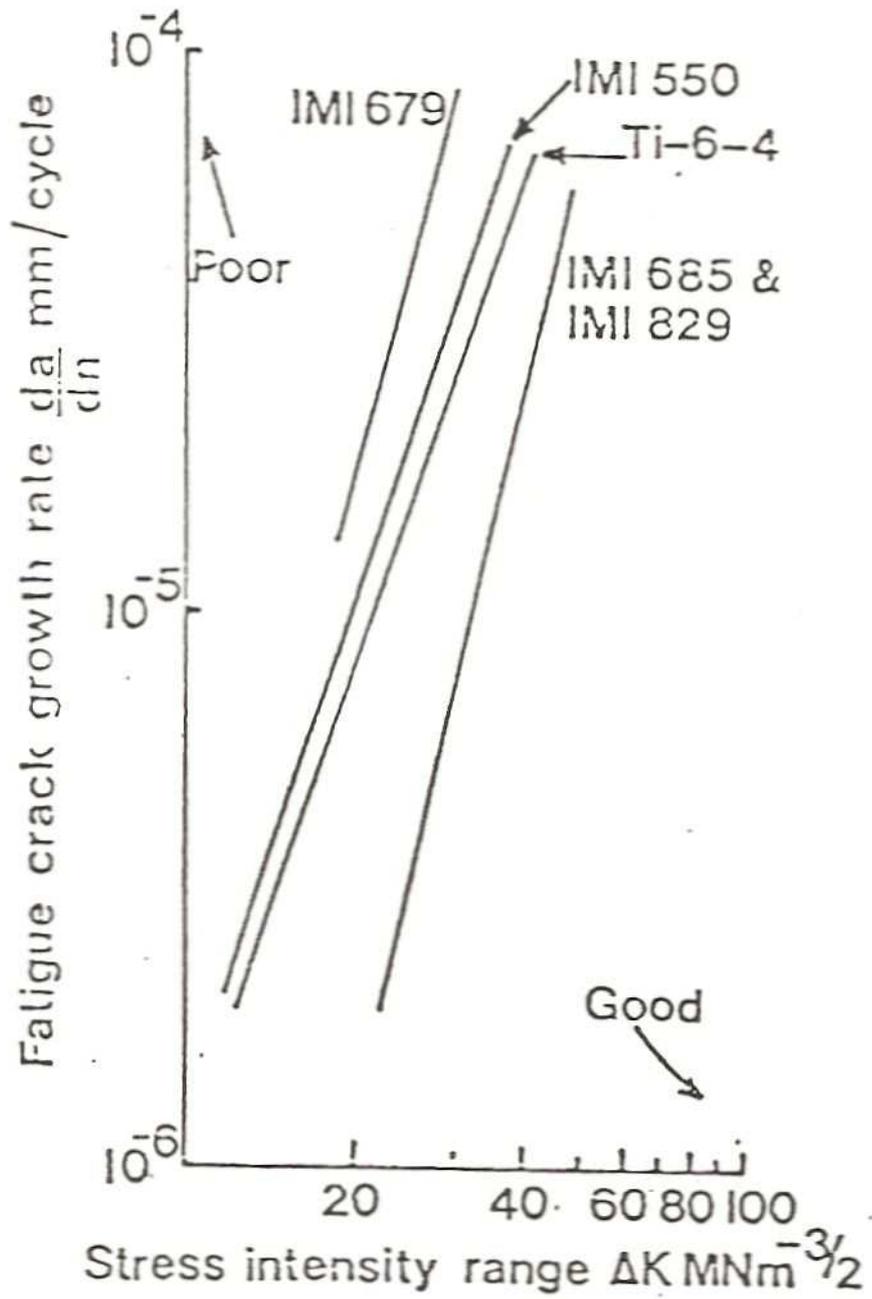


Fig. 4: Resistenza a fatica in termini di propagazione delle cricche

L'interesse principale per il futuro è l'applicazione del titanio alle alte temperature (fig. 5), ad esempio nella costruzione di dischi e palette delle turbine con composti intermetallici a base titanio e alluminio. Con questi materiali si possono raggiungere temperature di 650°C e 850°C, a seconda del tipo di composto intermetallico, potendo così realizzare dei motori molto più leggeri di quelli attuali e quindi con ancora un più alto rapporto spinta/peso. Queste leghe, dunque, sono interessanti per l'impiego alle alte temperature, e per il valore del coefficiente di espansione termica, che si colloca tra quello del nichel e quello del titanio; hanno però uno svantaggio: una bassa tenacità.

Tuttavia è noto che questa tenacità è senz'altro superiore a quella che attualmente gli sviluppi consentiti nel campo dei ceramici fanno presupporre, (con i ceramici si hanno valori di K_{IC} inferiore a 10 MPaVm).

In quest' ultima ottica quindi le prospettive del titanio per applicazioni turbinistiche appaiono molto interessanti.

Si può concludere osservando che i motivi che hanno guidato lo sviluppo del titanio nel primo dopoguerra, sono nuovamente attuali e il titanio può essere considerato ancora una volta candidato per applicazioni ad alte temperature.



FIAT AVIAZIONE

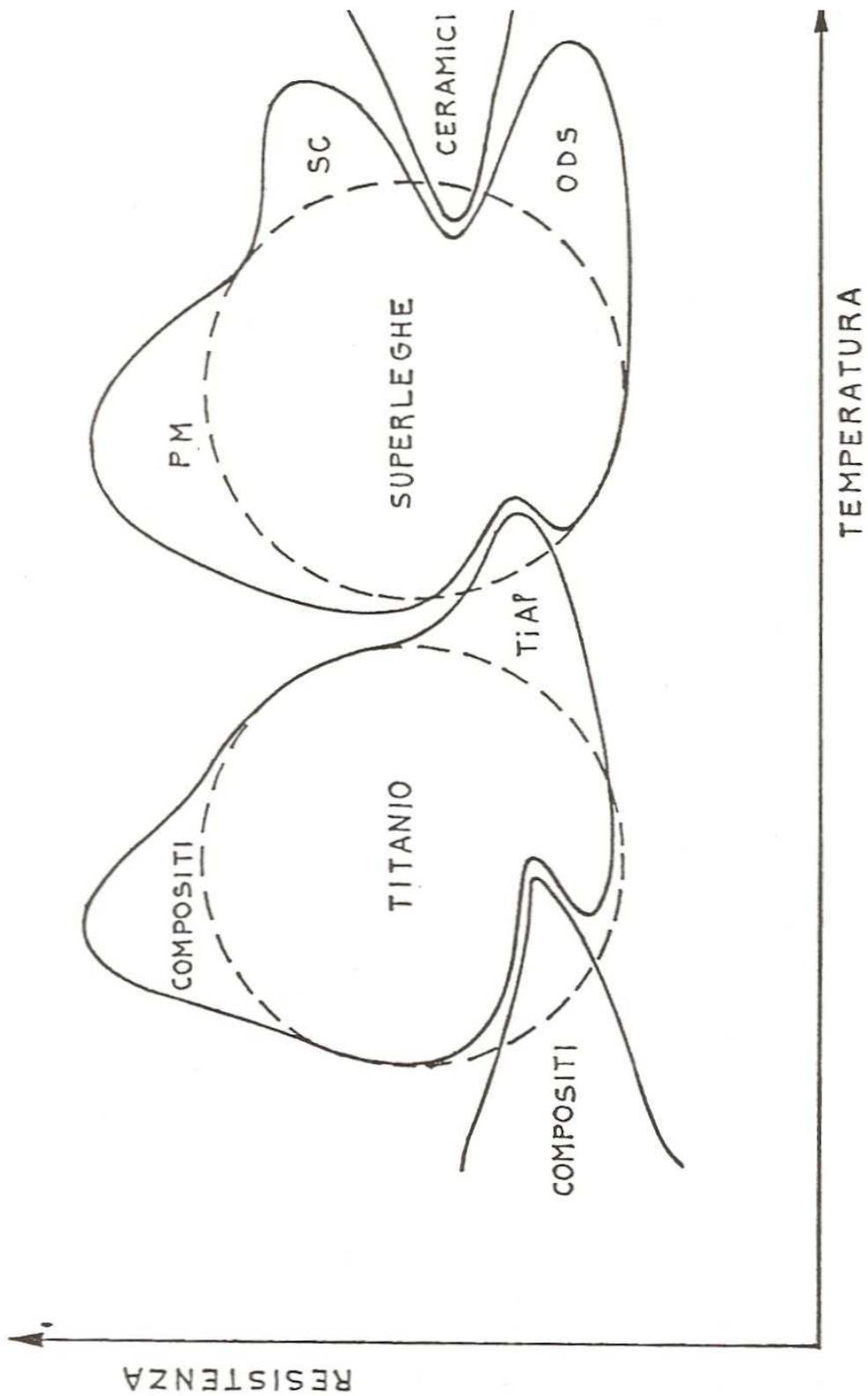


Fig. 5: Comportamento di alcuni materiali al variare della temperatura