

CRITERI MULTIASSIALI E NUCLEAZIONE DI FRATTURE PER FATICA IN MATERIALI PER IMPIEGO AD ELEVATA TEMPERATURA

M. Filippini^a, S. Foletti^a

^a *Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, via La Masa 34 – 20156 Milano, e-mail:
mauro.filippini@polimi.it, stefano.foletti@polimi.it*

SOMMARIO

Nell'ambito di un programma di ricerca svolto in collaborazione tra il Politecnico di Milano e Avio Propulsione Aerospaziale S.p.A. avente lo scopo di sviluppare metodologie adatte alla previsione della durata a fatica multiassiale di dischi di turbina per motori aeronautici, è stata condotta una campagna di prove di fatica monoassiali e multiassiali con provini tubolari estratti da forgiati di Inconel 718, in condizioni di temperature analoghe a quelle alle quali sono sottoposti i materiali dei dischi durante l'esercizio. Lo scopo della campagna di prove, i cui risultati sono qui presentati, è di consentire di convalidare le metodologie attualmente utilizzate per la valutazione della resistenza a fatica dei dischi di turbine e, allo stesso tempo, di fornire le basi sperimentali per lo sviluppo di criteri specifici per la progettazione di componenti dei motori.

ABSTRACT

A research programme aimed at developing novel design methodologies for turbine engines disks has been carried out in cooperation between Politecnico di Milano (Technical University of Milano) and Avio S.p.A. The main objective of the programme is to extend currently employed methodologies for the assessment of fatigue strength of turbine engines disks by integrating suitable multi-axial fatigue criteria and test results of multi-axial fatigue experiments carried out at temperatures similar to those experienced by the disk materials during service. Smooth tubular specimen cut out of forged parts of Inconel 718 have been employed for conducting multi-axial high temperature fatigue tests. The most relevant features of the research programme are outlined and experimental results will be presented.

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro si inserisce all'interno di un programma di ricerca avente lo scopo di sviluppare metodologie innovative per la progettazione di dischi di turbine per motori aeronautici svolto in collaborazione tra Avio Propulsione Aerospaziale S.p.A. e il Politecnico di Milano. Il programma di ricerca è suddiviso in due attività parallele e strettamente correlate: un'attività di sviluppo di modelli per il calcolo della durata a fatica che integri e sviluppi criteri di resistenza a fatica multiassiale adatti a rappresentare le condizioni tipiche delle modalità con le quali vengono sollecitati i materiali dei dischi [1,2]. È stato osservato perciò che le differenze tra le capacità predittive dei criteri è da una parte da attribuire alla differente formulazione dei criteri e dall'altra alle modalità con le quali, nei diversi criteri, si integrano i dati delle prove, [2,3].

Questa considerazione pone quindi l'accento sulla necessità di eseguire prove di fatica, anche in condizioni multiassiali, che siano rappresentative delle reali condizioni di esercizio dei materiali e che consentano di valutare comparativamente le capacità di previsione di durata dei differenti metodi e criteri. Pertanto, parallelamente è stata condotta una campagna sperimentale di prove multiassiali atte a generare dati per valutare la capacità di previsione dei criteri di resistenza a fatica in condizioni rappresentative di quelle d'esercizio.

In questo lavoro sono presentati e discussi i risultati sperimentali ottenuti. La campagna di prove di fatica multiassiale ad elevata temperatura è stata effettuata impiegando provini tubolari estratti da

forgiati di Inconel 718. Le prove di fatica multiassiali sono state condotte in controllo di deformazione ad una temperatura di 540 °C, che è ritenuta come rappresentativa delle condizioni di esercizio tipiche dei dischi turbina (prove isoterme) impiegando la macchina di prova assiale/torsionale in dotazione dei Laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano.

2. PROVE SPERIMENTALI

Come è stato messo in evidenza in un precedente lavoro [3], per una corretta applicazione dei criteri è necessario identificare per via sperimentale i parametri necessari all'applicazione dei modelli per il calcolo della durata a fatica per i materiali utilizzati per la costruzione dei dischi. Le prove di fatica sono indispensabili per fornire indicazioni di tipo quantitativo sulle modalità di cedimento per fatica degli stessi materiali in condizioni di stato di sforzo multiassiale. Pertanto è stato stabilito di eseguire le prove in condizioni isoterme ad elevata temperatura con una macchina di prova multiassiale: le temperature di prova sono state fissate in modo da rappresentare le condizioni di esercizio tipiche dei materiali impiegati nei motori.

2.1 Materiale

Il materiale impiegato per l'esecuzione delle prove è stato ottenuto dal taglio di forgiati di forma pressappoco toroidale, realizzati con la superlega di nichel Inconel 718. Questi forgiati provengono direttamente da un lotto impiegato per la produzione dei dischi motore; il materiale subisce un processo di doppia rifusione sotto vuoto, seguita da forgiatura a caldo e dal trattamento termico finale. La composizione chimica nominale del materiale è riportata in Tabella 1, mentre nella Tabella 2 sono riportate le caratteristiche meccaniche monotone a temperatura ambiente della lega.

Tabella 1 - Composizione chimica percentuale della lega Inconel 718 (valori medi, in %)

C	Cr	Mo	Ni	Ti	Al	Nb	Fe
0,03	19,00	3,10	53,00	0,95	0,55	5,30	19,00

Tabella 2 - Proprietà meccaniche (a temperatura ambiente) della lega Inconel 718 (pre-aging)

Materiale	E [MPa]	R _{p,0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A %
Inconel 718	205000	1150	1400	15

2.2 Provino

La geometria dei provini e le condizioni di prova sono state stabilite in base a due esigenze fondamentali: avvicinarsi, per quanto permesso dall'attuale stato dell'arte delle tecnologie di prova, alle condizioni di sollecitazione di esercizio cui sono soggetti i materiali dei dischi; rispettare i vincoli geometrici imposti dalle dimensioni dei componenti dai quali ricavare sufficiente quantità di materiale per la realizzazione dei provini, tenendo conto allo stesso tempo dei vincoli imposti dalle attrezzature di prova (dimensioni del sistema di prova e dei sensori utilizzati per il controllo della prova).

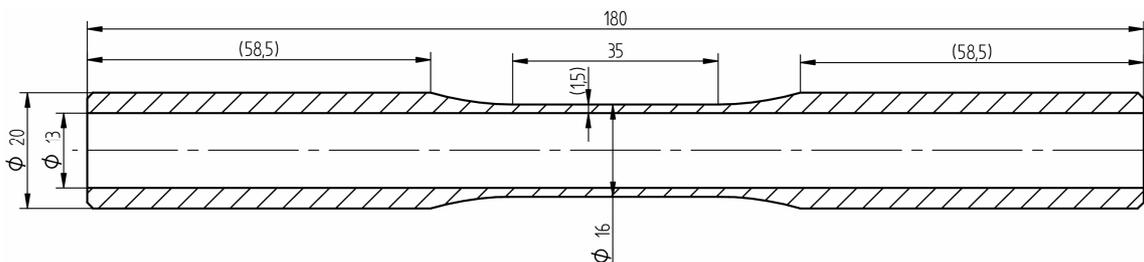


Fig. 1. - Dimensione e forma e dei provini utilizzati nelle prove di fatica

La geometria dei provini che è stata scelta è quella mostrata in Fig. 1. La scelta di provini tubolari è determinata dalla disponibilità, presso i Laboratori del Dipartimento di Meccanica, di una macchina di prova assiale/torsionale MTS 809. I provini tubolari, rispetto ai provini cruciformi, presentano una zona sufficiente con uno stato di sollecitazione uniforme che può essere determinato direttamente dai valori di forza e momento torcente rilevati durante la prova. Inoltre, l'uso di provini tubolari permette di impiegare un induttore di forma semplice per il riscaldamento dei provini, necessario per eseguire le prove alle temperature che corrispondono a quelle di esercizio. Una discussione sul vantaggio dell'uso di provini tubolari rispetto ad altre metodologie di prova si può trovare in [4]. Le dimensioni dei provini e i rapporti caratteristici sono stati scelti partendo dai rapporti caratteristici suggeriti nella normativa ASTM E-2207 [5], e opportunamente ottimizzati per tenere conto dell'esigenza di ricavare il massimo

numero possibile di provini dal forgiato di partenza, delle esigenze tecnologiche per la realizzazione della forma tubolare partendo da un grezzo (pieno) di forma prismatica, delle caratteristiche della macchina di prova (dimensioni e ingombro degli afferraggi, portata della macchina, ecc.).

2.3. Attrezzatura di prova

Le prove di fatica multiassiali sono state eseguite in controllo di deformazione alla temperatura di 540 °C che è ritenuta come rappresentativa delle condizioni di esercizio tipiche dei dischi turbina (prove isoterme). Questa temperatura di prova viene raggiunta mediante un forno a induzione il cui sistema di controllo riceve il segnale di retroazione per mezzo di una termocoppia saldata sulla superficie del provino.

2.4. Modalità di esecuzione delle prove di fatica

Le prove di fatica sono state condotte in controllo di deformazione mediante l'uso dell'attrezzatura mostrata nella Fig. 2.

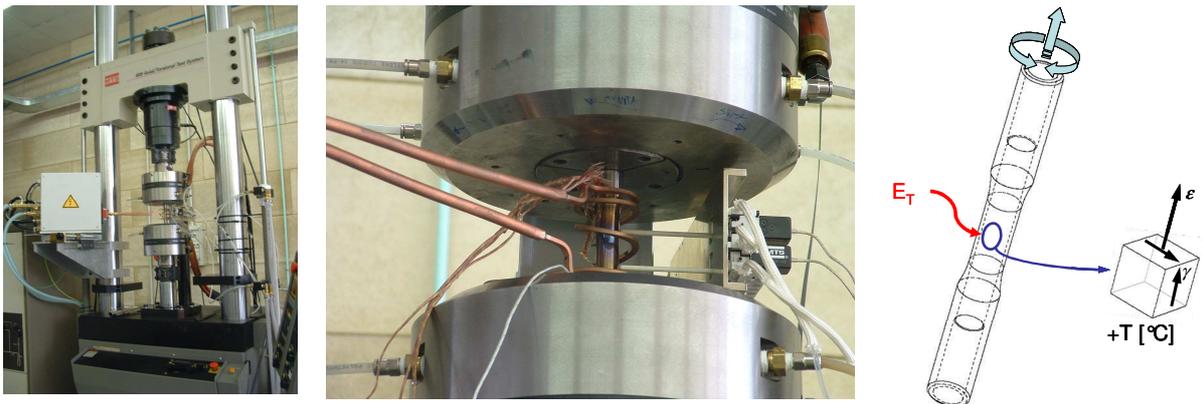


Fig. 2 - Sistema di prova multiassiale (assiale/torsionale) MTS 809 e stato di deformazione imposto. Per eseguire le prove di fatica in controllo di deformazione ad elevata temperatura è impiegato un estensometro assiale/torsionale e il sistema per il controllo della temperatura (forno ad induzione) di cui è visibile l'induttore.

Le prove sono condotte in controllo di deformazione, utilizzando come sensore di controllo un estensometro assiale/torsionale per alta temperatura con base di misura di 25 mm. L'intera procedura di prova, sia per quanto riguarda il controllo della temperatura sia per il controllo e acquisizione dell'evoluzione delle grandezze meccaniche durante le prove, è stata programmata e gestita in maniera integrata sfruttando opportunamente le possibilità offerte dall'hardware e dal software per il controllo del sistema di prova. Un provino è stato inizialmente utilizzato per la messa a punto dei parametri PID per permettere il corretto svolgimento delle prove in controllo di deformazione [6]. Tutte le prove di fatica sono state condotte con un forma d'onda triangolare con frequenza di 0,5 Hz, fatta eccezione per le prove assiali/torsionali non in fase, per le quali è stata imposta una forma d'onda sinusoidale.

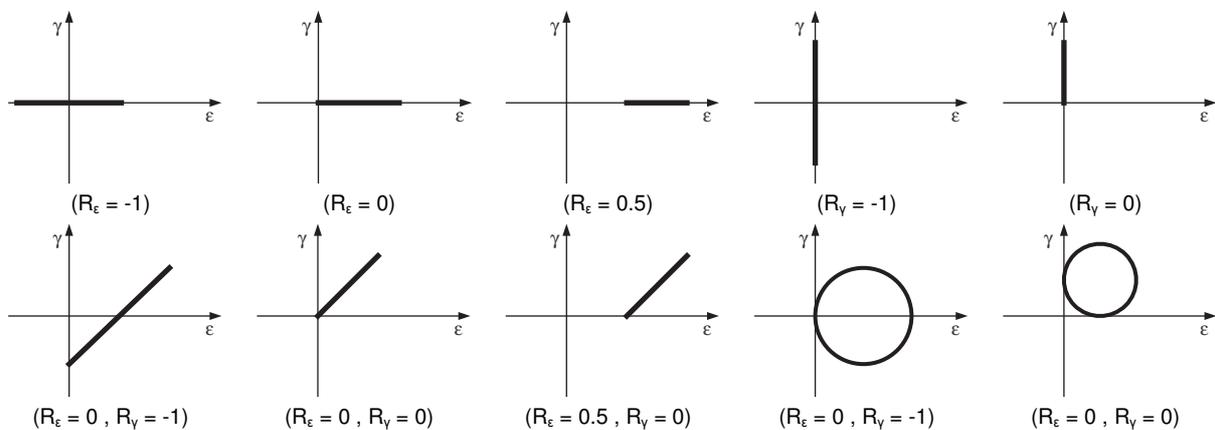


Fig. 3 - Percorsi di carico imposti nelle prove sperimentali

Le prove sono state eseguite con differenti percorsi di carico e con differenti rapporti di ciclo R , mostrati in Fig. 3. Le prove assiali (monoassiali) sono state condotte con i rapporti di ciclo $R_\epsilon = -1, 0$ e $0,5$: il set di risultati con $R_\epsilon = -1$ sono necessari all'identificazione dei parametri della curva di Manson-Coffin e della curva ciclica, mentre i risultati con rapporti di ciclo $R_\epsilon = 0$ e $R_\epsilon = 0,5$ sono richiesti per l'identificazione dei parametri specifici di molti criteri per il calcolo della durata a fatica ed in particolare per poter tenere conto dell'effetto di deformazioni e/o sforzi medi, [3,7]. Invece altri criteri, ad esempio alcuni di quelli basati sul concetto di piano critico [2,4], prevedono di identificare i parametri caratteristici dei criteri sulla base di dati di prove torsionali: le prove torsionali sono state eseguite con due rapporti di ciclo differenti, $R_\gamma = -1$ e $R_\gamma = 0$, per mettere in evidenza l'effetto di uno stato di sollecitazione torsionale medio sulla durata a fatica.

Sono state eseguite inoltre prove di fatica multiassiale imponendo i percorsi di carico mostrati in basso in Fig. 3. Le prove assiali/torsionali in fase sono state eseguite con tre combinazioni differenti del rapporto di ciclo per le deformazioni assiali e torsionali: $R_\epsilon = 0, R_\gamma = -1$; $R_\epsilon = 0, R_\gamma = 0$; $R_\epsilon = 0,5, R_\gamma = 0$. Di queste tre combinazioni solo la seconda, con rapporti di ciclo entrambi nulli, comporta uno stato di sollecitazione proporzionale con direzioni principali fisse, mentre gli altri due casi ricadono nel caso più generale di percorsi di carico affini. Infine, sono state eseguite alcune prove applicando un percorso di carico con deformazioni non in fase, con differenza di fase di 90° , e con due differenti combinazioni di rapporti di ciclo, $R_\epsilon = 0, R_\gamma = -1$; $R_\epsilon = 0, R_\gamma = 0$; allo scopo di mettere in evidenza le differenze con il caso di deformazioni in fase. In tutte le prove assiali/torsionali è stato mantenuto un rapporto doppio tra la variazione delle deformazioni torsionali e quella delle deformazioni assiali, $\Delta\gamma = 2\Delta\epsilon$. I livelli di deformazione alternata imposti nelle prove sono stati scelti in modo tale da "esplorare" un campo di durata compreso all'incirca tra 210^3 e 210^5 . Si tratta infatti di un range di durate che sono ritenuti compatibili con le durate di alcuni dei componenti dei motori e per i quali le aziende costruttrici di motori già dispongono di dati sul comportamento a fatica di questi materiali.

3. RISULTATI DELLE PROVE SPERIMENTALI

I risultati sperimentali delle prove di fatica ad alta temperatura sono riportati in Fig. 4 in termini d'ampiezza della deformazione imposta in funzione del numero di cicli a rottura. I risultati sono rappresentati separatamente per ciascuna tipologia di prova: assiale, torsionale, assiale-torsionale in fase e fuori fase. Per motivi di riservatezza nei diagrammi l'ampiezza della deformazione è stata normalizzata, per ciascuna tipologia di prova, rispetto al valore massimo applicato. Il numero di cicli a rottura è stato calcolato in corrispondenza di una diminuzione del 25% della componente di forza assiale, se presente, o di quella torsionale.

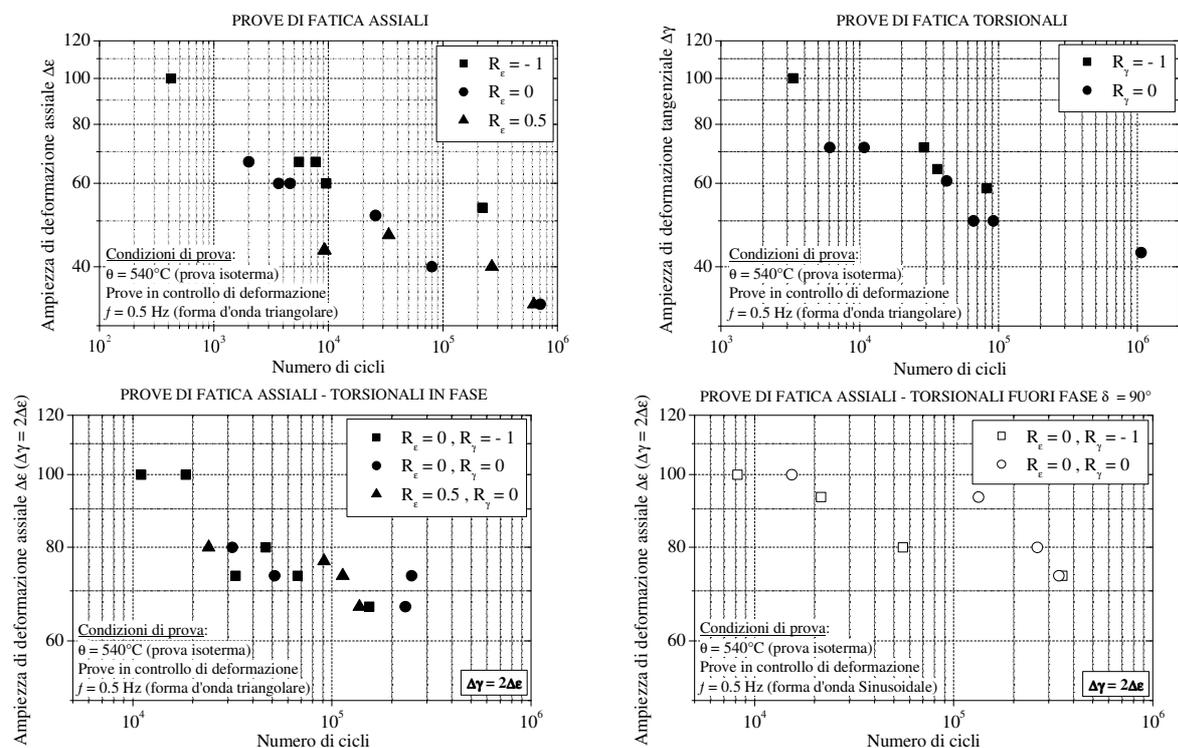


Fig. 4 - Risultati delle prove sperimentali di fatica ad alta temperatura

Considerando le prove puramente assiali, l'osservazione dei risultati sperimentali mostra l'effetto della presenza di una componente media positiva di sollecitazione con conseguente diminuzione, a parità di ampiezza di deformazione imposta, della durata a fatica. Interessante notare come tale andamento non sembri essere funzione dell'entità della deformazione media imposta. Le differenze maggiori si notano infatti confrontando le prove a $R_\epsilon = -1$ con quelle con deformazione media imposta maggiore di zero. Al contrario, passando dal rapporto di ciclo $R_\epsilon = 0$ a $R_\epsilon = 0.5$, con conseguente aumento della componente media imposta, non si osserva un'evidente diminuzione della durata a fatica. Una possibile spiegazione di questo risultato sperimentale è che a parità di ampiezza, il valore massimo di deformazione raggiunto dalle prove a $R_\epsilon = 0.5$ è notevolmente superiore con conseguente plasticizzazione e parziale rilassamento dello sforzo medio.

Nelle prove torsionali si nota come l'effetto di una componente media di sollecitazione sia presente prevalentemente a basso numero di cicli dove il materiale ha superato il limite di snervamento. Questo risultato non sembra quindi essere in contraddizione con l'idea, comunemente accettata dell'indipendenza del limite di fatica torsionale ad alto numero di cicli di un materiale da uno sforzo tangenziale medio [8].

Infine, i risultati sperimentali delle prove multiassiali risultano di più difficile interpretazione. Nonostante l'effetto di una componente media di sollecitazione sembra essere meno evidente, maggiori informazioni potranno essere ottenute dall'analisi dei risultati alla luce dei diversi criteri di resistenza a fatica multiassiale.

4. MODELLI DI PREVISIONE A FATICA

I risultati sperimentali sono stati analizzati considerando diversi criteri di resistenza a fatica in stato di sollecitazione multiassiale. I diversi criteri sono stati applicati considerando il legame elastico tra le deformazioni imposte e gli sforzi calcolati (pseudo-sforzi).

4.1 Criterio di Manson McKnight

Il criterio di Manson McKnight, [2], si basa sull'equazione di von Mises per ridurre lo stato di sforzo multiassiale ad una sollecitazione monoassiale equivalente. Si utilizza l'equazione di von Mises per definire una componente monoassiale alternata σ_{ALT} e una media σ_M :

$$\sigma_{ALT} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{2} \left[(\Delta\sigma_x - \Delta\sigma_y)^2 + (\Delta\sigma_y - \Delta\sigma_z)^2 + (\Delta\sigma_z - \Delta\sigma_x)^2 + 6(\Delta\tau_{xy}^2 + \Delta\tau_{yz}^2 + \Delta\tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$\sigma_M = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{2} B \left[(\delta\sigma_x - \delta\sigma_y)^2 + (\delta\sigma_y - \delta\sigma_z)^2 + (\delta\sigma_z - \delta\sigma_x)^2 + 6(\delta\tau_{xy}^2 + \delta\tau_{yz}^2 + \delta\tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{con } B = \frac{\sum \sigma_I + \sum \sigma_{III}}{\sum \sigma_I - \sum \sigma_{III}} \quad \text{dove} \quad \sigma_{III} < \sigma_{II} < \sigma_I$$

mentre si definiscono i valori delle ampiezze e dei valori medi come:

$$\Delta\sigma_{ij} = \sigma_{ij,max} - \sigma_{ij,min} \quad (3)$$

$$\delta\sigma_{ij} = \sigma_{ij,max} + \sigma_{ij,min} \quad (4)$$

Il segno e l'entità dello sforzo medio dipendono dal fattore B funzione degli sforzi principali massimi e minimi (σ_I e σ_{III}) calcolati in corrispondenza di $\sigma_{ij,max}$ e $\sigma_{ij,min}$:

$$\begin{cases} \sum \Delta\sigma_I = \sigma_{I,max} + \sigma_{I,min} \\ \sum \Delta\sigma_{III} = \sigma_{III,max} + \sigma_{III,min} \end{cases} \quad (5)$$

L'effetto di uno sforzo medio viene introdotto considerando il modello di Walker:

$$\sigma_W = \frac{\sigma_{ALT}}{(1-R)^{1-m}} \quad (6)$$

4.2 Criterio di Socie

Il criterio di Socie, [4], si basa sulla ricerca del piano critico, individuato dagli angoli $\bar{\theta}$ e $\bar{\varphi}$, sul quale è massima l'ampiezza dello sforzo tangenziale:

$$\tau_w = \tau_a(\bar{\theta}, \bar{\varphi}) \left(1 + k \frac{\sigma_{\max}(\bar{\theta}, \bar{\varphi})}{\sigma_y} \right) \quad (7)$$

Individuato il piano critico, lo sforzo equivalente è definito da una combinazione dello sforzo tangenziale e dello sforzo normale massimo, normalizzato rispetto al carico di snervamento ciclico, agente sul medesimo piano.

4.3 Criterio di Smith Watson Topper (SWT)

Il criterio di SWT, [4], si basa sulla ricerca del piano critico, individuato dagli angoli $\bar{\theta}$ e $\bar{\varphi}$, sul quale è massima l'ampiezza dello sforzo normale:

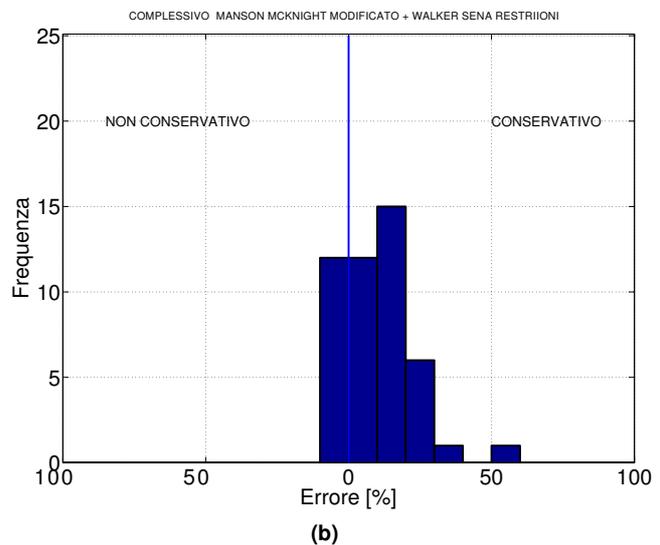
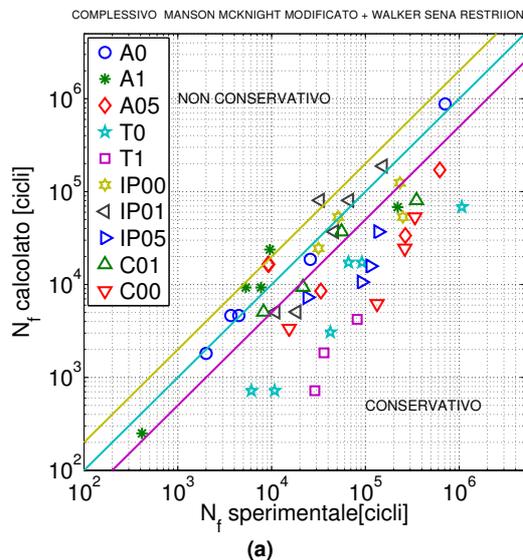
$$\sigma_w = \sqrt{\frac{\Delta\sigma(\bar{\theta}, \bar{\varphi})}{2}} \sigma_{\max}(\bar{\theta}, \bar{\varphi}) \quad (8)$$

Individuato il piano critico, lo sforzo equivalente è definito considerando lo sforzo normale massimo che agisce sul medesimo piano.

4.4 Confronto con i risultati sperimentali

In Fig. 5 è mostrato il confronto tra i risultati sperimentali e le previsioni dei diversi criteri di resistenza a fatica. Gli isogrammi rappresentano l'andamento dell'errore logaritmico:

$$E_{\log} \%^{(i)} = \frac{\log N_f^{(i)} - \log N_c^{(i)}}{\log N_f^{(i)}} \cdot 100 \quad \text{dove } E_{\log} \%^{(i)} = \begin{cases} \geq 0 & \text{se } N_c^{(i)} \leq N_f^{(i)} \text{ conservativo} \\ < 0 & \text{se } N_c^{(i)} > N_f^{(i)} \text{ non conservativo} \end{cases}$$



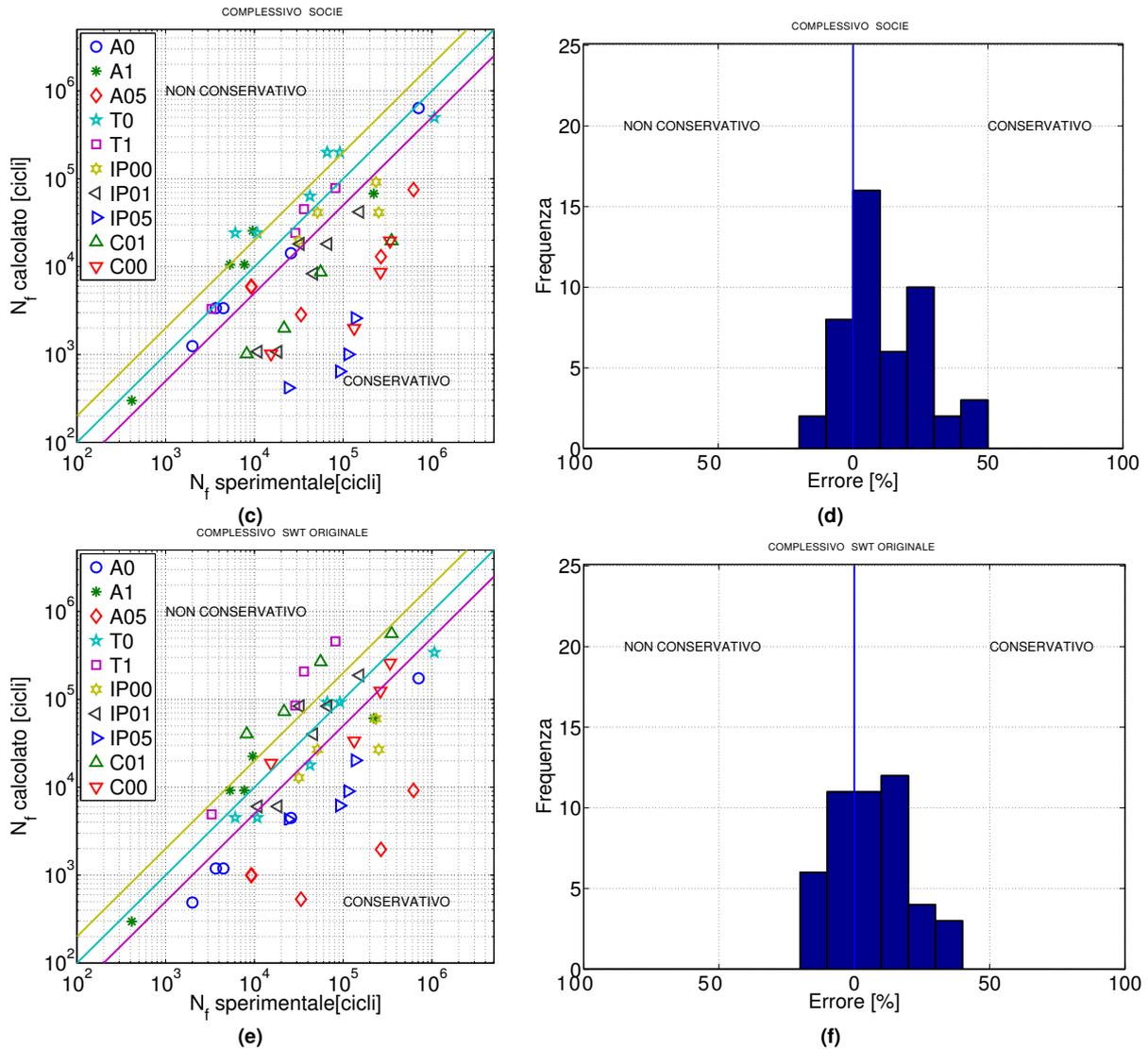


Fig 5 – Previsione di vita a fatica. Criterio di Manson McKnight (a) e (b). Criterio di Socie (c) e (d). Criterio di Smith Watson e Topper (e) e (f).

5. PREVISIONE DELLE DIREZIONI DI NUCLEAZIONE

I criteri basati sul piano critico permettono di calcolare oltre alla durata anche l'inclinazione del piano considerato maggiormente danneggiante. I risultati ottenuti possono essere confrontati considerando anche l'inclinazione della cricca in fase di nucleazione e successiva propagazione iniziale. A seguito della rottura le superfici di frattura sono state analizzate per ricostruire la direzione di nucleazione. In Fig. 6 è mostrato l'angolo di inclinazione della cricca per diverse prove sperimentali (in tutti i casi riportati l'asse del provino è verticale).

Il confronto tra gli angoli valutati sperimentalmente e quelli forniti dai criteri basati sul piano critico, riportati in Tabella 3, mostra un maggiore accordo con i risultati ottenuti dall'applicazione del criterio di Socie, confermando, per il materiale in studio, una modalità di rottura secondo i piani di massimo sforzo tangenziale.

Tabella 3 – Angoli caratteristici previsti dai criteri basati sul piano critico. Gli angoli sono valutati rispetto all'asse del provino (coincide con la direzione della deformazione assiale) in senso antiorario

Tipo di prova	Criterio di Socie	Criterio SWT
Assiali	45°	0°, 90°
Torsionali	0°, 90°	45°
In fase	75°	120°
Fuori fase ($\delta=90^\circ$)	90°	105°

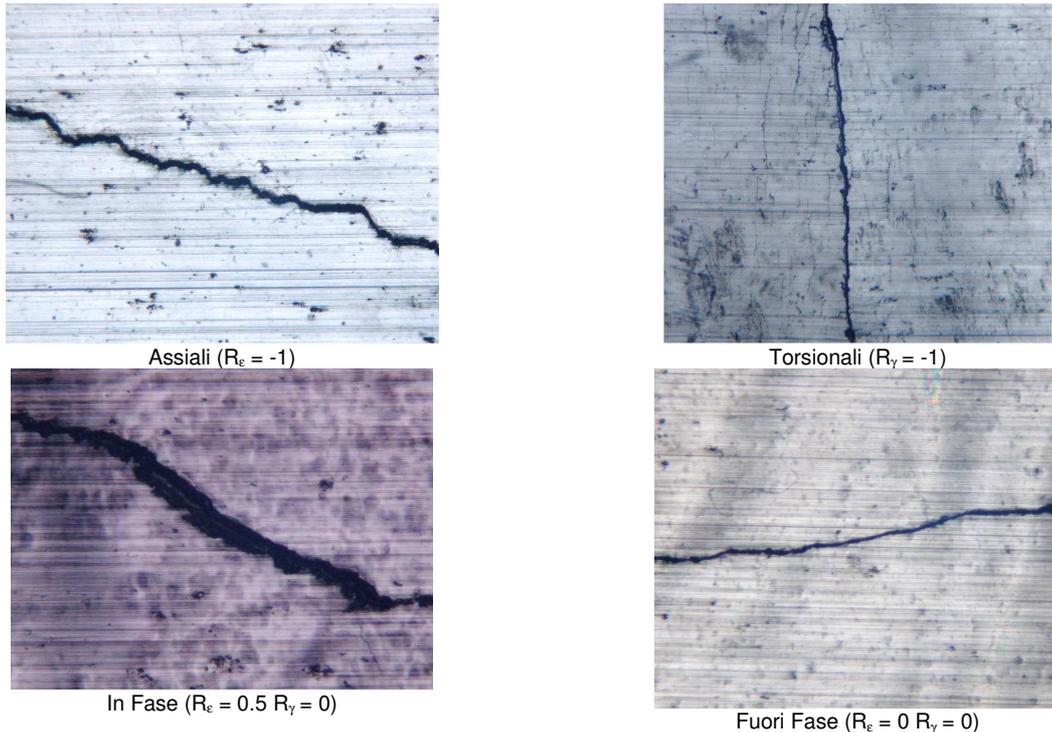


Fig 6 – Angolo di nucleazione e iniziale propagazione per diverse prove sperimentali.

6. CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati presentati i risultati sperimentali di un'estesa campagna di prove di fatica multiassiali ad elevata temperatura condotte su una superlega impiegata per la costruzione di componenti di turbine a gas per impiego aeronautico.

stata sottolineata l'importanza di disporre di un set di dati sperimentali omogeneo con differenti combinazioni di sollecitazioni assiali/torsionali con differenti rapporti di ciclo, per poter integrare i risultati in un modello per il calcolo della durata a fatica. Diversi criteri di resistenza a fatica multiassiale sono stati valutati alla luce delle capacità di previsione della durata a fatica e della possibilità di prevedere correttamente le modalità di cedimento per fatica.

I risultati sperimentali qui riportati hanno quindi fornito gli elementi necessari per lo sviluppo di un modello specifico che possa essere usato come strumento operativo nella progettazione a fatica di componenti di motori aeronautici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Papadopoulos, I.V., Davoli, P., Gorla, C., Filippini, M., Bernasconi, A., A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals, *Int. J. Fatigue*, 1997, 19(3), 219–235.
- [2] Kallmeyer, A.R., Krgo, A., Kurath, P., Evaluation of multiaxial fatigue life prediction methodologies for Ti-6Al-4V, *J. Engng Mater. Tech., Trans. ASME*, 2002, 124(2), 229–237.
- [3] Filippini, M., Foletti, S., Pasquero, G., Prove di fatica ad elevata temperatura in stato di sollecitazione multiassiale, V Convegno Nazionale e dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, 13-16 settembre 2006, Ancona.
- [4] Socie, D.F., Marquis, G.B., *Multiaxial Fatigue*, SAE International, 2000.
- [5] ASTM E 2207, Standard Practice for Strain-Controlled Axial-Torsional Fatigue Testing with Thin-Walled Tubular Specimens, 2002.
- [6] G.B. Thomas et al, A Code of Practice for Constant Amplitude Low Cycle Fatigue Testing at Elevated Temperatures, *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.* 1989, 12(2), 135-153.
- [7] Filippini, M., Foletti, S., Papadopoulos, I.V., Sonsino, C.M., A multiaxial fatigue life criterion for non-symmetrical and non-proportional elasto-plastic deformation. In: Carpinteri, A., de Freitas, M., Spagnoli, A. (cur.), *Biaxial/Multiaxial Fatigue Fracture*, ESIS Publication 31, Elsevier, 2003, pp. 383-400.
- [8] P. Davoli; A. Bernasconi, M. Filippini, S. Foletti, I.V. Papadopoulos, Independence of the torsional fatigue limit upon a mean shear stress, *Int. J. Fatigue*, 2003, 25(6), 471–480.