

# COMPORTAMENTO A FATICA DELLA LEGA Ti-6Al-4V AL VARIARE DELLE INTERAZIONI TRA I PARAMETRI DI CARICO E LA TEMPERATURA

G. Cima<sup>1</sup>, S. Corradi<sup>1</sup>, M. Marchetti<sup>1</sup>, F. Iacovello<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scuola di Ingegneria Aerospaziale, Università di Roma, Via  
Eudossiana 18, 00184 Roma - e-mail: marchett@aerorisc.ing.uniroma1.it

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Cassino, Via  
Zamosch 43, 03043 Cassino (FR) - e-mail: iacov@serv.ing.unicas.it

## **Sommario**

*È stato condotto uno studio del comportamento a fatica della lega Ti-6Al-4V allo stato ricotto in condizioni di carico a Modi Misti e a due diverse temperature, tenendo conto dell'effetto di vari parametri. In particolare sono state analizzati tre diversi valori per la direzione di carico e due valori per la frequenza. La sperimentazione su provini CTS è stata effettuata con l'ausilio di un DOE (Design of Experiment) per meglio quantificare l'importanza delle interazioni e lo studio dei confronti incrociati. Dai risultati delle prove sperimentali in termini di curve a-N, si sono calcolate le curve di propagazione da/dN vs **DK** con una formulazione - sul modello di quella di Tanaka - che adotta un fattore di intensità degli sforzi effettivo.*

## **Abstract**

*The Ti-6Al-4V alloy in a hot rolled condition has been investigated under mixed mode (I+II) fatigue crack propagation conditions using Compact Tension Shear specimen subjected to different loading angles, frequencies and temperatures. The interactions between these varying parameters have been studied through the utilisation of a Design of Experiment DOE which also allowed the analysis of cross correlation data. From the experimental curves a-N, the propagation curves have been deduced through a formulation - on the basis of the one of Tanaka - which adopts an effective stress intensity factor.*

## **1. Introduzione**

Il titanio e le sue leghe possiedono il più alto rapporto resistenza-peso (resistenza specifica) tra tutti i materiali metallici, una densità ed un modulo elastico intermedi tra quelli dell'acciaio e dell'alluminio, unitamente alla possibilità di mantenere questa proprietà a temperature elevate, consentendo in alcuni casi un impiego continuativo ad oltre 600 °C. Le leghe di titanio hanno inoltre un'ottima resistenza all'erosione e alla cavitazione, nonché una notevole tenacità a frattura.

L'eccezionale combinazione di queste caratteristiche ne fanno dei candidati ideali per le applicazioni aerospaziali, dove rappresentano spesso delle valide alternative alle leghe leggere ed agli acciai sia per impieghi strutturali che propulsivi. Molte di queste applicazioni (palette e organi rotanti di motori, carrelli di atterraggio, condotti...) impongono condizioni operative molto severe sia dal punto di vista ambientale che delle sollecitazioni; questo fatto insieme all'esigenza di riduzione del peso, sempre presente in campo aerospaziale, rende necessaria una progettazione dei materiali e delle strutture "dedicata" e molto accurata in termini di resistenza alla nucleazione ed alla propagazione di cricche di fatica.

A questo proposito va rilevato come il comportamento a frattura dei materiali sia studiato nella maggior parte dei casi in Modo I puro (apertura), mentre i difetti presenti in un elemento strutturale sono per lo più orientati casualmente e sono quasi sempre presenti diverse componenti di carico che interagiscono tra loro.

Per quanto riguarda i criteri analitici, una caratteristica fondamentale delle cricche sollecitate a modi misti, è quella di non propagarsi in maniera "autosimile", prendendo una direzione diversa da quella originale. Per questo motivo sono stati sviluppati numerosi criteri [15,17,18,19,20] che oltre alle condizioni di innesco predicono la direzione di propagazione; la maggior parte si basano su ipotesi di elasticità lineare, non essendo ancora disponibili criteri soddisfacenti in campo elastoplastico.

In analogia a quanto avviene di solito nello studio sperimentale dei processi di fatica in Modo I puro, una volta ricavate le curve  $a-N$  dalle prove di laboratorio servono delle relazioni (semi-empiriche) tra la velocità di propagazione  $da/dN$  e  $\Delta K$  o altri parametri opportuni. Un primo tentativo è stato fatto da Tanaka [1] introducendo un fattore di intensità degli sforzi effettivo ottenuto come combinazione delle varie componenti di  $K$  da utilizzare in una legge tipo Paris. Altre proposte [2] impiegano la variazione di energia di deformazione  $\Delta S$  al posto di  $\Delta K$ . Sono poi stati sviluppati dei modelli più complessi come quello di Chen e Keer [3] che utilizzano altri parametri.

Un altro aspetto della fatica a modi misti riguarda le geometrie dei provini adottati insieme alle configurazioni e i sistemi di afferraggio necessari per produrre diverse combinazioni di carichi misti. In [4] gli autori hanno individuato almeno sedici tipi di provini diversi per produrre i modi misti. Una tale molteplicità oltre a rendere difficili i confronti tra i risultati di diversi lavori pone dei problemi di scelta in fase di impostazione di uno studio sperimentale al fine di utilizzare al meglio le risorse disponibili. I requisiti da tenere presenti sono:

- possibilità di applicare una larga varietà di carichi nell'ambito dei modi misti.
- compattezza e maneggevolezza
- semplicità di fabbricazione
- semplicità di afferraggio e di applicazione dei carichi

Nel presente lavoro l'attenzione sarà posta sui modi I e II di carico senza considerare la presenza del modo III, pertanto al rapporto di carico  $R = P_{\min}/P_{\max}$  andrà associata la direzione del carico rispetto all'asse dell'intaglio del provino  $\beta$ . Nelle considerazioni fatte finora non si è fatto cenno all'environment in cui le strutture aerospaziali devono di solito operare. Tali condizioni sono spesso estreme, comprendendo carichi statici e dinamici di natura deterministica e aleatoria, sforzi termici, vibrazioni, attacchi chimici da parte di agenti atmosferici ecc. Allo stesso tempo però un'analisi esaustiva dell'effetto di ogni possibile fattore va al di là degli scopi del presente lavoro; l'attenzione sarà dunque limitata ad alcuni parametri come la frequenza e la temperatura considerati particolarmente importanti in questo contesto sia per i loro effetti diretti che per le interazioni con i parametri di carico e quelli ambientali. Indicazioni confortanti in questo senso sono fornite in [5], [6], [7].

## 2. I parametri di prova

### *Ambiente di prova (atmosfera di laboratorio)*

Durante le prove di fatica in aria, si forma sempre una pellicola di ossido sulle facce della cricca, con effetti nocivi sul comportamento del materiale in quanto il progredire della frattura durante i cicli di carico causa la rottura della pellicola, permettendo la creazione di nuove quantità di ossido; inoltre si verifica un accumulo di questo materiale sotto forma di detriti che favoriscono la concentrazione di sforzi e quindi l'avanzamento della cricca [8]. È evidente come questo meccanismo sia favorito, sotto l'azione di un carico a modi misti, dalla presenza di una sollecitazione di scorrimento. Un altro effetto della contaminazione da ossigeno è la diffusione di questo gas a livello atomico tra i bordi dei grani  $\alpha$ , che favorisce la nucleazione di microvuoti vicino all'apice del difetto e infragilisce il materiale. La presenza di alluminio come alligante ha un effetto favorevole in questo senso, perché combinandosi con l'ossigeno per formare il composto  $Al_2O_3$  ne ostacola la diffusione.

Entrambi i fenomeni sono favoriti da un aumento di temperatura, che accelera le reazioni coinvolte, e da una diminuzione di frequenza, che permette alla cricca di rimanere aperta più a lungo ad ogni ciclo. È quindi necessario, durante la sperimentazione, tenere conto di questi effetti soprattutto quando variano la frequenza, la temperatura e la direzione del carico.

### *Temperatura*

Come già visto, un primo importante effetto della temperatura è quello di rendere l'ambiente più aggressivo, favorendo la cinetica dei processi di contaminazione da parte di agenti atmosferici.

L'altro effetto è quello dovuto all'interazione tra la fatica ed il creep presente solo a temperature molto elevate (oltre 400 °C). In queste condizioni si verifica un arrotondamento dell'apice della cricca (tip blunting), dovuto alle maggiori deformazioni plastiche tangenziali in tale zona, che fa diminuire la concentrazione di sforzi e quindi rallenta l'avanzamento della cricca stessa. Test di fatica uniassiali [9] su provini CT di Titanio Grado 2 a temperature di 400 e 500 °C con carichi sinusoidali e ad onda quadra, mostrano un effetto trascurabile della temperatura rispetto ai risultati a temperatura ambiente per alti  $\Delta K$  e un aumento del  $da/dN$  per bassi  $\Delta K$  (Fig. 1). Anche l'effetto della frequenza ad alte temperature è significativo per bassi  $\Delta K$  e quasi assente per alti  $\Delta K$ .

Questi risultati vengono interpretati dagli autori attribuendo le differenze rilevate per bassi  $\Delta K$  al meccanismo dell'ossidazione. Tale effetto è presente fin dall'inizio della prova ed influenza quindi la propagazione della cricca fin dai primi stadi in modo pressoché costante. Man mano che il  $\Delta K$  aumenta (al progredire della cricca), aumenta anche la plasticizzazione all'apice e si manifesta l'interazione col creep prima accennata; quest'ultima arrotondando l'apice della cricca ne rallenta l'avanzamento, compensando in parte l'incremento di  $da/dN$  dovuto all'ossidazione. Infine quando ci si avvicina al valore critico  $K_C$  entrambi gli effetti perdono importanza.

Infine la scarsità di lavori in letteratura sulla fatica a modi misti ad alta temperatura rende interessante lo studio dell'effetto di questo parametro, soprattutto in relazione alle possibili interazioni con altri fattori.

### *Direzione del carico*

Tale direzione è individuata dall'angolo  $\beta$  mentre la direzione di propagazione della cricca rispetto alla linea media dell'intaglio iniziale è quella individuata dall'angolo  $\vartheta$  ed è

indipendente dal tipo di carico, statico o dinamico, che viene applicato al provino. In generale i valori critici per i quali si ha l'innesco di un cricca e la direzione che essa segue durante l'avanzamento sono in buon accordo con i criteri più usati (MTS, SED), tranne che per valori molto bassi di  $\beta$  vicini al modo II puro quando grosse variazioni degli sforzi tangenziali vicino all'apice rendono i criteri inefficaci. I risultati di prove effettuate nelle condizioni più diverse indicano che, al diminuire di  $\beta$ , a parità di tutte le altre condizioni, il numero di cicli a rottura aumenta, in quanto la componente di modo II induce un meccanismo di chiusura dovuto allo sfregamento tra le superfici della cricca, ostacolando così la propagazione come è stato confermato sperimentalmente in [1].

Altri autori [10] hanno studiato l'effetto dei valori delle diverse componenti di carico sulle modalità di propagazione della cricca per alcune leghe leggere (2017-T3, 7075-T6), trovando che per un certo valore di soglia  $\Delta K_{II}$  dipendente dal materiale e per  $K_{II}/K_I > 1.6$ , la propagazione della cricca avviene in modo II e in questo caso ci sono due possibilità: la prima in cui la crescita ha luogo lungo la direzione iniziale dell'intaglio ( $K_{II}/K_I$  costante) e la seconda in cui la crescita avviene nella direzione in cui  $K_{II}/K_I$  aumenta. Se invece  $K_{II}/K_I < 1.6$  la propagazione avviene in modo I. Questa idea di diversi modi di propagazione corrispondenti a diverse combinazioni di carichi a modi misti è stata sviluppata da Pook [11] per tracciare delle mappe del meccanismo di crescita nel piano  $\Delta K_I - \Delta K_{II}$ .

Nella scelta dei valori da attribuire a  $\beta$  in un programma sperimentale, è certamente utile l'esecuzione di alcune prove in Modo I puro, per le quali sono più numerosi i riferimenti di bibliografia con cui effettuare dei confronti (anche tra materiali diversi), e poi diversi valori dell'angolo a modi misti, alcuni più vicini al Modo I ed altri al Modo II, per mettere in evidenza il diverso comportamento del materiale nei due casi.

### *Frequenza*

Nei lavori sulla fatica esiste la tendenza a trascurare l'effetto della frequenza se non in presenza di ambienti particolarmente aggressivi, tuttavia alcuni materiali hanno dimostrato una significativa influenza di questo fattore sul loro comportamento a fatica anche a temperatura ambiente. In particolare Yokobori et al. [5] per una lega di alluminio (2024-T3) e per un acciaio (SM-50) hanno rilevato una diminuzione di  $da/dN$  all'aumentare della frequenza, confermata anche da esami frattografici in cui era evidente una diversa spaziatura tra le striature di fatica (maggiore per frequenze più basse). Questo effetto è ancora più evidente per carichi a modi misti e cresce al diminuire dell'angolo di carico. Ad un aumento della frequenza è anche legato un aumento del numero di cicli necessari per arrivare a rottura.

L'aumento di  $da/dN$  al diminuire della frequenza può essere spiegato in termini di CTOD (Crack Tip Opening Displacement) e di deformazione plastica. Il CTOD per un dato carico è maggiore a bassa frequenza e così anche la lunghezza di superficie libera di fatura creata ad ogni ciclo, poiché in questo caso un ciclo dura più a lungo, quindi a bassa frequenza la velocità di propagazione sarà più alta. Al contrario, lo sforzo necessario ad ogni ciclo per provocare deformazioni plastiche all'apice aumenta all'aumentare della frequenza visto che in queste condizioni ad ogni ciclo il tempo disponibile per la crescita rallenta.

La frequenza inoltre ha un effetto più pronunciato in condizioni di modo misto rispetto al modo I puro e le ragioni sono essenzialmente due [6]: 1) man mano che la componente di carico a modo II aumenta, aumenta la deformazione di scorrimento (shear strain) ad essa dovuta in prossimità dell'apice estendendo la zona plastica che risente della frequenza nel modo descritto sopra; 2) il carico in modo II provoca un'azione di sfregamento tra le superfici della cricca causando la formazione di detriti che ostacolano la propagazione. Questo

fenomeno è favorito da alte frequenze poiché le superfici vengono a contatto un maggior numero di volte.

Queste considerazioni, insieme a quelle già fatte sul ruolo della frequenza ad alte temperature ed in presenza di fattori ambientali che degradano il materiale indicano un legame tra questo parametro e tutti i fenomeni dipendenti dal tempo. Questi fenomeni ad alte frequenze hanno meno tempo ad ogni ciclo per influenzare il processo di fatica risultando così inibiti, mentre a basse frequenze succede il contrario.

### 3. Sperimentazione

Il materiale impiegato per le prove sperimentali è la lega Ti-6Al-4V, appartenente alla classe  $\alpha$ - $\beta$ . Si tratta della lega di titanio di più comune impiego in tutti i campi ma soprattutto in quello aeronautico, al punto che da sola assorbe il 50 % della produzione mondiale di titanio e costituisce un termine di paragone per tutte le leghe di nuova concezione. La lastra utilizzata per ricavare i provini è stata ricotta a 820 °C per un'ora (Mill Annealing) ed aveva uno spessore di 5.3 mm. I provini sono stati tagliati tutti secondo l'orientazione LT (intaglio ortogonale alla direzione di laminazione della lastra). Per quanto riguarda la geometria dei provini, la mancanza di uno standard universalmente accettato per le prove di fatica a modi misti ha indotto ad un esame critico dei diversi tipi proposti in letteratura [4] sulla base dei criteri precedentemente indicati. È stato quindi scelto il provino CTS (Compact Tension Shear) introdotto per la prima volta da Richard [12].

L'intaglio iniziale è stato realizzato per elettroerosione (electrical discharge). Per l'esecuzione delle prove invece è stato utilizzato un sistema servoidraulico con una capacità di 100 kN per carichi statici e 70 kN per carichi dinamici, con possibilità di controllo ad anello chiuso sul carico, sulla deformazione e sullo spostamento. Per le prove ad alta temperatura è stato utilizzato un forno elettrico di dimensioni compatibili col telaio della macchina idraulica nel quale non era possibile un controllo dell'atmosfera di prova; pertanto anche le prove a 300°C sono state eseguite in aria di laboratorio.

Ciascun provino è stato sottoposto ad un precriccaggio nelle condizioni di prova per ottenere un apice della cricca il più possibile acuto ed una lunghezza iniziale di cricca compresa nell'intervallo  $0.45W \div 0.7W$  (essendo W il lato minore del provino).

Le misure sono state prese con un microscopio ottico capace di un ingrandimento di 40X, rilevando la lunghezza della cricca su entrambi i lati del provino e poi mediando i due valori letti. La valutazione della lunghezza e della direzione di propagazione della cricca rispetto alla linea media dell'intaglio iniziale sono state aidate da una griglia di riferimenti lineari posti preliminarmente sulle due facce del provino. I dati così ottenuti costituiscono le curve a-N che sono la base per le successive elaborazioni numeriche e l'analisi dei risultati.

#### *Modello di elaborazione dei dati*

Dai risultati delle prove sperimentali in termini di curve a-N, si è passati alle curve di propagazione  $da/dN$  vs  $\Delta K$  con una formulazione [13] che adotta un fattore di intensità degli sforzi *effettivo* definito come segue:

$$\Delta K_{\text{eff.}} = \sqrt{(\Delta K_I)^2 + (0.8\Delta K_{II})^2} \quad (1)$$

essendo

$$\Delta K_I = K_{I\max} - K_{I\min} \quad \Delta K_{II} = K_{II\max} - K_{II\min} \quad (2)$$

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi}}{WB} Y_I \left( \frac{a}{W} \right) \sin \alpha \quad K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi}}{WB} Y_{II} \left( \frac{a}{W} \right) \cos \alpha \quad (3)$$

dove P è il carico applicato, A è la lunghezza della cricca, W è lunghezza del lato del provino, B è lo spessore del provino,  $Y_I$ ,  $Y_{II}$  sono fattori di forma e  $\alpha$  è l'angolo tra la direzione di applicazione del carico e la direzione di propagazione della cricca. I fattori di forma sono:

$$Y_I(a/W) = -4.23 + 40.6(a/W) - 94.0(a/W)^2 + 82.1(a/W)^3 \quad (4)$$

$$Y_{II}(a/W) = 7.99 - 3.27(a/W) + 20.9(a/W)^2 - 32.9(a/W)^3 + 17.9(a/W)^4$$

Per il calcolo di da/dN invece, è stata impiegata una interpolazione polinomiale col metodo della parabola per sette punti, come suggerito dalla norma E-647 [14].

Da una prima analisi dei dati emerge che la velocità di propagazione da/dN si è mantenuta per tutte le prove nel range di valori  $[10^{-9}, 10^{-7}]$  m/ciclo come previsto dalle norme. Il  $\Delta K_{th}$  nelle prove a Modi Misti è mediamente più alto che in quelle a Modo I puro, per lo stesso materiale non ricotto; nelle prove ad alta temperatura si osserva invece una diminuzione del valore di  $\Delta K_{th}$  rispetto a quelle a temperatura ambiente.

L'angolo  $\vartheta$  di propagazione della cricca rispetto alla linea media dell'intaglio iniziale non risente di variazioni della maggior parte dei parametri di prova, mostrando un legame solo con la direzione di applicazione dei carichi come già trovato in diversi lavori sperimentali [15]; non sono state osservate differenze di direzione tra le due facce del provino. I valori misurati, su entrambe le facce del provino, sono: per  $\beta=90^\circ$   $\vartheta=0^\circ$ , per  $\beta=60^\circ$   $\vartheta=18^\circ-20^\circ$ , per  $\beta=30^\circ$   $\vartheta=41^\circ-42^\circ$ .

#### 4. Prove a Modi Misti

Nelle condizioni di prova a modi misti sono emersi gli aspetti più interessanti del comportamento a fatica della lega sia a temperatura ambiente che a 300 °C. Il DOE (Design of Experiment) adottato nella progettazione delle prove ha permesso una serie di confronti incrociati che vengono di seguito esposti e commentati.

##### *Prove con $\beta 60^\circ$*

Un primo confronto è quello tra prove eseguite alla stessa frequenza ma con valori di R diversi (Fig. 1). L'effetto del rapporto di carico, già trovato nelle prove a Modo I puro, è presente anche in questo caso e provoca uno spostamento verso l'alto e verso destra delle curve relative al valore più basso (R = 0.1). Un altro confronto interessante è quello tra le prove effettuate a parità di rapporto di carico, temperatura e angolo  $\beta$  ma con diverse frequenze; i diagrammi relativi sono nella Figura 2. Per bassi valori di  $\Delta K$  si osserva un aumento di da/dN nelle prove a bassa frequenza evidenziando quindi un effetto già trovato in altri lavori [5].

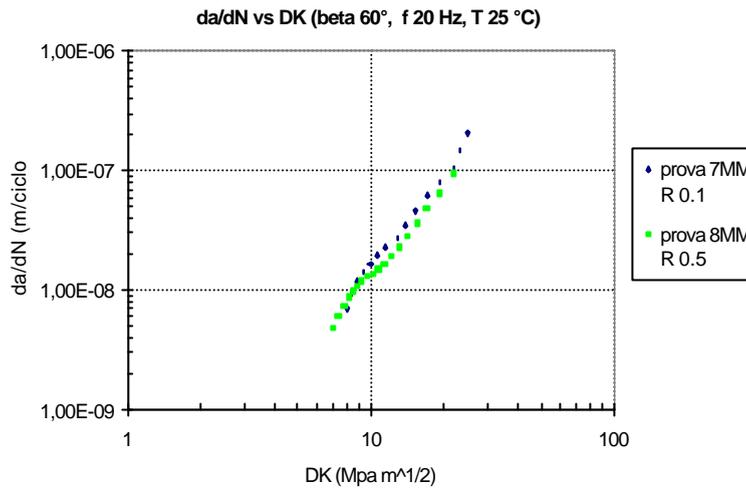


Figura 1: Confronti tra prove con  $\beta = 60^\circ$  e diversi valori di  $R$  a parità di frequenza e di temperatura ( $25^\circ\text{C}$ )

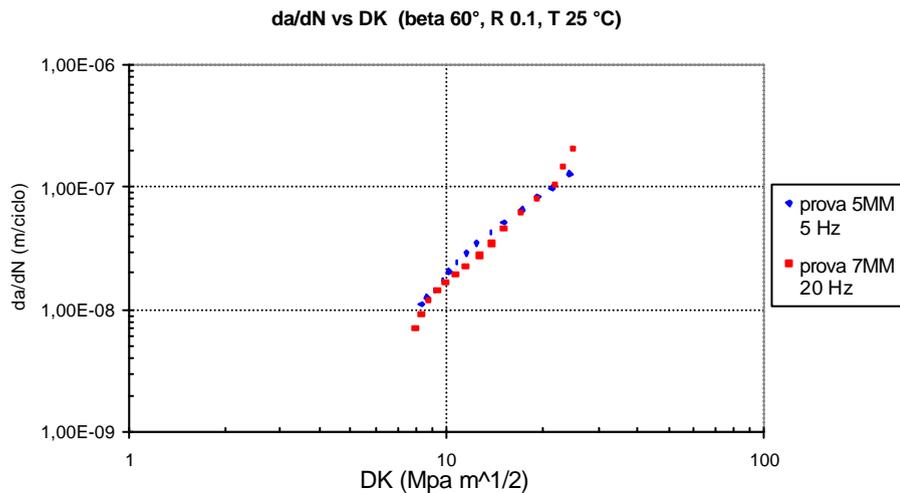


Figura 2: Confronto tra prove con  $\beta = 60^\circ$  e diverse frequenze a parità di  $R$  e  $T$

### Prove con $\beta = 30^\circ$

Gli stessi confronti appena visti sono stati poi eseguiti per le prove con  $\beta = 30^\circ$ . Ancora una volta è confermato l'effetto di  $R$  per diverse frequenze; tale parametro dunque non interagisce con gli altri ed ha un'influenza dello stesso tipo nelle varie condizioni di prova (Fig. 3).

Si ha poi l'altro confronto tra prove a diverse frequenze. Si osserva anche qui l'effetto visto per le prove analoghe con  $\beta = 60^\circ$ , ma stavolta in maniera più evidente; questo fatto suggerisce

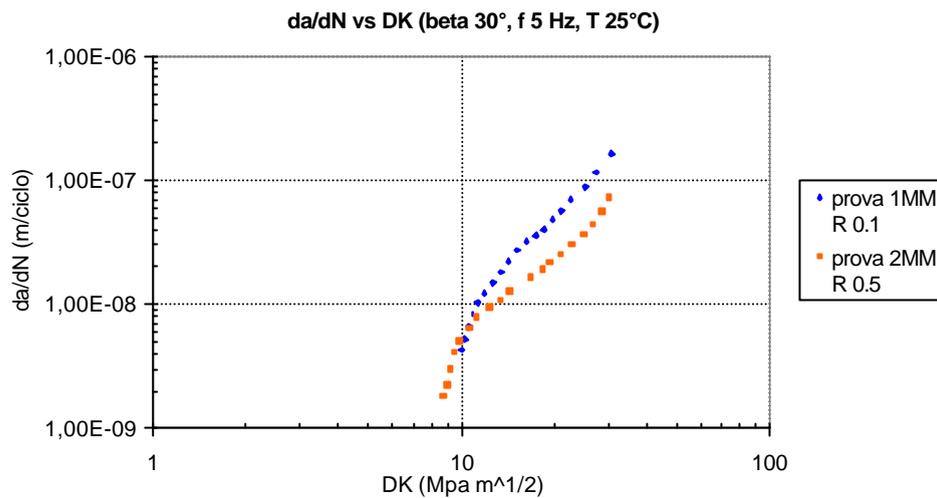


Figura 3: Confronto tra le prove con  $\beta = 30^\circ$  per diversi valori di  $R$  a parità di  $f$  e  $T$

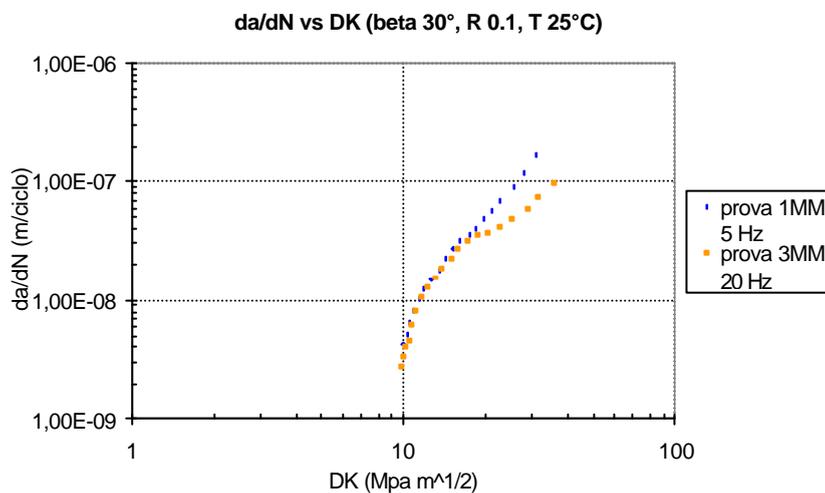


Figura 4: Confronto tra prove con  $\beta = 30^\circ$  per diverse frequenze a parità di  $R$  e  $T$

un'interazione tra la frequenza e la direzione del carico  $\beta$  in accordo coi risultati di altri lavori [15]. In altri termini la presenza di una componente di carico a Modo II induce ad ogni ciclo uno sfregamento tra le due facce della cricca che agisce come un freno nei riguardi della propagazione. Questo tipo di contatto porta alla formazione di detriti che ostacolano l'avanzamento della cricca rendendo il suo fronte di propagazione più irregolare a livello locale. Il meccanismo descritto è certamente più efficace per  $\beta = 30^\circ$  rispetto al caso in cui  $\beta = 60^\circ$  ed è favorito da alte frequenze poiché in tal caso le superfici della frattura vengono a contatto un maggior numero di volte.

#### Confronti incrociati

Un'ultima serie di confronti in questo gruppo è quella tra le prove corrispondenti con  $\beta$  variabile;

In generale si osserva in tutti i confronti un aumento del numero di cicli necessari per arrivare a rottura al diminuire di  $\beta$ , cioè man mano che la componente di carico di Modo II aumenta. Anche questo risultato trova riscontro in altri lavori [15] ed è spiegabile con lo stesso meccanismo descritto per i confronti precedenti. Nelle figure seguenti si ha invece il confronto tra le curve di propagazione relative alle stesse coppie di prove.

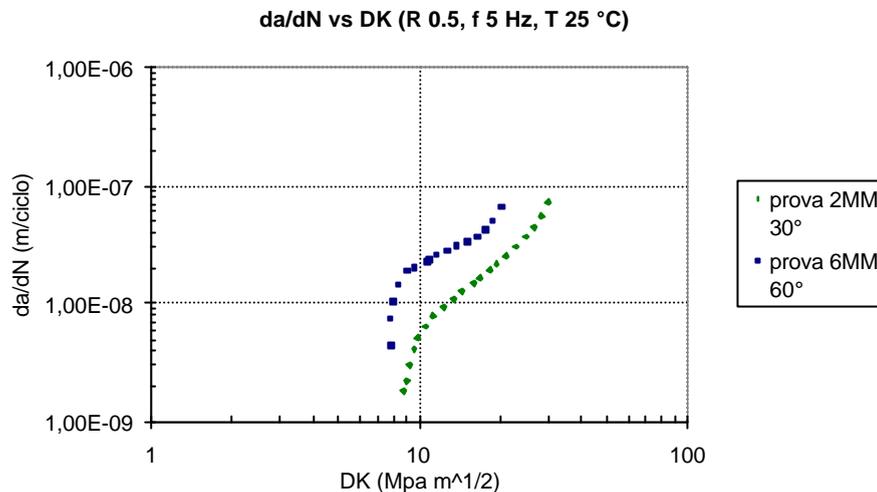


Figura 5: Confronto tra prove con diversi valori di  $\beta$  a parità delle altre condizioni

È evidente un netto aumento di  $da/dN$  per valori di  $\beta$  più alti in tutti i casi, in accordo con quanto già rilevato sulle curve  $a-N$  relative alle stesse prove. La notevole differenza tra le prove con  $\beta = 60^\circ$  e quelle con  $\beta = 30^\circ$  rilevata in tutte le condizioni testimonia la maggiore efficacia del meccanismo di sfregamento per bassi valori dell'angolo di carico.

#### Prove ad alta temperatura

L'effetto della frequenza sul  $da/dN$ , già riscontrato nelle prove a temperatura ambiente nel caso con  $\beta = 60^\circ$ , è qui più marcato (Fig. 6), indicando un'interazione tra frequenza e temperatura. La modalità con cui questo si verifica è probabilmente dovuta ad una maggiore ossidazione del materiale che ha luogo ad alta temperatura e che è favorita da basse frequenze in quanto in tali condizioni la cricca rimane aperta per più tempo ad ogni ciclo.

Nelle prove ad alta temperatura si ha un leggero aumento della velocità di propagazione a conferma del citato fenomeno di ossidazione del materiale. Sarebbe interessante un confronto tra prove a diverse temperature a frequenza bassissima (0.01-0.1 Hz). In conclusione si riporta un confronto tra la prova 1T e la 4MMT nelle quali  $R$  vale 0.75 e  $T = 300^\circ C$  (Fig. 7). Sebbene le frequenze di prova siano diverse si può notare un  $da/dN$  nettamente più alto per il caso  $\beta = 90^\circ$  (1T). Una differenza così netta tra i risultati per  $\beta = 90^\circ$  e quelli per  $\beta = 60^\circ$  può far pensare ad una interazione tra temperatura ed angolo di carico anche se questa ipotesi andrebbe validata con altre prove ad alta temperatura e diversi angoli di carico.

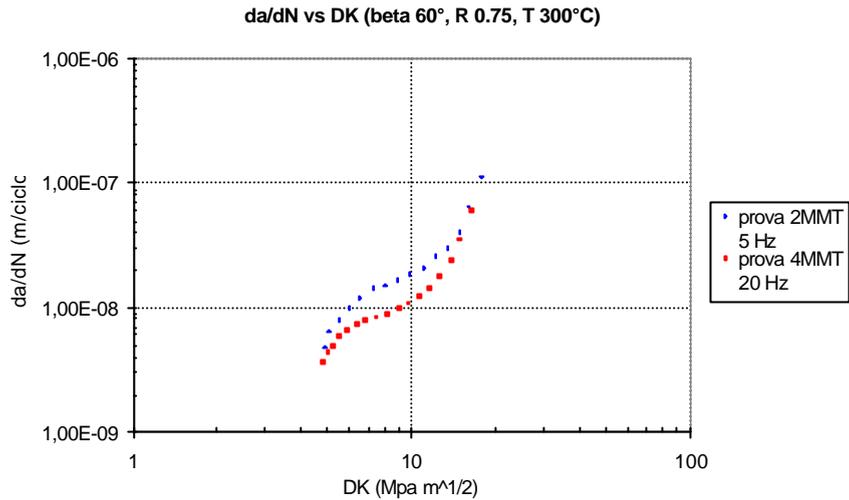


Figura 6: Confronto tra prove ad alta temperatura con diversi valori di  $f$  a parità delle altre condizioni

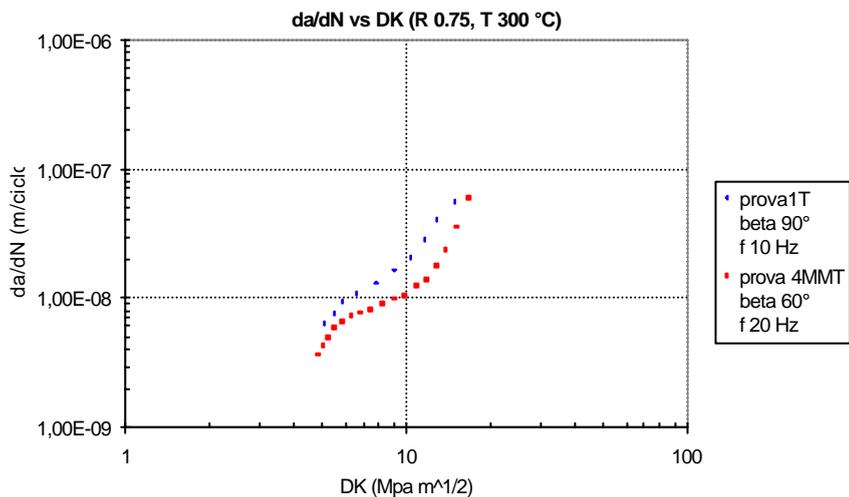


Figura 7: Confronto tra prove con diversi valori di  $T$  a parità delle altre condizioni

## 5. Conclusioni

È stato condotto uno studio del comportamento a fatica della lega Ti-6Al-4V allo stato ricotto in condizioni di carico a Modi Misti e a due diverse temperature, tenendo conto dell'effetto di vari parametri.

Il provino CTS selezionato in base ai requisiti di compattezza, maneggevolezza e semplicità di afferraggio per diverse configurazioni di carico, ha dato risultati soddisfacenti sia in termini pratici di utilizzazione che in termini di risultati, fornendo dei dati di propagazione della cricca compatibili con le norme e con altri lavori sperimentali [5], [6], [7], [15].

Il sistema ottico di misura adottato sebbene non permettesse ingrandimenti particolarmente elevati si è mostrato sufficientemente affidabile sia per le misure di lunghezza della cricca che

per le misure dell'angolo di propagazione. Per quanto riguarda le misure durante le prove ad alta temperatura, le aperture del forno necessarie all'osservazione ravvicinata del provino, hanno sicuramente favorito il processo di ossidazione della superficie di frattura anche se questo non è necessariamente un fatto negativo, in quanto una struttura o un componente di un motore nelle reali condizioni operative non lavora certamente a temperatura costante né in atmosfera controllata. La quantità delle variabili prese in considerazione ha richiesto una accurata progettazione delle prove, sia per utilizzare al meglio il materiale disponibile che per ottenere dati che permettessero il maggior numero di confronti tra le prove in modo da capire l'effetto principale di ogni parametro e almeno le interazioni più importanti tra parametri diversi. I vari schemi fattoriali adottati nel piano delle prove, insieme ad alcune prove preliminari, hanno raggiunto entrambi gli scopi. In merito ai risultati delle prove si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Il rapporto di carico  $R$  ha un effetto sia sulla durata della prova che sulla velocità di propagazione della cricca nel senso che per valori bassi di questo parametro (ampi cicli di sollecitazione) l'avanzamento della cricca è più veloce. Questo effetto è indipendente dagli altri parametri sia di prova che ambientali.
- La frequenza influenza la velocità di propagazione della cricca soprattutto per carichi a Modi Misti con un effetto più evidente nelle prove con angolo di carico  $\beta = 30^\circ$ , indicando un'interazione con la direzione del carico. Per carichi a Modi Misti si verifica infatti uno sfregamento delle superfici di frattura che provoca un rallentamento della propagazione della cricca; questo meccanismo è favorito dalle alte frequenze poiché in tali condizioni le superfici di frattura vengono a contatto un maggior numero di volte.
- A parità di  $f$  e di  $R$ , l'angolo di carico  $\beta$  al suo aumentare provoca un rallentamento della cricca in virtù del meccanismo descritto al punto precedente. Tale meccanismo è evidentemente più efficace man mano che ci si avvicina alla condizione di Modo II puro, cioè al diminuire di  $\beta$ .
- L'osservazione al SEM della superfici di frattura in generale ha messo in luce una certa fragilità del materiale, confermando tuttavia le considerazioni e le ipotesi fatte sulla base dell'analisi delle curve sperimentali

#### *Effetti della temperatura*

- Non è stata rilevata un'interazione della fatica col creep a  $300^\circ\text{C}$ , né sono stati osservati arrotondamenti dell'apice della cricca, pertanto l'influenza principale della temperatura è quella di favorire l'ossidazione della superficie della cricca provocando un infragilimento del materiale in questa zona.
- Esiste una forte interazione tra temperatura e frequenza in quanto a basse frequenze la cricca rimane aperta per più tempo ad ogni ciclo permettendo quindi all'ossidazione di agire in maniera più incisiva. Queste osservazioni trovano riscontro in diversi lavori sperimentali [8], [9].
- Anche tra temperatura ed angolo di carico  $\beta$  sembra esistere un'interazione tale per cui la cricca rallenta al diminuire di  $\beta$ . Probabilmente il Modo di apertura della cricca sotto carichi misti ostacola la penetrazione in profondità dell'ossigeno. Questo dato andrebbe tuttavia validato da altre prove vista la scarsità di bibliografia in merito
- L'osservazione al SEM anche per le prove ad alta temperatura ha dato un buon sostegno alle conclusioni tratte dall'analisi dei grafici.

## Bibliografia

- [1] Tanaka K., *Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis*, Engng Fracture Mech., 6, pp.493-507, (1974).
- [2] Patel A. B., Pandey P.K., *Fatigue crack growth under mixed mode loading*, Fatigue Fracture Engng Mater. Structures, 4, 65-77, (1981).
- [3] Chen W. R., Keer L. M., *Fatigue crack growth in mixed mode loading*, J. Engng Mater. Technol., ASME Trans., 113, 222-227, (1991).
- [4] Quian J., Fatemi A., *Mixed Mode Fatigue Crack Growth: a literature Survey*, Engng Fracture Mech., 55, pp.969-990, (1996).
- [5] Yokobori T., Sato K., *The effect of frequency on fatigue crack propagation rate and striation spacing in 2024 T3 aluminium alloy and SM-50 steel*, Engng Fracture Mech., 8, pp. 81-88, (1976).
- [6] Corradi S., Marchetti M., *Plasticity effects on mixed mode fatigue crack propagation in Ti-6Al-4V alloy*, Aerotecnica Missili e Spazio, 75 No 3-4, pp. 101-108, (1996).
- [7] Sakamoto H., Takezono S., Nakano T., *Effect of stress frequency on fatigue crack initiation in titanium*, 30, pp. 373-382, (1988).
  
- [8] Hardy M. C., Leggett A.J., *Effect of loading Rate on the Elevated Temperature Fatigue Crack Growth Behaviour of a near- $\alpha$  Titanium Alloy*, in Titanium 95: Science and Technology, Blenkinsop P.A., Evans W. J. Flower H.M., Eds., Birmingham, pp. 1195-1202, (1995).
- [9] Ferreira J. A. M., Costa J. D. M. , Reis P. N. B., *Fatigue and Creep in Titanium grade 2*, Int. J. Fatigue, 18, pp. 227-233, (1996).
- [10] Otsuka A., Tohgo K., Matsuyama H., *Fatigue crack initiation and growth under mixed mode loading in Aluminium alloys 2017-T3 and 7075-T6*, Engng Fracture Mech., 28 p. 721-732, (1987).
- [11] Pook L. P., *A failure mechanism map for mixed mode I and II fatigue crack growth thresholds* , Int. J. Fracture, 28, R21-23, (1985).
- [12] Richard H. A., *A new compact shear specimen*, Int. J. Fracture, 17, pp. R105-R107, (1981).
- [13] Hu H. P., Jia B. Y., Li Z. T., Lu X., in Localized Damage III Computer Aided Assesment and Control, Eds. Aliabadi M.H., Carpinteri A., Kalisky S. and Cartwright D. J., Computational Mechanics Publication, Boston, p. 11, (1994).
- [14] ASTM E647-95a, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*.
- [15] Srinivas V., Vasudevan P., *Studies of Mixed Mode Crack propagation in D16AT Alluminium alloy*, Engng Fracture Mech., 45, pp. 415-430, (1993).