

PROPAGAZIONE DELLA CRICCA DI FATICA IN MODO MISTO (I+II) NELLA LEGA TI-6AL-4V

F. Iacoviello¹, N. Bonora¹, M. Marchetti²

¹ Di.M.S.A.T., Università di Cassino, via G.di Biasio 43, 03043 Cassino (FR)

² Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Univ. di Roma "La Sapienza", via Eudossiana
iacoviello@unicas.it

Sommario

In questo lavoro è stata analizzata la resistenza alla propagazione di una cricca di fatica in una lega Ti-6Al-4V (dopo laminazione a caldo) sottoposta ad uno stato di sollecitazioni di tipo misto (I+II), compreso il modo I, utilizzando dei provini di tipo CTS (Compact Type Shear). Nel caso delle prove svolte in modo I puro, i risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti utilizzando provini di tipo CT (Compact Type), con diversi rapporti di carico. Inoltre, è stata considerata sia l'influenza della frequenza di applicazione del carico sia sulle curve di propagazione della cricca di fatica che sugli angoli di propagazione. Le superfici di frattura sono state analizzate mediante un microscopio elettronico a scansione (SEM).

Abstract

In this work mixed mode (I+ II) fatigue crack propagation resistance has been investigated considering CTS (Compact Type Shear) specimens. Mode I fatigue crack propagation results have been compared with those obtained considering CT (Compact Type) specimens with different stress ratios. The loading frequency influence has been also investigated considering both the crack propagation curves and the crack propagation angles. Fracture surfaces have been investigated by means of a scanning electron microscope (SEM).

1. Introduzione

Le strutture aerospaziali, nucleari e chimiche sono sempre caratterizzate da un elevato livello della distribuzione degli sforzi, sia statico che dinamico. L'importanza di queste strutture, insieme con l'elevato costo di eventuali rotture, implica la necessità di una progettazione che consideri tutti gli aspetti, compresa l'analisi della resistenza alla propagazione della cricca di fatica dei materiali

utilizzati. Sollecitazioni ripetute inducono alla propagazione di difetti intrinseci che sono sempre presenti in un metallo, sia sulla superficie che al suo interno. La propagazione di questi difetti, che può essere sia stabile che instabile, dipende da una moltitudine di fattori, quali, ad esempio, la dimensione e la forma del difetto, le condizioni delle sollecitazioni ripetute (ampiezza, frequenza, rapporto di carico, forma d'onda) e condizioni ambientali (solo per difetti superficiali). Ad esempio, nel caso di strutture aeronautiche, queste sollecitazioni ripetute possono essere dovute a vibrazioni del motore oppure a flusso instabile.

La resistenza alla propagazione della cricca di fatica è solitamente analizzata in modo I (modo di apertura della cricca). Valori di riferimento ottenuti per il modo I di propagazione sono disponibili per numerose leghe e l'analisi dell'influenza dei vari fattori riesce ormai a considerare numerose condizioni per molte leghe. Nelle strutture reali i difetti sono orientati in modo casuale: ciò implica delle modalità di propagazione della cricca di fatica che sono più frequentemente di tipo misto piuttosto che di modo I puro.

Il problema della propagazione della cricca di fatica in modo misto è stato studiato inizialmente da Iida and Kobayashi [1], ma in quasi 30 anni questo problema è stato considerato molto meno della propagazione della cricca in modo I.

In questo lavoro è stata analizzata la resistenza alla propagazione della cricca di fatica in modo misto in una lega Ti-6Al-4V (dopo laminazione a caldo), considerando diversi angoli di propagazione, incluso il modo I. Sono stati utilizzati dei provini non standardizzati CTS (Compact Tension Shear). I risultati ottenuti con provini CTS di propagazione di cricca di fatica in modo I sono stati confrontati con quelli ottenuti utilizzando dei provini standardizzati di tipo CT (Compact Type). Inoltre, è stata considerata l'influenza sia della frequenza che del rapporto di carico. Le superfici di frattura sono state analizzate mediante l'impiego del microscopio elettronico a scansione (SEM) Philips XL30 ESEM-FEG dotato di EDX.

2. Materiale e procedura sperimentale

La lega analizzata è una lega a base di titanio Ti-6Al-4V, dopo laminazione a caldo, con la composizione chimica e le proprietà meccaniche illustrate nella tabella 1.

Tabella 1

Composizione chimica della lega Ti-6Al-4V (% peso) e proprietà meccaniche della lega Ti-6Al-4V, dopo laminazione a caldo.

Ti	Al	V	Fe	N	O	C	Altri el.
resto	6.10	3.80	0.17	0.012	0.122	0.01	0.06
σ_y [MPa]	σ_{UTS} [MPa]	ν	E [GPa]	HRC	K_{IC} [MPa \sqrt{m}]		
825	900	0.33	110	36-39	106		

Questa lega è caratterizzata da una struttura α - β . Nella figura 1 si può osservare tale microstruttura (SEM), ottenuta dopo un attacco chimico in una soluzione acquosa di HF (1 ml) + HNO₃ (5 ml) + H₂O (94 ml). Sono evidenti dei grani molto piccoli "primari" di fase α (chiari) precipitati all'interno di una matrice di fase β (scura) [2]. La morfologia della fase α dipende dal grado di lavorazione a caldo: nel caso di un livello leggero di deformazione si ottengono grani di tipo aciculare, mentre nel

caso di un elevato livello di deformazione a caldo, come in questo caso, si ottengono grani di tipo equiassico [3] Inoltre, sono presenti anche dei grani di fase β non trasformata.

Le prove di propagazione della cricca in modo misto sono state eseguite utilizzando dei provini CTS, ottenuti mediante elettroerosione, con degli afferraggi specifici (figure 2a e 2b). Il modo misto di propagazione della cricca con angoli differenti è stato assicurato utilizzando dei fori differenti per

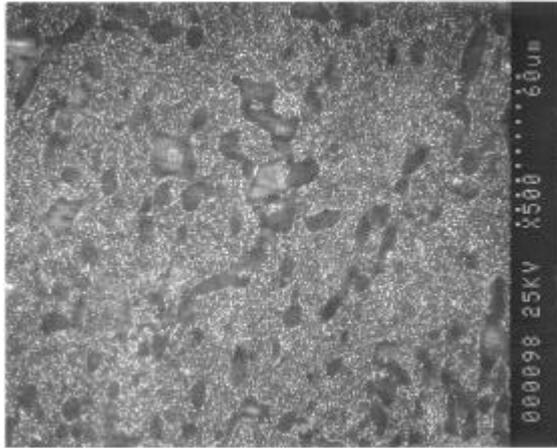


Figura 1
Analisi della microstruttura della lega Ti-6Al-4V dopo laminazione a caldo (SEM).

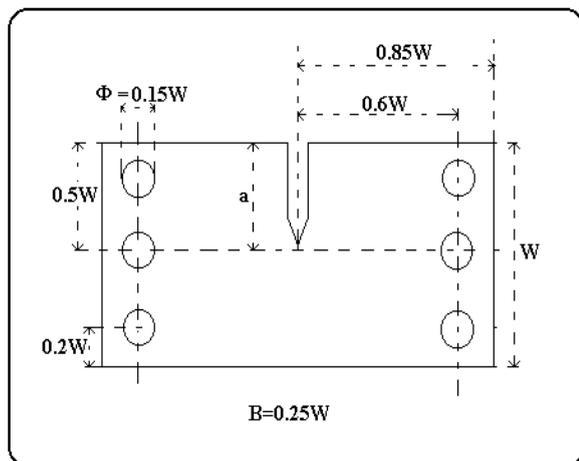


Figura 2a
Provino CTS.

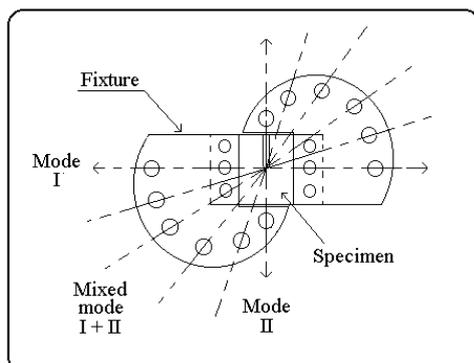


Figure 2b
Modalità di afferraggio del provino CTS.

applicare il carico. In questo modo le due componenti I e II sono in fase [4].

Le espressioni dei fattori di intensificazione degli sforzi sono state calcolate da Hu et al. [5] utilizzando il “isoparametric singularity element method” ed un metodo di calibrazione fotoelastica:

$$K_I = \frac{P\sqrt{P}}{WB} \sin \alpha Y_1(a/W) \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{P}}{WB} \cos \alpha Y_2(a/W) \quad (2)$$

dove P è il carico, W e B sono rispettivamente la larghezza e lo spessore del provino CTS, “a” è la lunghezza della cricca, “ α ” è l’angolo di avanzamento della cricca (definito come l’angolo fra la direzione di applicazione del carico e la direzione di avanzamento), ed $Y_1(a/W)$ e $Y_2(a/W)$ hanno le seguenti espressioni polinomiali:

$$Y_1(a/W) = - 4.23 + 40.6 (a/W) - 94.0 (a/W)^2 + 82.1 (a/W)^3 \quad (3)$$

$$Y_2(a/W) = 7.99 - 3.27 (a/W) + 20.9 (a/W)^2 - 32.9 (a/W)^3 + 17.9 (a/W)^4 \quad (4)$$

L’angolo α deve includere sia l’angolo di intaglio θ fra la direzione di applicazione del carico e la direzione dell’intaglio, e l’angolo di deviazione β fra la direzione di avanzamento della cricca e la direzione dell’intaglio.

Secondo queste definizioni:

$$\alpha = \theta + \beta$$

L’ampiezza del fattore di intensificazione degli sforzi che influenza il comportamento della cricca è funzione sia della componente in modo I che

della componente in modo II. Per il modo misto di propagazione I + II, è possibile definire un valore “effettivo” ΔK (definibile come ΔK_{eff}) che dipende dalle due componenti. Se le due componenti I e II sono in fase, come in questa campagna di prove, tale valore può essere ottenuto utilizzando la seguente espressione [6]:

$$\Delta K_{eff} = \sqrt{(\Delta K_I)^2 + (0.8\Delta K_{II})^2} \quad (5)$$

La resistenza alla propagazione della cricca di fatica della lega Ti-6Al-4V è stata analizzata nelle condizioni di temperatura e di umidità del laboratorio, utilizzando una macchina per prove meccaniche oleodinamica (carico massimo = 100 kN), in condizioni di ampiezza di carico costante, ad una frequenza di 10 Hz, con una forma d’onda sinusoidale. L’avanzamento della cricca di fatica è stato misurato con un sistema semiautomatico a controllo ottico, con un ingrandimento pari a x175.

Il programma di prove è stato il seguente.

Anzitutto, la propagazione della cricca in modo I è stata caratterizzata utilizzando dei provini standard CT (ricavati secondo una direzione di sollecitazione LT) in accordo con la normativa ASTM E647. È stata analizzata l’influenza del rapporto di carico R ($R = K_{min}/K_{max}$) considerando 4 valori ($R = 0.2; 0.3; 0.4; 0.5$). È stata quindi analizzata la ripetibilità dei risultati delle prove di propagazione, considerando sei prove svolte nelle medesime condizioni (provini CT, modo I, 10 Hz, $R = 0.5$). I risultati, sebbene le prove non siano in numero tale da poter essere considerate un campione statisticamente valido, mostrano una dispersione decisamente bassa e comunque comparabile con quella ricavabile dalla bibliografia [8-10].

Quindi, sono state eseguite prove di propagazione in modo misto I+II considerando provini CTS. Sono state considerate 4 differenti configurazioni: $\theta = 90^\circ$ (modo I puro), 60° , 45° e 30° . Per $\theta = 90^\circ$ le prove sono state svolte per $R = 0.4$ e 0.5 in modo da poter confrontare i risultati ottenuti con le due geometrie considerate. Per le altre configurazioni di carico è stato considerato un rapporto di carico di 0.5. Inoltre è stata considerata anche l’influenza della frequenza di applicazione del carico. Infatti, per ognuna delle configurazioni di carico sono state considerate le frequenze di sollecitazione di 10 e di 20 Hz.

I risultati delle prove di propagazione della cricca di fatica nel piano $da/dN-\Delta K$ (velocità di avanzamento-ampiezza del fattore di amplificazione degli sforzi) sono stati interpolati utilizzando la relazione proposta da Paris-Erdogan [7] (valida nello stadio II di III):

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (6)$$

dove C ed m sono dei parametri di interpolazione.

Questa relazione empirica è stata applicata sia ai risultati di propagazione della cricca per fatica in modo I, che nel caso di propagazione in modo misto I + II.

3. Risultati e commenti

I risultati di propagazione della cricca di fatica in modo I, ottenuti utilizzando dei provini CT, mostrano una diminuzione della velocità di avanzamento con la diminuzione del valore di R, per lo stesso valore di ΔK (figura 3). Lo spostamento verso sinistra delle curve di propagazione con

l'aumento del rapporto di carico R è dovuto all'effetto di chiusura, probabilmente dovuto alla rugosità della superficie.

Le prove di propagazione della cricca in modo I effettuate impiegando dei provini CTS, a diversi rapporti di carico, hanno mostrato una ottima comparabilità con quelli mostrati in figura 3. La figura 4 mostra l'influenza dell'angolo di cricca α sulla propagazione della cricca di fatica per una frequenza di applicazione del carico di 10Hz. Solitamente tale angolo cambia con l'avanzamento della cricca, ma, nel caso dei test effettuati in questa campagna di prove, l'avanzamento per fatica della cricca si è avuto per pochi millimetri. Per queste modalità sperimentali, l'angolo di cricca α resta costante.

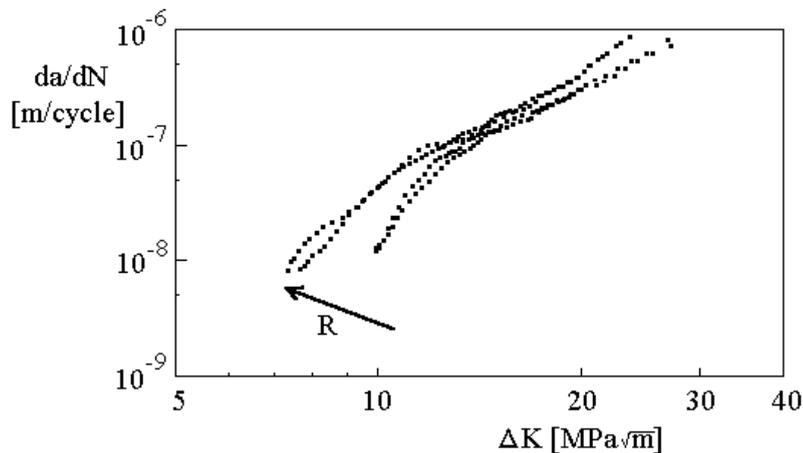


Figura 3
Propagazione della cricca di fatica nella lega Ti-6Al-4V in modo I per differenti valori del rapporto di carico. Risultati ottenuti utilizzando provini CT.

del fattore di intensificazione degli sforzi, l'incremento della importanza

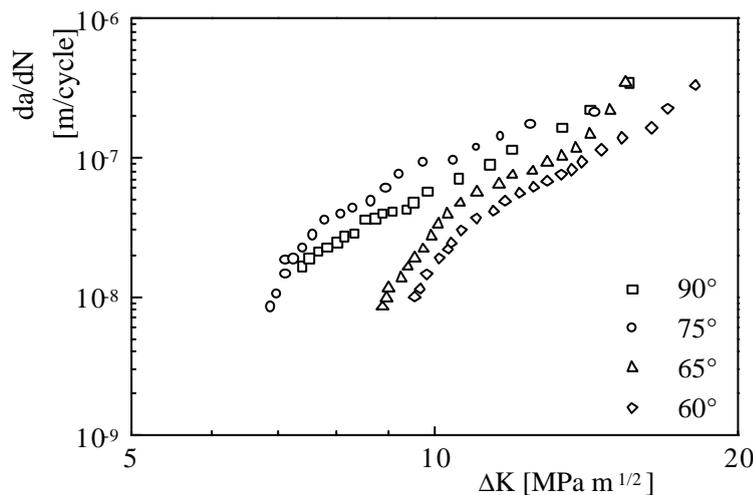


Figura 4
Propagazione della cricca di fatica in modo misto I + II per differenti valori dell'angolo di cricca α ; $R = 0.5$; 20 Hz.

Anche la frequenza di applicazione del carico non influenza l'angolo di propagazione α . Quindi, in accordo con queste evidenze sperimentali, nelle espressioni del ΔK (1) e (2), per ognuno degli angoli di intaglio θ , è possibile utilizzare un valore univoco e costante di α .

L'aumento della importanza della componente di modo II implica un aumento del valore della soglia ΔK_{th} . Nello stadio II di III (stadio di Paris), considerando lo stesso valore dell'ampiezza della componente di modo II implica un valore inferiore della velocità di avanzamento della cricca. Tale comportamento è più evidente considerando una frequenza di carico di 20 Hz (figura 5). L'incremento della frequenza di sollecitazione implica valori inferiori della velocità di avanzamento della cricca. L'aumento della frequenza di applicazione del carico implica uno spostamento verso destra delle curve di propagazione, probabilmente per un aumento dell'influenza

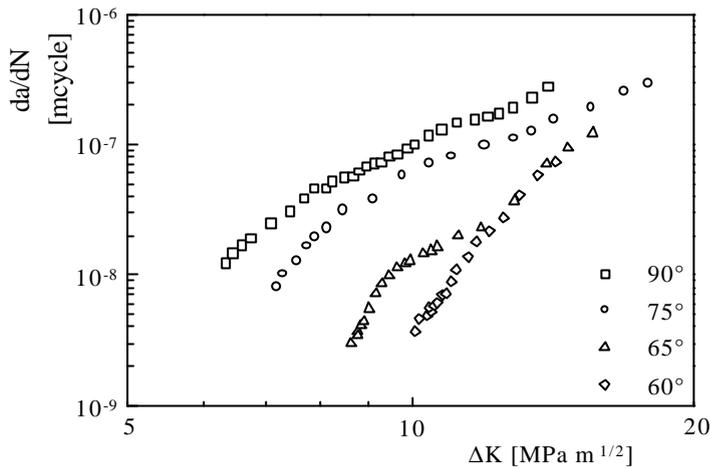


Figura 5
Propagazione della cricca di fatica in modo misto I + II per differenti valori dell'angolo di cricca α ; $R = 0.5$; 20 Hz.

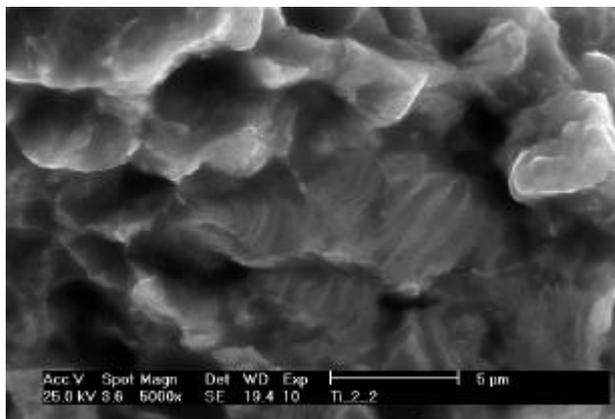


Figura 6
Propagazione della cricca di fatica in modo I: $DK = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; $R = 0.5$; 10 Hz. La cricca avanza da sinistra verso destra

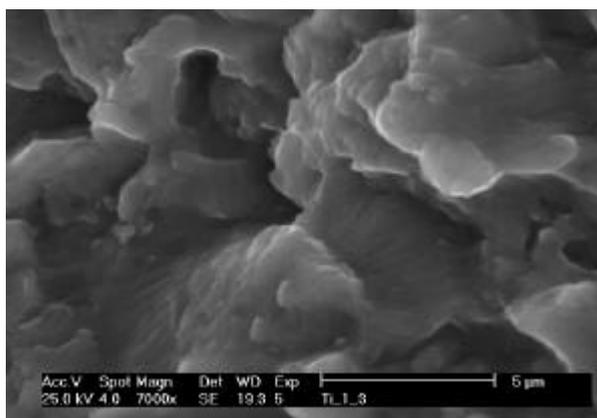


Figura 7
Propagazione della cricca di fatica in modo misto: $\alpha = 65^\circ$; $DK = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$; $R = 0.5$; 10 Hz. La cricca avanza da sinistra verso destra.

dell'effetto di chiusura indotto dalla formazione di ossidi[11].

Le superfici di frattura analizzate al SEM mostrano una evidente formazione di striature sia nel modo di propagazione I puro, che in quello misto I + II (rispettivamente figure 6 e 7). Nel caso di propagazione per sollecitazione in modo I (figura 6), le superfici sono planari, con una evidente formazione di striature.

Invece, nel caso di propagazione in modo misto, si può osservare (figura 7) una morfologia “a scalini”, che permette alla cricca di avanzare, a livello macroscopico, secondo un determinato angolo di cricca α . Tale morfologia implica una maggiore rugosità superficiale e, quindi, un effetto di chiusura che aumenta di importanza. Per valore ancora più elevati del ΔK l'influenza della zona plasticizzata all'apice della cricca [5, 12], sia per ciò che riguarda le dimensioni, sia per ciò che riguarda la forma, diventa più importante. Di conseguenza, l'importanza della componente di modo II diminuisce.

I parametri di interpolazione della relazione di Paris-Erdogan C ed m possono essere interpolati mediante una relazione lineare del tipo [13-16]:

$$\log C = A + B m \quad (7)$$

E' possibile osservare (figura 8) che tale relazione riesce ad interpolare piuttosto bene sia i parametri ottenuti per differenti direzioni di carico (sia modo I, ottenuti con provini CT e CTS, che in modo misto I+II) che per differenti frequenze. Applicando la relazione (7) ai risultati ottenuti sia in modo I (con provini CT e CTS) che in modo misto I + II

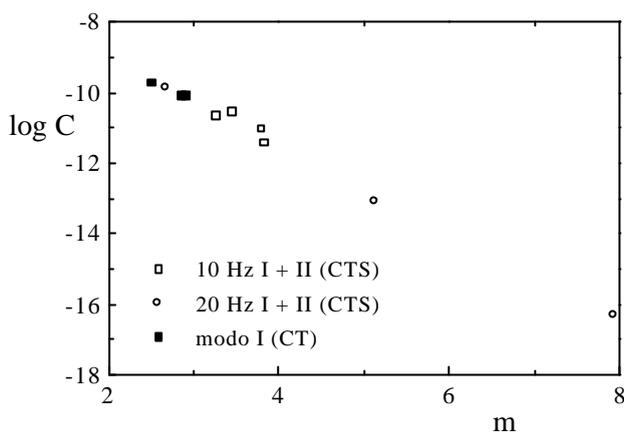


Figura 8
Parametri di interpolazione m e C della relazione di Paris-Erdogan per differenti angoli di propagazione e per differenti frequenze di applicazione del carico (10 e 20 Hz)

si ottiene la seguente retta interpolante con un ottimo coefficiente di correlazione ($r = -0.999$):

$$\log C = -6.71 - 1.21 m$$

La relazione (7) implica, nel diagramma bilogarithmico $da/dN - \Delta K$, la presenza di un punto (chiamato “pivot point”, ovvero PP) comune a tutte le curve di propagazione considerate, indipendentemente dal provino utilizzato o dalla modalità di avanzamento della cricca (modo I o modo misto I + II). Solitamente [14] tale punto si trova all’interno della zona di propagazione II

(zona lineare nel piano bilogarithmico) ed è caratterizzato dalle seguenti coordinate:

$$\log (da/dN)_p = -A \quad (8)$$

$$\log \Delta K_p = B \quad (9)$$

Nel caso specifico il PP è caratterizzato dalle seguenti coordinate:

$$(da/dN)_p = 1.95 \cdot 10^{-7} \text{ m/ciclo}$$

$$\Delta K_p = 16.22 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

che si trova nella zona di transizione fra lo stadio II e lo stadio III, e risulta, con una certa approssimazione, identificabile come appartenente a tutte le curve di propagazione.

4. Conclusioni

Dai risultati sperimentali ottenuti è possibile considerare le seguenti conclusioni:

- La propagazione della cricca di fatica in modo I nella lega Ti-6Al-4V è influenzata dall’effetto di chiusura, principalmente indotto dalla rugosità della superficie di frattura.
- Considerando la propagazione della cricca di fatica in modo I, i risultati ottenuti utilizzando dei provini CTS sono comparabili con quelli ottenuti utilizzando dei provini CT.
- La propagazione della cricca di fatica in modo misto I + II è caratterizzata da una diminuzione della velocità di avanzamento della cricca con l’aumento della importanza della componente di modo II, probabilmente per l’aumento dell’importanza dell’effetto di chiusura indotto dalla rugosità della superficie di frattura.
- Gli angoli di avanzamento della cricca α non dipendono né dalla lunghezza della cricca, né dalla frequenza di applicazione del carico.
- L’analisi della superficie di frattura effettuata al SEM mostra una evidente influenza del modo di propagazione, con una notevole formazione di striature per tutte le condizioni di applicazione del carico.

- I parametri di interpolazione C ed m risultano correlabili secondo una relazione del tipo “ $\log C = A + Bm$ ”, indipendentemente dalle condizioni di carico (rapporto di carico, frequenza di applicazione del carico, modo di propagazione, I oppure misto I + II).

Bibliografia

- [1] Iida, S. and Kobayashi, J. *bas. Engng.*, Series D 91, **1969**, 764.
- [2] Mehl, R.F. and others, *Titanium and titanium alloys*, American Society for metals, Metals Park, Ohio, **1982**, 33.
- [3] Chesnutt, J.C. Rhodes, C.G. Williams, J.C. *Titanium and titanium alloys*, American Society for metals, Metals Park, Ohio, **1982**, 100.
- [4] Paoloni, F.M. *Tesi di Laurea in Ingegneria Aeronautica*, **1995**.
- [5] Hu, H.P. Jia, B.Y. Li, Z.T. Lu, X. *Localized Damage III Computer-Aided Assessment and Control*, Ed. M.H. Aliabadi, A. Carpinteri, S. Kalisky and D.J. Cartwright, Computational Mechanics Publication, Southampton Boston, **1994**, 11
- [6] Broek D, *Elementary engineering fracture mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, **1986**, 326.
- [7] Paris D.C., *ASME publication* , n. 62-WA 234.
- [8] Ditlevsen, O. and Olesen, R. *Eng. Fract. Mech.*, **1986**, 25, 177.
- [9] Ditlevsen, O. *Eng. Fract. Mech.*, **1992**, 42, 610.
- [10] Iacoviello, F. and Cavallini, M. *Int. J. Fatigue*, **1995**, 17, 135.
- [11] Tong, J. Yates, J.R. Brown, M.W. *Eng. Fract. Mech.*, **1995**, 52, 4, 613.
- [12] Srinivas, V. and Vasudevan, P. *Eng. Fract. Mech.*, **1993**, 45, 4, 415.
- [13] Yokobori, T in *Fatigue Mechanisms* (Ed.J.T.Fong)ASTM STP 675, American Society for Testing and Materials, **1979**, 683.
- [14] Iost, A and Lesage, J. *Eng. Fract. Mech.* **1990**, 36, 585.
- [15] Cavallini, M and Iacoviello, F. *Int. J. Fatigue* **1991**, 13, 442.
- [16] Iost, A *Int. J. Fatigue* **1991**, 13, 25.